ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБСТАНОВКАХ СУБДУКЦИИ, КОЛЛИЗИИ И СКОЛЬЖЕНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ



Материалы VII Всероссийской конференции с международным участием

15-18 сентября 2025 г.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНЫЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБСТАНОВКАХ СУБДУКЦИИ, КОЛЛИЗИИ И СКОЛЬЖЕНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

VII Всероссийская конференция с международным участием

Владивосток, 15-18 сентября 2025 г.

Материалы конференции

Владивосток
ИЗДАТЕЛЬСТВО ДВФУ
2025

© ДВГИ ДВО РАН, 2025
ISBN 978-5-7444-5968-0

MINISTRY OF SCIENCE AND HIGHER EDUCATION
OF THE RUSSIAN FEDERATION
FAR EAST GEOLOGICAL INSTITUTE
FAR EASTERN BRANCH
RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

GEOLOGICAL PROCESSES IN THE LITHOSPHERIC PLATES SUBDUCTION,COLLISION AND SLIDE ENVIRONMENTS

VII Russian Scientific Conference with foreign participants

Vladivostok 15-18 September, 2025

Proceedings

Vladivostok
FEFU Publishing HOUSE
2025

© FEGI FEB RAS, 2025
ISBN 978-5-7444-5968-0

УДК 551.24:552.11:552.14:552.16:553(082)
ББК 26.31я43

Председатель программного комитета академик А.И. Ханчук

Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. VII Всероссийская конференция с международным участием, Владивосток, 15–18 сентября 2025 г. : материалы конференции / Дальневосточный геологический институт ДВО РАН. – Владивосток : Изд-во Дальневост. федерал. ун-та, 2025. – 1 CD-ROM ; [403 с.]. – Загл. с титул. экр. – ISBN 978-5-7444-5968-0. – DOI https://doi.org/10.24866/7444-5968-0. – Текст. Изображения : электронные.

В представленных материалах конференции обобщены оригинальные фактические данные отечественных и зарубежных исследователей. Тематика докладов охватывает различные аспекты изучения геологических процессов в зонах субдукции и скольжения литосферных плит: динамику взаимодействия, геологическое строение, стратиграфию и литологию, особенности магматизма, метаморфизма и рудообразования. Обсуждаются данные, полученные с использованием математического моделирования, геофизических, спутниковых и других современных методов. По возрастному диапазону охвачена практически вся история Земли — от раннего докембрия до современности. Разносторонность представленных материалов позволяет комплексно охарактеризовать геологические процессы описываемых геодинамических обстановок.

Материалы опубликованы в авторской редакции. Авторы несут полную ответственность за достоверность приведенных сведений, отсутствие данных, не подлежащих открытой публикации, и точность данных по цитируемой литературе. Некоторые материалы прошли техническое редактирование без извещения авторов.

Текстовое электронное издание

Минимальные системные требования:
процессор с частотой 1,3 ГГц (Intel, AMD); оперативная память 256 МБ,
свободное место на винчестере 335 МБ; Windows (XP; Vista; 7 и т.п.)

Программное обеспечение:
Acrobat Reader, Foxit Reader либо любой другой их аналог

Редакторы:

И.А. Александров, Л.Г. Бондаренко, Н.И. Екимова,
А.И. Малиновский, В.В. Раткин, А.А. Чащин

Дальневосточный федеральный университет
690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10
Тел./факс: 8 (423) 226-54-43
E-mail: dvfutip@yandex.ru, prudkoglyad.sa@dvfu.ru

Изготовитель CD-ROM:
Дальневосточный федеральный университет,
690922, Приморский край, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10

Подписано к использованию 28.08.2025 г.
Объем 58,10 Мб. Тираж 10 экз.

© ДВГИ ДВО РАН, 2025

UDC 551.24:552.11:552.14:552.16:553(082)
LBC 26.31я43

Program Committee Chairman
A.I. Khanchuk, Academician of the Russian Academy of Sciences

Geological Processes in the Lithospheric Plates Subduction, Collision and Slide Environments. Seventh Russian scientific conference with foreign participants, Vladivostok, Russia, 15–18 September 2025 : Proceedings / Far East Geological Institute of the Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences. – Vladivostok : Publishing House of the Far Eastern Federal University, 2025. – 1 CD-ROM; [403 p.]. – Screen title. – ISBN 978-5-7444-5968-0. – DOI https://doi.org/10.24866/7444-5968-0. – Text. Images : electronic.

Conference materials summarize original factual data by Russian and foreign scientists. The participants reported on various aspects of geological processes in zones of subduction, collision and slidung of lithospheric plates: interaction dynamics, geological structure, stratigraphy and lithology, characteristic magmatism, metamorphism and ore formation. The results presented in this book were obtained by means of mathematic modeling, geophysical, satellite, and other modern methods of research.The time span of conference presentations covers actually the entire Earth history, from Early Precambrian to contemporary period. Diverse information discussed at the conference provides complex characteristics of geological processes taking place in the described geological environments.

The materials were published in the author's edition. The authors are fully responsible for the authenticity of the information provided, the absence of the material that is not subject to open publication, and the preciseness of the data on the cited literature. Some papers were technically and typographicaly edited without notifying the authors.

Text electronic edition

Minimum System Requirements:
Web browser Internet Explorer 6.0 or higher, Opera version 7.0 or higher,
Google Chrome version 3.0 or higher)

Editors:

I.A. Alexandrov, L.G. Bondarenko, N.I. Ekimova, A.I. Malinovsky,
V.V. Ratkin, A.A. Chashchin

Signed for use on 28.08.2025
Volume 58,10 Mb Circulation 10
copies

Far Eastern Federal University
690922, Primorsky Territory, Vladivostok, i. Russian, p. Ajax, 10
Tel.: 8 (423) 226-54-43
E-mail: dvfutip@yandex.ru, prudkoglyad.sa@dvfu.ru

CD-ROM Manufacturer:
Far Eastern Federal University
690922, Primorsky Territory, Vladivostok, i. Russian, p. Ajax, 10

© FEGI FEB RAS, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

PLENARY SESSION

А.Н. Диденко, М.Ю. Носырев, Г.З. Гильманова 20

Cu-порфировые месторождения Тихоокеанского пояса в последние 125 миллионов лет

A.N. Didenko, M.Y. Nosyrev, G.Z. Gilmanova

Cu-porphyry deposits of the Pacific Belt in the last 125 million years

Н.Н. Крук 22

Источники и механизмы образования А-гранитов в фанерозойских складчатых областях

N.N. Kruk

Sources and mechanisms of formation of A-granites in Phanerozoic folded regions

А.Б. Перепелов, С.С. Цыпукова, Ю.Д. Щербаков, А.П. Жгилев 27

Позднекайнозойский вулканизм Северной Монголии – типизация и минералого-геохимические особенности пород, источники и условия образования щелочно-базальтовых магм во внутриконтинентальной геодинамической обстановке

A.B. Perepelov, S.S. Tsypukova, Yu.D. Scherbakov, A.P. Zhigalev

Late Cenozoic volcanism in northern Mongolia: classification and mineralogical and geochemical characteristics of rocks, sources and conditions of alkaline basaltic magma formation in an intracontinental geodynamic setting

Е.В. Скляров, А.В. Лавренчук 31

Коровые карбонатиты Ольхонского террейна (Западное Прибайкалье, Россия)

E.V. Sklyarov, A.V. Lavrenchuk

Geology, petrology and mineralogy of beerbachite of the Early Paleozoic Olkhon collisional orogen (West Baikal area, Russia)

Inna Safonova 35

Creation and destruction of continental crust: from ocean to continent

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, СТРАТИГРАФИЯ И ЛИТОЛОГИЯ ЗОН СУБДУКЦИИ, КОЛЛИЗИИ И СКОЛЬЖЕНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ И ДИНАМИКА ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

GEOLOGICAL STRUCTURE, STRATIGRAPHY AND LITHOLOGY OF SUBDUCTION, COLLISION AND SLIPZONES OF LITHOSPHERIC PLATES AND DYNAMICS OF THEIR INTERACTION

Ш.К. Балтыбаев, Э.С. Вивдич, О.П. Полянский, В.Г. Свердлова 39

Динамическая составляющая давления при метаморфизме пород в зоне развития надвигов

Sh.K. Baltybaev, E.S. Vivdich, O.P. Polyansky, V.G. Sverdlova

Dynamic component of pressure during metamorphism of rocks in the thrust zones

Л.Н. Болдушевская 43

Реконструкция тектонической истории Западного Таймыра с учетом данных органической геохимии пород и битумов

L.N. Boldushevskaya
Tectonic history reconstruction of the of Western Taimyr taking into account the data of rocks and bitumen organic geochemistry

Н.А. Бушенкова, Т.А. Ступина, В.Д. Кондратюк 48
Скоростные неоднородности в литосфере района южной границы Охотской плиты по данным JMA каталогов
N.A. Bushenkova, T.A. Stupina, V.D. Kondratyuk
Velocity heterogeneities in the lithosphere of the Okhotsk plate southern boundary area according to JMA catalogs

А.С. Гладков, С.С. Зинякин, Ю.А. Калинин, М.С. Михайлов, В.П. Сухоруков, В.Е. Волкова 51
Структурный контроль рудных тел золоторудного месторождения Жерек (Восточный Казахстан)
A.S. Gladkov, S.S. Zinyakin, Yu.A. Kalinin, M.S. Mikhailov, V.P. Sukhorukov, V.E. Volkova
Structural control of ore bodies of Zherek gold deposit (East Kazakhstan)

А.Г. Гоев, Д.В. Костылев 55
Аномалии строения зоны фазовых переходов мантии в районе о. Сахалин по данным обменных волн
A.G. Goev, D.V. Kostylev
Anomalies in the structure of the mantle transition zone beneath Sakhalin Island according to converted wave data

Н.В. Гореликова, В.В. Раткин, И.А. Чижова, В. Павловски-Глан, Б.И. Семеняк 59
Касситерит как индикатор разновозрастных оловоносных рудно-магматических систем Сихотэ-Алиня
N.V. Gorelikova, V.V. Ratkin, I.A.Chizhova, V. Pawlowsky-Glahn, B.I. Semenyak
Cassiterite as an indicator of different age tin-bearing ore-magmatic systems of Sikhote-Alin

И.М. Дербеко 64
Отражение палеотихоокеанской тектонической эволюции в формировании Монголо-Охотского орогенного пояса
I.N. Derbeko
Reflection of paleo-Pacific tectonic evolution in the formation of the Mongol-Okhotsk orogenic belt

А.Н. Диденко, М.Ю. Носырев, Г.З. Гильманова 69
Структура магнитоактивного слоя Амурской литосферной плиты
A.N. Didenko, M.Y. Nosyrev, G.Z. Gilmanova
The structure of the magnetically active layer of the Amur lithospheric plate

И.И. Лиханов, А.Д. Ножкин, О.М. Туркина, Ю.Л. Ронкин 74
Свидетельства событий гренвильского возраста на западной окраине Сибирского кратона на примере гранитоидов Рязановского массива (Енисейский кряж)
I.I. Likhanov, A.D. Nozhkin, O.M. Turkina, Yu.L. Ronkin
Evidence of Greenville age events at the western margin of the Siberian Craton on example of granitoids from the Ryazanovsky massif (Yenisei Ridge)

Н.В. Мисюркеева, А.Г. Вахромеев 78
Зона форланда Байкало-Патомского надвигового пояса Сибирской платформы: влияние на формирование углеводородных и гидротермальных систем
N.V. Misyurkeeva, A.G. Vakhromeev
Foreland zone of the Baikal-Patom thrust belt of the Siberian platform: influence on the formation of hydrocarbon and hydromineral systems

А.Н. Митрохин 82

Геолого-структурная корреляция меловых образований Комсомольского рудного района и Анаджаканского рудного узла (Хабаровский край, Россия)

A.N. Mitrokhin

Geostructural correlation of the Cretaceous formations of the Komsomolsk ore district and the Anadzhakan ore subdistrict (Khabarovsk Territory, Russia)

М.Ю. Носырев, А.К. Бронников, А.Н. Диденко 87

Геоэлектрическая характеристика литосферы южной части Сихотэ-Алинского орогенного пояса

M.Yu. Nosyrev, A.K. Bronnikov, A.N. Didenko

Geoelectrical features of lithosphere of south part of Sikhote-Alin orogenic belt

А.А. Светлаков, А.А. Добрынина, С.В. Алексеев, Л.П. Алексеева, А.А. Балобаненко 92

Новые данные о взаимосвязи гидрогеологических параметров и сейсмичности Байкальского региона

A.A. Svetlakov, A.A. Dobrynina, S.V. Alexeev, L.P. Alexeeva, A.A. Balobaneko

New data on the correlation between hydrogeological parameters and seismic activity in Baikal area

Ю.А. Степнова, А.В. Коновалов 95

Соотношение между очаговой характеристикой высокочастотного излучения, моментной магнитудой и тектоническим типом землетрясения

Yu.A. Stepnova, A.V. Konovalov

Relationship between source related high frequency acceleration spectral level, moment magnitude and tectonic type of earthquake

В.Т. Съедин, С.П. Плетнев, Т.Е. Седышева 99

Особенности геологического строения и эволюции гайотов Магеллановых гор (Тихий океан)

V.T. S'edin, S.P. Pletnev, T.E. Sedysheva

Features of the geological structure and evolution of the guyots of the Magellan Seamounts (Pacific Ocean)

Н.В. Правикова, А.В. Тевелев, А.Ю. Казанский, П.А. Шестаков, А.А. Дебабова, А.В. Чистякова, Р.В. Веселовский, Е.А. Володина, А.А. Тихвинская, Е.В. Коптев, А.Е. Голдырев 104

Аккреция Уральских террейнов к Восточно-Европейскому кратону: новые изотопно-геохронологические и палеомагнитные данные

N.V. Pravikova, A.V. Tevelev, A.Yu. Kazansky, P.A. Shestakov, A.A. Debabova, A.V. Chistyakova, R.V. Veselovskiy, E.A. Volodina, A.A. Tikhvinskaya, E.V. Koptev, A.E. Goldyrev

Accretion of the Ural terranes to the East European craton: new geochronological and palaeomagnetic data

С.А. Устинов, И.А. Кочкин, В.А. Петров, А.А. Андреев, А.Д. Свечеревский, В.В. Шухов 108

Структурно-геоморфологический подход к реконструкции сдвиговых тектонических процессов западной части Байкало-Патомского пояса на фоне коллизионных процессов в контексте прогноза рудообразующих систем

S.A. Ustinov, I.A. Kochkin, V.A. Petrov, A.A. Andreev, A.D. Svecherevsky, V.V. Shukhov

Structural-geomorphological approach to reconstruction of shear tectonic processes of the western part of the Baikal-Patom belt against the background of collision processes in the context of forecasting ore-forming systems

В.В. Шухов, С.А. Устинов, А.Д. Свечеревский, В.А. Минаев, В.А. Петров 112

Анализ роли региональных тектонических сдвигов в процессе формирования Чукотки на основе структурно-геоморфологического подхода

V.V. Shukhov, S.A. Ustinov, A.D. Svecherevsky, V.A. Minaev, V.A. Petrov

Analysis of the role of regional tectonic shifts in the formation of Chukotka based on a structural and geomorphological approach

МАГМАТИЗМ И МЕТАМОРФИЗМ В ОБСТАНОВКАХ СУБДУКЦИИ, КОЛЛИЗИИ И СКОЛЬЖЕНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

MAGMATISM AND METAMORPHISM IN SUBDUCTION, COLLISION AND SLIP OF LITHOSPHERIC PLATES

А.В. Асеева, А.А. Чащин 118

Сравнительная петролого-геохимическая характеристика мантийных ксенолитов из позднекайнозойских щелочно-базальтовых вулканитов Приморья

A.V. Aseeva, A.A. Chashchin

Comparative petrology and geochemistry of mantle xenoliths from Cenozoic alkali basalts of Primorsky region

З.Г. Бадрединов, Б.А. Марковский 122

Геодинамические условия формирования гранито-гнейсовых куполов Центральной Камчатки

Z.G. Badredinov, B.A. Markovsky

Geodynamic conditions of formation of granite-gneiss domes of Central Kamchatka

А.В. Гурова, И.Ю. Сафонова, А.А. Перфилова, П.Д. Котлер, И.А. Савинский 127

Магматические комплексы Итмурундинской и Тектурмасской складчатых зон Центрального Казахстана: возраст, петрогенезис и геодинамические обстановки формирования

A.V, Gurova, I.Yu. Safonova, A.A. Perfilova, P.D. Kotler, I.A. Savinsky

Magmatic complexes of the Itmurundy and Tekturmas folded zones, Central Kazakhstan: age, petrogenesis and geodynamic settings

М.В. Киселёв, И.А. Александров, А.Ю. Лебедев 132

Геохимические особенности позднемеловых магматических пород северо-восточной части Ульбанского террейна (Хабаровский край)

M.V. Kiselev, I.A. Alexandrov, A.Y. Lebedev

Geochemical Characteristics of Late Cretaceous Magmatic Rocks in the Northeastern Part of the Ulban Terrane (Khabarovsk Krai)

И.И. Лиханов, П.С. Козлов, А.Д. Ножкин, Ю.Л. Ронкин 136

Мезопротерозойский пикрит-пикробазальтовый вулканизм Енисейского кряжа: петрогеохимия, метаморфизм, Rb-Sr и 147Sm-143Nd систематика

I.I. Likhanov, P.S. Kozlov, A.D. Nozhkin, Yu.L. Ronkin

Mesoproterozoic picrate-picrobasalt volcanism of the Yenisei Ridge: petrogeochemistry, metamorphism, Rb-Sr and 147Sm-143Nd systematics

С.О. Максимов 141

Изотопные (Pb) свидетельства раннедокембрийской литосферы Юго-Западного Приморья. Геодинамические следствия.

S.O. Maksimov

Isotopic (Pb) evidence of the early Precambrian lithosphere of South-West Primorye. Geodynamic consequences.

А.А. Орехов, О.А. Гаврюшкина 147

Меланократовые включения в монцонитах Араратского массива (Кавалеровский рудный район, Приморье).

A.A. Orekhov, O.A. Gavryushkina

Melanocratic inclusions in the monzonites of the Ararat massif (Kavalerovo ore district, Primorye, Russia).

И.С. Перетяжко, Е.А. Савина 151

Фрагменты мантийных пород метасоматизированной океанической литосферы в базальтах гайота Говорова

I.S. Peretyazhko, E.A. Savina

Fragments of mantle rocks of metasomatized oceanic lithosphere in basalts of Govorov Guyot

В.Ф. Полин, Н.В. Зарубина, С.Ю. Будницкий 155

Петрология дарьинского фоидолит-фоидосиенитового комплекса Кеткапско-Юнской магматической провинции Алданского щита (РФ) по данным петрогеохимии

V.F. Polin, N.V. Zarubina, S.Yu. Budnitsky

Petrology of foidolite-foidosyenite Darya complex in Ket-Kap–Yuna igneous province of the Aldan shield (Russia) based on petrogeochemical data

В.Ф. Полин, В.В. Яковенко 160

Изотопы кислорода и происхождение щелочных магматогенных комплексов Кеткапско-Юнской магматической провинции (ККЮМП) Алданского щита

V.F. Polin, V.V. Yakovenko

Oxygen isotopes and the origin of alkaline magmatogenic complexes of the Ketkap-Yuna magmatic province (KKYuMP) of the Aldan shield

Е.Б. Сальникова, Ю.В. Плоткина, К.А. Кукса, А.Б. Котов, М.В. Стифеева, С.В. Петров, Ю.М. Бронзова, П.Б. Соколов 165

Результаты U-Pb ID TIMS геохронологических исследований титанита и рутила из рубинсодержащих пород месторождения Лук Йен (северный Вьетнам)

E.B. Salnikova, Yu.V. Plotkina, K.A. Kuksa, A.B. Kotov, M.V. Stifeeva, S.V. Petrov, Yu.M. Bronzova, P.B. Sokolov

U-Pb ID TIMS dating of titanite and rutile from ruby-bearing calc-silicate rocks of the Luc Yen deposit (Northern Vietnam)

К.К. Сохорев, П.А. Тишин 170

Петрологические индикаторы эволюции метаморфизма в Татарско-Ишимбинской сдвиговой зоне (Енисейский кряж)

K.K. Sokhorev, P.A. Tishin

Petrological indicators of metamorphic evolution in the Tatar-Ishimba shear zone (Yenisei Ridge)

А.А. Чащин, Д.В. Андросов, И.Ю. Чекрыжов 175

Геохимические особенности и вопросы петрогенезиса среднеэоценовых базальтов суворовской свиты (Восточный Сихотэ-Алинь)

A.A. Chashchin, D.V. Androsov, I.Yu. Chekryzhov

Geochemical features and questions on the petrogenesis of middle Eocene basaltic rocks of the Suvorovo formation, Eastern SikhoteAlin

Ben Ma, Ping-Ping Liu 180

Heterogeneous Mid-Ocean Ridge Basaltic Magma Plumbing System Underneath the Ultraslow-Spreading SW Indian Ridge

Ze-Xian Yao, Ping-Ping Liu, Ben Ma 183

Accelerated Magma Ascent Through Continental Lithosphere: Insights from Fe-Mg Diffusion of mantle olivine hosted in Cenozoic basalts of Eastern China

ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ, КОЛЛИЗИИ И СКОЛЬЖЕНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

SEDIMENTATION IN THE LITHOSPHERIC PLATES, SUBDUCTION, COLLISION AND SLIDE ZONES

А.С. Бяков, И.Л. Ведерников, И.В. Брынько 187

Проявление позднепермского геосферного кризиса в глубоководных задуговых бассейнах Охотско-Тайгоносской вулканической дуги (Северо-Восток Азии)

A.S. Biakov, I.L. Vedernikov, I.V. Brynko

Manifestation of the Late Permian geosphere crisis in the deep-sea back-arc basins of the Okhotsk-Taigonos volcanic arc (Northeast Asia)

И.Л. Ведерников, А.С. Бяков, И.В. Брынько, С.С Бурнатный 191

Литохимия границы позднепермского массового вымирания на Северо-Востоке Азии

I.L. Vedernikov, A.S. Biakov, I.V. Brynko, S.S. Burnatny

Lithochemistry of the Late Permian mass extinction boundary in Northeast Asia

А.В. Вергунов 196

Оценка роли вулканогенного материала в формировании угленосных отложений мелового возраста Забайкальского края

A.V. Vergunov

Assessment of the role of volcanogenic material in the formation of coal-bearing deposits of the Cretaceous age of the Transbaikal Territory

Н.А. Доронина 200

Литохимия среднепалеозойских терригенных отложений Западного Забайкалья

N.A. Doronina

Lithochemistry of Middle Paleozoic terrigenous deposits of Western Transbaikalia

А.И. Журавлев, А.В. Округин, Б.Б. Герасимов, Е.Е. Лоскутов, А.И. Иванов 205

Возможные коренные источники россыпного самородного золота Эвотинского рудно-россыпного района (Алдано-Становой щит).

A.I. Zhuravlev, A.V. Okrugin, B.B. Gerasimov, E.E. Loskutov, A.I. Ivanov

Possible primary sources of placer native gold in the Evotinskii ore-placer region (Aldan-Stanovoy shield).

Ю.Д. Захаров, А.И. Ханчук, С.В. Высоцкий, Т.А., Веливецкая, А.С. Бяков, Р.В. Кутыгин, А.М. Попов, А.В. Игнатьев, И.В. Брынько, И.Л. Ведерников 210

Предполагаемые причины относительной синхронности событий массового вымирания наземных и морских биот в конце перми

Yu.D. Zakharov, A.I Khanchuk, S.V. Vysotskiy, T.A. Velivetskaya, A.S. Biakov, R.V. Kutygin, A.M. Popov, A.V. Ignatiev, I.V. Brynko, I.L. Vedernikov

A Proposed Set of Causes for the Relative Synchronity of Mass Extinction Events of Terrestrial and Marine Biota at the End of the Permian

В.В. Иванов, М.В. Иванов, А.И. Ханчук, О.Н. Кеня, А.П. Кириенко, Л.Г. Колесова, А.В. Поселюжная 215

Аутигенные минералы золота в поверхностных донных осадках Чукотского шельфа и прилегающей части Северного Ледовитого океана

V.V. Ivanov, M.V. Ivanov, A.I. Khanchuk, O.N. Kenya, A.P. Kirienko, L.G. Kolesova, A.V. Poselyuzhnaya

Autigenic gold minerals in surface bottom sediments Chukchi Shelf and adjacent part of the Arctic Ocean

В.В. Ивина, В.В. Ивин, И.А. Александров, С.Ю. Будницкий, Е.И. Медведев 221

U-Pb возраст детритовых цирконов и литохимические особенности вмещающих пород редкометалльного месторождения Соболиха (Приморье)

V.V. Ivina, V.V. Ivin, A.I. Alexandrov, S.Yu. Budnitskiy, E.I. Medvedev

U-Pb age of detrital zircons and lithochemical features of host rocks of the Sobolikha rare metal deposit (Primorye)

А.И. Малиновский 225

Монгугайская свита Юго-Западного Приморья: литология, обстановки формирования

A.I. Malinovsky

Mongugai formation of South-Western Primorye: lithology, formation settings

Ю.А. Микишин, И.Г. Гвоздева, Т.И. Петренко 232

Стратиграфия и палеогеография среднего Сахалина в позднеледниковье–голоцене

Yu.A. Mikishin, I.G. Gvozdeva, T.I. Petrenko

Stratigraphy and paleogeography middle part of Sakhalin in the Late Glacial Period to Holocene

З.Л. Мотова, Т.В. Донская, Д.П. Гладкочуб, А.Г. Вахромеев 237

Состав и условия накопления неопротерозойских терригенных пород Ангаро-Ленского района юга Сибирской платформы

Z.L. Motova, T.V. Donskaya, D.P. Gladkochub, A.G. Vakhromeev

Composition and accumulation conditions of Neoproterozoic terrigenous rocks of the Angara-Lena region of the southern Siberian platform

В.А. Пеллинен, А.А. Светлаков 242

Осадочные отложения в структурно-тектонической зоне Восточного Саяна: на примере долины реки Сенца

V.A. Pellinen, A.A. Svetlakov

Sedimentary deposits in the structural-tectonic zone of the Eastern Sayan: A case study of the Sentsa river valley

Е.А. Элбакидзе 246

Колебания уровня Японского моря в голоцене по данным диатомового анализа

E.A. Elbakidze

Fluctuations in the level of the Sea of Japan in Holocene according to diatom analysis

МЕТАЛЛОГЕНИЯ И УСЛОВИЯ ПРОЯВЛЕНИЯ РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ ВРАЗЛИЧНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ

METALLOGENY AND CONDITIONS FOR ORE-FORMING SYSTEMS INITIATION IN DIFFERENT GEODYNAMIC SETTINGS

В.И. Алексеев 252

Цвиттер-турмалинитовый метасоматический комплекс, связанный с литий-фтористыми гранитами Северного массива (Чукотка)

V.I. Alekseev

Zwitter-tourmalinite metasomatic complex associated with lithium-fluoric granites of the Severnyi massif (Chukotka)

Е.Е. Амплиева, Е.В. Ковальчук, В.Б. Комаров, В.Д. Абрамова 256

Подольское колчеданное месторождение (Южный Урал): особенности распределения стратегических металлов в рудах и в отдельных рудных минералах

E.E. Amplieva, E.V. Kovalchuk, V.B. Komarov, V.D. Abramova
The PodolskoeVMS deposit (Southern Urals): distribution of strategic metals in sulphide ores and sulphides

Е.В. Баданина, Л.Ф. Сырицо, А.Ю Кухта 260

Геохимические особенности циркона рудоносных лейкогранит-аляскитовых ассоциаций пород редкометалльных провинций фанерозоя и его петрогенетическое значение (на примере Центрального и Восточного Забайкалья)

E.V. Badanina, L.F. Syritso, A.Yu. Kukhta
Geochemical features of zircon of ore-bearing leucogranite-alaskite associations of rocks of rare-metal provinces of the Phanerozoic and its petrogenetic significance (on the example of Central and Eastern Transbaikalia)

Р.В. Бадридинов, В.Е. Кириллов 265

Медно-порфировое оруденение Тырского рудного поля (Хабаровский край, Россия)

R.V. Badridinov, V.E. Kirillov
Copper-porphyry mineralization of the Tyrskoe ore field (Khabarovsk territory, Russia)

В.Н. Бахтина, А.А. Гребенникова, К.Н. Доброшевский 270

Текстурно-структурные особенности рудной минерализации — значение для генезиса и технологии извлечения на примере Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь)

V.N. Bakhtina, A.A. Grebennikova, K.N. Dobroshevsky
Textural and structural features of ore mineralization — significance for genesis and extraction technology on the example of Malinovskoye deposit (South Sikhote-Alin)

А.У. Бойко, Е.Д. Скильская, К.О. Шишканова, А.В. Сергеева 274

Минеральные парагенезисы в рудах Асачинского месторождения

A.U.Boiko, E.D.Skilskaya, K.O. Shishkanova, A.V. Sergeeva
Mineral parageneses in ores of the Asachiskoe deposit

С.В. Высоцкий, Т.А. Веливецкая, А.В. Игнатьев, В.В. Яковенко, Ю.Д. Захаров, А.С. Бяков, И.В. Брынько, И.Л. Ведерников, Р.В. Кутыгин 277

Ослабление озоновой защиты Земли на границе перми и триаса по данным изотопного анализа серы из аутигенных сульфидов Сибири

S.V. Vysotskiy, T.A. Velivetskaya, A.V. Ignatyev, V.V. Yakovenko, Yu.D. Zakharov, A.S. Biakov, I.V. Brynko, I.L. Vedernikov, R.V. Kutygin
Weakening of the Earth's ozone protection at the Permian-Triassic boundary according to isotopic analysis of sulfur from authigenic sulfides of Siberia

Б.Б. Герасимов, Л.А. Кондратьева 282

Золото-теллуридная минерализация Хаптасыннахской рудной зоны Анабарского щита

B.B. Gerasimov, L.A. Kondratyeva
Gold-Tellurid mineralization of the Khaptasynnakh Ore zone of theAnabar Shield

В.С. Гриненко, В.В. Баранов, Т.И. Васильева 287

Восточно-Сибирская рудоносная провинция нелинейной комплексной минерагении в венде-палеозое, в зоне сочленения Атлантического и Тихоокеанского сегментов Земли

V.S. Grinenko, V.V. Baranov, T.Ig. Vasileva
East Siberian ore-bearing province of nonlinear complex minerageny in the Vendian-Paleozoic, in the junction zone of the Atlantic and Pacific segments of the Earth

Г.З. Гильманова, М.Ю. Носырев, А.Н. Диденко 290

Использование цифровой модели рельефа при изучении золотоносносных площадей, перекрытых базальтами северной части Западно–Сихотэ-Алинской металлогенической зоны

G.Z. Gilmanova, M.Yu. Nosyrev, A.N. Didenko
A digital elevation model in studying gold-bearing areas covered by basalts in the northern part of the West Sikhote-Alin metallogenic zone.

А.А. Гребенникова, К.Н. Доброшевский, В.Н. Бахтина, Н.А. Горячев 295

Новые данные по золоторудному месторождению Глухое (Центральный Сихотэ-Алинь)

A.A.Grebennikova, K.N. Dobroshevsky, V.N. Bakhtina, N.A. Goryachev
New data on the Glukhoe gold deposit (Central Sikhote-Alin)

С.И. Иванников, В.В. Иванов, Н.С. Маркин, Л.А. Земскова, И.С. Окунев 300

Металлоносность раннепалеозойских черных сланцев Прибалтийского палеобассейна: анализ методом ИНАА с радионуклидным источником нейтронов

S.I. Ivannikov, V.V. Ivanov, N.S. Markin, L.A. Zemskova, I.S. Okunev
Metalliferous content of Early Paleozoic black shales of the Baltic paleobasin: INAA analysis with a radionuclide neutron source

Е.В. Ковальчук, Б.Р. Тагиров, М.С. Никольский, С.Е. Борисовский, В.Б. Комаров, И.В. Викентьев 305

Особенности распределения Au и As в пирите Воронцовского месторождения (Северный Урал, тип Карлин)

E.V. Kovalchuk, B.R. Tagirov, M.S. Nickolsky, S.E. Borisovsky, V.B. Komarov, I.V. Vikentyev
Features of Au and As distribution in pyrite of the Vorontsovka deposit (North Urals, type Carlin)

М.И. Копылов, Д.Г. Федосеев 309

Особенности геологического строения Центрально-Сихотэ-Алинской минерагенической зоны и перспективы поисков вольфрамовых месторождений

M.I. Kopylov, D.G. Fedoseev
Geological features of the central Sikhote-Alin metallogenic zone and tungsten exploration prospects

В.О. Крутикова, Н.В. Бердников, П.К. Кепежинскас 314

Микроминералы как дополнительные свидетельства металлогенической специализации и рудообразующего потенциала изверженных пород

V.O. Krutikova, N.V. Berdnikov, P.K. Kepezhinskas
Microminerals as complimentary guides into metallogeny and ore-forming potential of igneous rocks

М.В. Кудрин, В.Ю. Фридовский, Л.И. Полуфунтикова, Г.С. Анисимова, Я.А. Тарасов 318

Золотое оруденение в дайках поперечных рядов Кулар-Нерского террейна (Яно-Колымский пояс): структурно-тектонические, минералого-геохимические и изотопные характеристики

M.V. Kudrin, V.Yu. Fridovsky, L.I. Polufuntikova, G.S. Anisimova, Ya.A. Tarasov
Gold mineralization in dikes of transverse series of the Kular-Nera terrane (Yana-Kolyma belt): structural-tectonic, mineralogical-geochemical and isotopic characteristics

О.Н. Кузьмина, А.Д. Сенько, М.А. Мизерная, Т.А. Ойцева 322

Редкометалльная минерализация Нарымского рудного района (юго-восточная Калба)

O.N. Kuzmina, A.D. Sen'ko, M.A. Mizernaya, T.A. Oitseva
Rare metal mineralization of the Narym ore district (south-eastern Kalba)

П.Л. Неволин, А.Н. Митрохин, В.В. Иванов 327

Благодатненский и Вангинский золоторудные узлы, пример влияния складчатости на контроль оруденения в Приморье

P.L. Nevolin, A.N. Mitrokhin, B.V. Ivanov
Blagodatnensky and Wanginsky gold ore nodes, an example of the influence of folding on the control of mining in Primorye

М.Э. Николайчук, С.А. Касаткин 331

Структурный контроль коренной благороднометалльной минерализации Херпучи-Ваюнского рудно-россыпного района (Хабаровский край)

M.E. Nikolaychuk, S.A. Kasatkin

Structural control of the noble-metal mineralization in the Kherpuchi-Vayun gold placer district Khabarovsk region)

М.А. Петрова, Е.О. Шапаренко, Н.А. Гибшер, А.А. Томиленко 335

Возраст формирования золоторудных объектов Аяхтинского рудного поля, Енисейский кряж

M.A. Petrova, E.O. Shaparenko, N.A. Gibsher, A.A. Tomilenko

Age of gold ore formation at the Ayakhta ore field, Yenisei Ridge

Н.В. Потапова, П.К. Кепежинскас, Н.В. Бердников 339

Микровключения рудных минералов в четвертичных лавах Камчатки и их металлогеническое значение

N.V. Potapova, P.K. Kepezhinskas, N.V. Berdnikov

Microinclusions of ore minerals in Quaternary lavas from Kamchatka and their metallogenic significance

Е.А. Савина, И.С. Перетяжко, И.А. Пуляева 345

Кобальтоносные Fe-Mn корки на миоценовых породах "petit-spot" вулканов гайота Альба: особенности состава, строения и биостратиграфии известкового нанопланктона

E.A. Savina, I.S. Peretyazhko, I.A. Pulyaeva

Cobalt-rich Fe-Mn crusts on Miocene rocks of the Alba Guyot petit-spot volcanoes: features of the composition, structure and biostratigraphy of calcareous nanofossils

П.П. Сафронов, Н.В. Моисеенко 350

Благороднометалльная минерализация в золоторудном месторождении Пионер (Приамурье)

P.P. Safronov, N.V. Moiseenko

Precious metal mineralization in the Pioneer gold deposit (Amur Region)

Е.Д. Скильская, К.О. Шишканова, А.У. Бойко, А.В. Сергеева 354

Сравнительная характеристика блеклых руд золото-серебряных месторождений Южно-Камчатского горнорудного района

E.D. Skilskaya, K.O. Shishkanova, A.U. Boiko, A.V. Sergeeva

Comparative characteristics of tennantite-tetrahedrite group minerals in gold-silver mineralization in the South Kamchatka mining region

В.Ю. Соловьев, В.В. Прийменко, Е.В. Старикова, А.М. Гагиева, Д.А. Рогов, А.Л. Коновалов, Т.Н. Сурин, А.В. Черкашин, А.И. Голубев 357

Геологическое строение, вещественный состав, возраст и перспективы молибденового месторождения Орлиное Коркодон-Наяханской рудоносной зоны (Северо-Восток Азии)

V.Yu. Soloviev, V.V. Priymenko, E.V. Starikova, A.M. Gagieva, D.A. Rogov, A.L. Konovalov, T.N. Surin, A.V. Cherkashin, A.I. Golubev

Geological structure, material composition, age and prospects of the Orlinoye molybdenum deposit of the Korkodon-Nayahan ore-bearing zone (Northeast Asia)

О.Т. Соцкая, В.Ю. Соловьёв, Н.А. Горячев 362

Минералы — индикаторы происхождения руд Албазинского месторождения

O.T. Sotskaya, V.Y. Solov'ev, N.A. Goryachev

Indicator minerals of the origin of ores of the Albazinskoe deposit

Я.А. Тарасов, В.Ю. Фридовский, Л.И. Полуфунтикова, М.В. Кудрин 367

Минералогия полихронного золоторудного месторождения Маринское (Южное Верхоянье)

Ya.A. Tarasov, V.Yu. Fridovsky, L.I. Polufuntikova, M.V. Kudrin
Mineralogy of the Marinskoyepolychronous gold deposit (Southern Verkhoyansk)

С.А. Устинов, И.С. Тубольцев, В.А. Петров, В.А. Минаев 371

Реконструкция этапов формирования каркаса разрывных нарушений Стрельцовского рудного поля на основе тектонофизического подхода для выявления структурных характеристик локализации урановых руд и прогноза перспективных участков

S.A. Ustinov, I.S. Tuboltsev, V.A. Petrov, V.A. Minaev
Reconstruction of the stages of formation of the framework of faults of the Streltsovsky ore field based on the tectonophysical approach to identify the structural characteristics of the localization of uranium ores and forecast promising areas

А.И. Ханчук, В.П. Молчанов, А.Н. Голич, Д.В. Андросов 376

Графит и редкоземельные минералы пикритов Ариадненского массива ультрабазит-базитов (Приморье)

A.I. Khanchuk, V.P. Molchanov, A.N. Golich, D.V. Androsov
Graphite and rare earth minerals of picrites of the Ariadne ultrabasite-basite massif (Primorye)

Б.И. Челнокова, И.В. Брагин, А.А. Павлов 381

Минеральные воды Приморского края: современное состояние и перспективы научно-практического использования

B.I. Chelnokova, I.V. Bragin, A.A. Pavlov
Mineral waters of Primorsky Krai: current state and prospects of scientific and practical use

А.И. Черных 386

Металлогения золота палеозон субдукции и коллизии Алтае-Саянской складчатой области

A.I. Chernykh
Metallogeny of gold of paleozones of subduction and collision of the Altai-Sayan folded belt

С.Л. Шевырев, Н.Г. Борискина 391

Программное обеспечение GeoNEM — численное моделирование для прогноза благороднометалльных ресурсов: разработка и опыт использования

S.L. Shevyrev, N.G. Boriskina
GeoNEM software for numeric modeling for mineral prospectivity of precious metals: development and user experience

А.Ю. Юрчук, Ю.В. Юрчук 396

Петромагнитная характеристика скарново-шеелитового месторождения Восток-2

A.Yu. Yurchuk, Yu.V. Yurchuk
Petromagnetic characteristics of the skarn-scheelite deposit Vostok-2

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ 401

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

PLENARY SESSION

CU-ПОРФИРОВЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ТИХООКЕАНСКОГО ПОЯСА В ПОСЛЕДНИЕ 125 МИЛЛИОНОВ ЛЕТ

А.Н. Диденко[1,2], М.Ю. Носырев[2], Г.З. Гильманова[2]

[1]Геологический институт РАН, г. Москва

[2]Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск

Аннотация. Статистический анализ количества и общего объема руды Cu-порфировых месторождений Тихоокеанского пояса, образовавшихся в послеаптское время, показал наличие циклического компонента с периодом 26-28 млн лет, доля которого в общей амплитуде равна 74%. Установлена обратная корреляция между глобальной скоростью спрединга, с одной стороны, и количеством Cu-порфировых месторождений Тихоокеанского пояса и их продуктивности, с другой, для последних 125 млн лет. Относительные минимумы скорости спрединга предваряют относительные максимумы количества и общей массы Cu-порфировых месторождений Тихоокеанского пояса и отстоят от соседнего пика в 5-10 млн лет.

Во время образования крупных и гигантских Cu-порфировых месторождений Тихоокеанского пояса увеличивается скорость изменения угла конвергенции в горизонтальной плоскости в зоне взаимодействия двух тектонических плит. При этом, абсолютная скорость конвергенции может как уменьшаться, так и увеличиваться. Согласно геолого-структурным и кинематическим данным, магматизм, в результате которого сформировались 8 крупных и гигантских Cu-порфировых месторождений, сопровождался сквозькоровыми дизъюнктивными нарушениями, связанными либо со сменой фронтальной конвергенции «косой», либо переходом в режим трансформной континентальной окраины, либо с реверсивным изменением направления субдукции при коллизиях островная дуга-континент, островная дуга-океаническое плато.

CU-PORPHYRY DEPOSITS OF THE PACIFIC BELT IN THE LAST 125 MILLION YEARS

A.N. Didenko[1,2], M.Y. Nosyrev[2], G.Z. Gilmanova[2]

[1]Geological Institute RAS, Moscow

[2]Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk

Abstract. Statistical analysis of the number and total volume of ore in post-Aptian Cu-porphyry deposits of the Pacific Belt revealed a cyclic component with a period of 26–28 million years, accounting for 74% of the total amplitude. An

inverse correlation was established between the global spreading rate, on the one hand, and the number and productivity of Cu-porphyry deposits in the Pacific Belt, on the other, over the last 125 million years. Relative minima in the spreading rate precede relative maxima in the number and total mass of Cu-porphyry deposits in the Pacific Belt, lagging 5–10 million years behind adjacent peaks.

During the formation of large and giant Cu-porphyry deposits in the Pacific Belt, the rate of change in the angle of horizontal-plane convergence increases in the interaction zone of two tectonic plates. At the same time, the absolute convergence rate may either decrease or increase. According to geological-structural and kinematic data, the magmatism that formed 8 large and giant Cu-porphyry deposits was accompanied by transcrustal disjunctive faults. These were associated with either: 1) a shift from frontal to oblique convergence, 2) a transition to a transform continental margin regime, 3) a reversal in subduction direction during island arc-continent or island arc-oceanic plateau collisions.

Построение реконструкций и расчет кинематических параметров проводился в программном комплексе GPlates [2]. Анализ взаимодействующих плит позволяет заключить, что образование восьми крупных и гигантских Cu-порфировых месторождений Тихоокеанского пояса происходило во время крупных тектонических событий на границе океанических и континентальных плит – коллизий островных дуг с континентальными плитами, погружением океанических плато и хребтов под континентальные плиты, сменой направления субдукции. Следует отметить также еще один важный вывод — существенное увеличение мощности земной коры регионов с Cu-порфировыми месторождениями, которое происходило как за счет коллизии островных дуг и погружения океанических плато и хребтов, так и плоской субдукции. Последняя геодинамическая обстановка свойственна только западному побережью Северной и Южной Америк в послемеловое время.

При анализе временных рядов количества и объема Cu-порфировых месторождений Тихоокеанского пояса в интервале 125-0 млн лет был выявлен (квази)циклический компонент с периодичностью 26-29 млн лет, доля которого в общей амплитуде сглаженного ряда составляет 75%. Практически аналогичные по длительности периодичности в мезо-кайнозое выявлены для временных рядов значительного количества глобальных характеристик: 1) эпизодов вымирания как морских — 26 млн лет [6 и др.], так и неморских — 27.5 млн лет [4] организмов; 2) глобальных геологических событий, включающих вымирание организмов, океанические аноксические события, проявления плюмового магматизма, изменения уровня океана, реорганизацию миграции тектонических плит и др. — 26.9 млн лет [5]; 3) скорости спрединга — 27.3 млн лет [1,3].

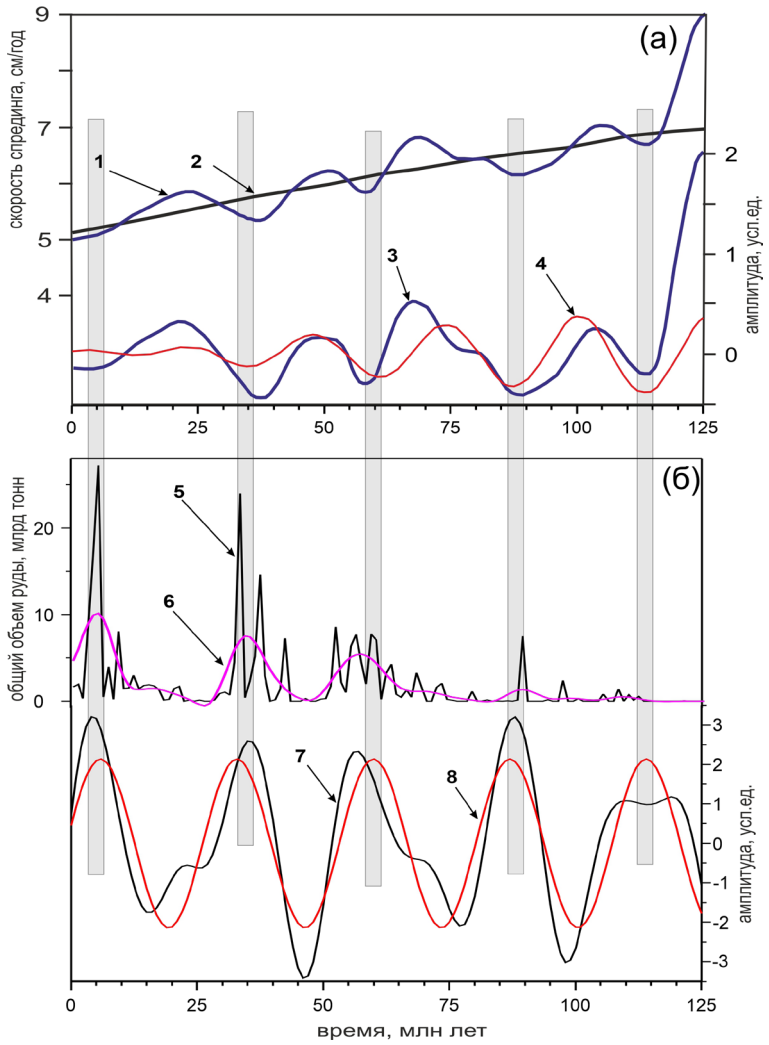


Рисунок 1. Сопоставление моделей (а) скорости спрединга [1,3] и (б) общего объема руды Cu-порфировых месторождений Тихоокеанского пояса.

Номера временных зависимостей на (а): 1, 2 — скорость спрединга СОХ по [3] и ее тренд, рассчитанный путем сглаживания исходных значений, по [1], соответственно; 3, 4 — модельный реконструированный временной ряд скорости спрединга после удаления тренда и наибольшая по амплитуде гармоника модельного ряда по [1], соответственно.

Номера временных зависимостей на (б): 5, 6 — исходный ряд общего объема руды и сглаженный фильтром Савицкого-Голая (наст. работа), соответственно; 7, 8 — модельный реконструированный временной ряд общего объема руды и наибольшая по амплитуде гармоника модельного ряда по (наст. работа), соответственно.

Figure 1. Comparison of the models of (a) spreading rate [1,3] and (b) total ore volume of Cu-porphyry deposits of the Pacific belt.

Numbers denote temporal dependencies in (a) as follows: 1, 2 – spreading rate of MOR, and [3] its trend calculated by smoothing the initial values, relative to [1], respectively; 3, 4 – model reconstructed time series of spreading rate after trend removal and the harmonic with the highest amplitude in model series relative to [1], respectively. Numbers denote temporal dependencies in (b) as follows: 5, 6 – initial values of the total ore volume and values smoothed using the Savitzky–Golay filter (present paper), respectively; 7, 8 – model reconstructed time series of the total ore volume and the harmonic with the highest amplitude in model series according to (present paper), respectively.

Обнаружение во временной зависимости общего объема руды Cu-порфировых месторождений Тихоокеанского пояса периодического компонента, идентичного по длительности одному из компонентов на временной зависимости скорости спрединга, побудило нас провести более детальное сопоставление этих характеристик. В верхней части на рис.

1а представлены исходный временной ряд скорости спрединга [3] и его генеральный тренд [1] в интервале 0-125 млн лет. В нижней части рисунка 1а представлены временной ряд скорости спрединга после удаления тренда (линия 3) и модельный ряд его наибольшей гармоники (линия 4), значение частоты которой 0.038±0.006. На рис. 1б в верхней части представлены исходный ряд общего объема руды (линия 5) и сглаженный фильтром Савицкого-Голая (линия 6). В нижней части представлены модельный реконструированный временной ряд общего объема руды (линия 6) и его наибольшая по амплитуде гармоника (линия 8), значение частоты которой 0.038±0.001. Сопоставление представленных выше графиков показало корреляцию для пяти экстремумов на каждой из этих зависимостей; относительным максимумам на кривой № 8 соответствуют относительные минимумы на кривой № 4. Отчетливо видно, что относительные минимумы на временной зависимости скорости спрединга немного опережают относительные максимумы на временной зависимости общего объема руды.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00023-П (https://rscf.ru/project/22-17-00023/). Базовое финансирование за счет субсидий на выполнение государственных заданий ГИН РАН (тема № FMMG-2023-0010) и ИТиГ ДВО РАН (темы НИР № 121021000095-1, № 121021000094-4).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Boulila S., Haq B.U., Hara N., Müller R.D., Galbrun B., Charbonnier G.** Potential encoding of coupling between Milankovitch forcing and Earth's interior processes in the Phanerozoic eustatic sea-level record // Earth-Science Reviews. 2021. V. 220. P. 103727(1-50). https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103727.

2. **GPlates software.** 2022. https://www.gplates.org.

3. **Müller R.D., Zahirovic S., Williams S.E., Cannon J., Seton M., Bower D.J., Tetley M.G., Heine C., Le Breton E., Liu S., Russell S.H.J., Yang T., Leonard J., Gurnis M.** A global plate model including lithospheric deformation along major rifts and orogens since the Triassic // Tectonics. 2019. V. 38 N 6. P. 1884-1907. https://doi.org/10.1029/2018TC005462.

4. **Rampino M.R., Caldeira K., Zhu Y.** A 27.5-My underlying periodicity detected in extinction episodes of non-marine tetrapods // Historical Biology. 2021. V. 33. N 11. P. 84-3090. https://doi.org/10.1080/08912963.2020.1849178.

5. **Rampino M.R., Caldeira K., Zhu Y.** A pulse of the Earth: A 27.5-Myr underlying cycle in coordinated geological events over the last 260 Myr // Geoscience Frontiers. 2021. V. 12. Iss. 6. P. 101245. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101245.

6. **Raup D.M., Sepkoski J.J.** Periodicity of extinctions in the geologic past // Proceedings of the National Academy of Sciences. 1984. V. 81. N 3. P. 801–805. https://doi.org/10.1073/pnas.81.3.801.

ИСТОЧНИКИ И МЕХАНИЗМЫ ОБРАЗОВАНИЯ А-ГРАНИТОВ В ФАНЕРОЗОЙСКИХ СКЛАДЧАТЫХ ОБЛАСТЯХ

Н.Н. Крук

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: kruk@igm.nsc.ru

Аннотация. В работе приведены данные о пространственно-временном распределении гранитоидов разных геохимических типов (включая А-граниты) в фанерозойских магматических поясах разной природы. На основе анализа этих данных и обсуждения имеющихся моделей происхождения А-гранитов показано, что ряд гранитоидов с геохимическими характеристиками А-типа не являются производными глубинных магм или результатами мантийно-корового взаимодействия, их образование наилучшим образом объясняется с позиций флюидного синтексиса.

SOURCES AND MECHANISMS OF FORMATION OF A-GRANITES IN PHANEROZOIC FOLDED REGIONS

N.N. Kruk

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of SB RAS, Novosibirsk, e-mail: kruk@igm.nsc.ru

Abstract. The paper presents data on the spatiotemporal distribution of granitoids of different geochemical types (including A-granites) in Phanerozoic magmatic belts of different nature. Based on the analysis of these data and discussion of the available models of the origin of A-granites, it is shown that a some of granitoids with A-type geochemical features are not derivatives of deep magmas or results of mantle-crust interaction; their formation is best explained from the standpoint of fluid synthesis.

Гранитоиды А-типа являются наиболее сложными с генетической точки зрения кремнекислыми магматическими породами. В отличие от других разновидностей гранитоидов, коровая природа которых уже не вызывает сомнений, расплавы, соответствующие типичным А-гранитам, не были получены ни в одном из экспериментов по плавлению пород коры, независимо от состава стартового материала и условий эксперимента. Это заставило исследователей предлагать для объяснения их происхождения более сложные модели.

Изначально А-граниты были выделены М. Луазелем и Д. Уонсом [6] как анарогенные (anarogenic), щелочные (alkaline) и безводные (anhydrous) породы. Их вещественный состав характеризуется высокой железистостью, низкими

содержаниями Ca, обогащением F и, часто, Cl, повышенными концентрациями высокозарядных и редкоземельных элементов (а в некоторых случаях – и крупноионных литофильных элементов). Эти особенности состава легли в основу ряда диаграмм, предназначенных для дискриминации А-гранитов.

Впоследствии термин «А-граниты» оказался «размыт», и к этому типу пород стали относить не только внутриплитные гранитоиды, но и кремнекислые породы других геодинамических режимов, попадающие в поля А-гранитов на диаграммах.

Внутриплитная позиция «типичных» А-гранитов указывала на их связь с мантийными плюмами. Ряд исследователей [4, 6 и др.] считали их производными щелочно-базитовых магм. Позже были предложены альтернативные модели формирования А-гранитов, либо за счет смешения мантийных расплавов с коровыми выплавками, либо при плавлении различных пород нижней коры, в том числе – под воздействием флюида мантийных магм. При этом в большинстве моделей повышенная щелочность и обогащение несовместимыми компонентами полагались следствием участия в гранитогенезе мантийного материала, поскольку обоснованные модели избирательной «экстракции» из пород коры щелочей и несовместимых элементов до последнего времени предложены не были.

Исторически основной объем данных по гранитам А-типа был получен при изучении магматических ассоциаций континентальных рифтов и крупных изверженных провинций, локализованных на древних платформах. В то же время, в результате систематического изучения гранитоидов крупных складчатых поясов были получены данные, позволяющие существенно дополнить имеющиеся представления о природе и генезисе А-гранитов.

Железистые гранитоиды, по геохимическим характеристикам соответствующие породам А-типа в складчатых поясах, проявлены не только во внутриплитных и постколлизионных обстановках. Они также присутствуют в окраинно-континентальных поясах, причем главные рубежи их проявления синхронизированы с эпизодами трансформно-сдвигового тектогенеза. При этом, объемы гранитоидов обычно резко превышают объемы синхронных мантийных пород. Кроме того, для этих структур характерно значительно большее разнообразие геохимических типов гранитоидного магматизма: «типичные» щелочные граниты А1-типа здесь редки, либо полностью отсутствуют, а наиболее распространенными являются умеренно-щелочные гранитоиды, либо известково-щелочные и высокоглиноземистые гранитоиды, обладающие лишь слабыми геохимическими признаками пород А-типа, либо, иногда, не имеющие их вовсе. Также характерно спорадическое присутствие в составе магматических ассоциаций редкометалльно-гранитных интрузий, продуктивных на W, Sn или Mo, Li и Ta.

Анализ распространения разных геохимических типов гранитоидов (включая породы А-типа) в пределах магматических поясов в пространстве

и во времени позволил выделить, как минимум, три сценария развития гранитоидного магматизма.

В первом случае проявления гранитоидного магматизма «растянуты» во времени на 30 млн лет и более. При этом, ранние его стадии представлены кварцевыми диоритами, гранодиоритами и гранитами I- и S- типов (в зависимости от состава коры вмещающих блоков), которые со временем сменяются гранит-лейкогранитными (иногда с участием более основных пород) ассоциациями, породы которых несут геохимические черты А-гранитов, а изотопные характеристики указывают на участие в гранитообразовании мантийного компонента. Подобный сценарий эволюции гранитоидного магматизма типичен для постколлизионных режимов, либо для обстановок, когда внутриплитная магматическая активность накладывается на молодую коллизионную зону. Примером этого типа является Ангаро-Витимский батолит, формирование которого было синхронно с активностью Таримской LIP [3 и др.]. Резкая смена типа гранитоидного магматизма во времени заставила исследователей, детально изучавших эти объекты, предполагать связь ранних «коровых» гранитоидов с коллизионными процессами, а поздних, «корово-мантийных» — с плюмовой активностью. Возможно, к этому же типу относится Калба-Нарымский гранитоидный батолит в Восточном Казахстане.

Второй сценарий предполагает субсинхронное формирование в относительно короткий промежуток времени (не более 10 млн лет) широкого спектра геохимических типов гранитоидов (от умереннокалиевых гранодиоритов и гранитов I-типа и высококалиевых IS-типа до гранит-лейкогранитов А2-типа) как в виде самостоятельных интрузий, так и в составе габбро-гранитных серий. При этом, в сериях повышенной щелочности гранитоиды наследуют геохимические характеристики ассоциирующих габброидов, а состав и изотопные характеристики пород I- и IS-типов полностью контролируются составом вмещающих коровых блоков. Отличительной чертой этого сценария является отсутствие промежуточных разностей, свидетельствующее об отсутствии смешения гранитоидных магм разных геохимических типов. Примером такого сценария является раннедевонский (400-410 млн лет) магматизм западной части Алтае-Саянской складчатой области, обусловленный активностью Алтае-Саянской LIP [2 и др.].

Наконец, третий сценарий выражается в субсинхронном (как и в предыдущем случае) формировании широкого спектра габбро-гранитных и гранитоидных ассоциаций, породы которых в разной мере несут геохимические метки А-гранитов. В отличие от предыдущего случая уверенное отнесение гранитоидных ассоциаций к тому или иному геохимическому типу здесь часто затруднено, а унаследованность геохимических характеристик гранитоидов от предшествующих габброидов выражена менее ярко. В составе магматических ареалов также присутствуют интрузии редкометалльных гранит-лейкогранитов и тела пегматитов, несущие редкометалльную минерализацию.

Примерами этого типа являются позднедевонские гранитоиды Горного Алтая, сформированные в трансформной обстановке [2 и др.], а также позднепермские – раннетриасовые (250-240 млн лет) гранитоиды Алтая и Восточного Казахстана, связанные с активностью Сибирской LIP [1 и др.].

Описанные схемы развития магматизма и наблюдаемые сочетания геохимических типов гранитоидов не могут быть полностью объяснены с применением механизмов, упомянутых в начале данной работы (дифференциация мантийных магм, их смешение с анатектическими выплавками, нижнекоровый анатексис под действием тепла и флюида мантийных магм). В частности, не находит логичного объяснения формирование на заключительных стадиях эволюции LIP интрузий редкометалльных рудоносных гранитоидов.

Для объяснения формирования редкометалльных магм французскими учеными М. Кани и П. Барби [5] была предложена модель плавления пород средней и верхней коры под воздействием высокофтористого флюида, обогащенного литофильными редкими и рудными элементами. Возникновение такого флюида связывалось с дегазацией пород нижней коры при их гранулитовом метаморфизме под воздействием тепла кристаллизующихся в основании коры очагов базитовых магм. Мы полагаем, что в целом эта модель имеет более универсальный характер. При ее реализации формирование редкометалльных гранитоидов возможно лишь в случаях, когда в основании коры присутствуют блоки достаточно «зрелых» в геохимическом отношении метаосадочных пород, не претерпевших предварительно метаморфизма выше эпидот-амфиболитовой фации (т.е. сохранивших в значительных количествах воду и легкоподвижные редкие элементы). В других случаях объем выделяющегося флюида будет существенно меньше, а его геохимическая «нагрузка» будет существенно меняться, что приведет к образованию магм, несущих геохимические характеристики А-типа.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ИГМ СО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Владимиров А.Г., Пономарева А.П., Шокальский С.П. и др.** Позднепалеозойский - раннемезозойский гранитоидный магматизм Алтая // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 4. С. 715-729.

2. **Крук Н.Н.** Континентальная кора Горного Алтая: этапы формирования и эволюции, индикаторная роль гранитоидов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 8. С. 1403-1423.

3. **Ярмолюк В.В., Коваленко В.И.** Глубинная геодинамика, мантийные плюмы и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Петрология. 2003. Т. 11. № 6. С. 556-586.

4. **Bonin B.** A-type granites and related rocks: evolution of a concept, problems and prospects // Lithos. 2007. V. 97. Iss. 1-2. P. 1–29.

5. **Cuney M., Barbey P.** Uranium, rare metals, and granulite-facies metamorphism // Geoscience Frontiers. 2014. V. 5. N 5. P. 729 – 745.

6. **Loiselle M.C., Wones D.R.** Characteristics and origin of anarogenic granites // Geol. Soc. Am. Abst. Prog. 1979. V. 11. P. 468.

ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКИЙ ВУЛКАНИЗМ СЕВЕРНОЙ МОНГОЛИИ – ТИПИЗАЦИЯ И МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД, ИСТОЧНИКИ И УСЛОВИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЩЕЛОЧНО-БАЗАЛЬТОВЫХ МАГМ ВО ВНУТРИКОНТИНЕНТАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКЕ

А.Б. Перепелов, С.С. Цыпукова, Ю.Д. Щербаков, А.П. Жгилев

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск,
e-mail: alper@igc.irk.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования позднекайнозойского вулканизма Северной Монголии, включая типизацию, минералого-геохимические особенности пород, а также источники и условия формирования щелочно-базальтовых магм. Вулканизм представлен несколькими крупными ареалами возрастом ~29±4 млн лет, характеризующимися преимущественно трещинными извержениями. В породах доминируют трахибазальты и трахиандезибазальты с Ol±Cpx, а также андезиты, базаниты и фонотефриты. Анализ указывает на формирование магм из обогащенного EMI-источника мантии, подвергшегося метасоматическому воздействию восходящих плюмов из переходной зоны. Породы характеризуются субщелочным и щелочным составом с низкими степенями плавления Grt-содержащих пироксенитов. Активизация вулканизма связывается с глобальными геодинамическими событиями Центральной Азии, включая влияние Индо-Азиатского столкновения и смену движения литосферных плит. Важной особенностью является широкое присутствие карбонатного вещества в вулканических породах и ксенолитах.

LATE CENOZOIC VOLCANISM IN NORTHERN MONGOLIA: CLASSIFICATION AND MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF ROCKS, SOURCES AND CONDITIONS OF ALKALINE BASALTIC MAGMA FORMATION IN AN INTRACONTINENTAL GEODYNAMIC SETTING

A.B. Perepelov, S.S. Tsypukova, Yu.D. Scherbakov, A.P. Zhgilev

A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk,
e-mail: alper@igc.irk.ru

Abstract. This paper presents the results of studying late Cenozoic volcanism in northern Mongolia, including the classification and mineralogical and geochemical characteristics of rocks, as well as sources and conditions of alkaline basaltic magma formation. Several large volcanic areas, dated at ~29±4 Ma, are located

in the region and are mostly covered by fissure eruptions. The dominant rock types are trachybasalt and basaltic trachyandesite containing Ol±Cpx and also andesite, basanite, and phonotephrite. The rock analysis showed that magmas formed from the enriched mantle I source (EMI) under metasomatic influence of plumes ascending from the transition zone. The rocks are subalkaline and alkaline in composition with the Grt-bearing pyroxenite having low melting point. Renewal of volcanic activity is thought to be related to global geodynamic events in Central Asia, including the influence of India-Asia collision and change in lithospheric plates motion direction. Of great importance is the wide presence of carbonates in volcanic rocks and xenoliths.

Позднекайнозойский вулканизм в Северной Монголии представлен несколькими разномасштабными ареалами развития (рис. 1). Наиболее крупный из них Хубсугульский, который расположен на восточном фланге рифтогенной впадины оз. Хубсугул. К западу от оз. Хубсугул проявления вулканической активности рассеяны. Часть из них расположены на северо-западном и северном фланге Дархатской впадины и объединяются в Дархатский вулканический ареал. На юго-западе и юге от оз. Хубсугул выделяется Мурэнский и далее к юго-западу Тэсийнгольский вулканические ареалы (рис. 1).

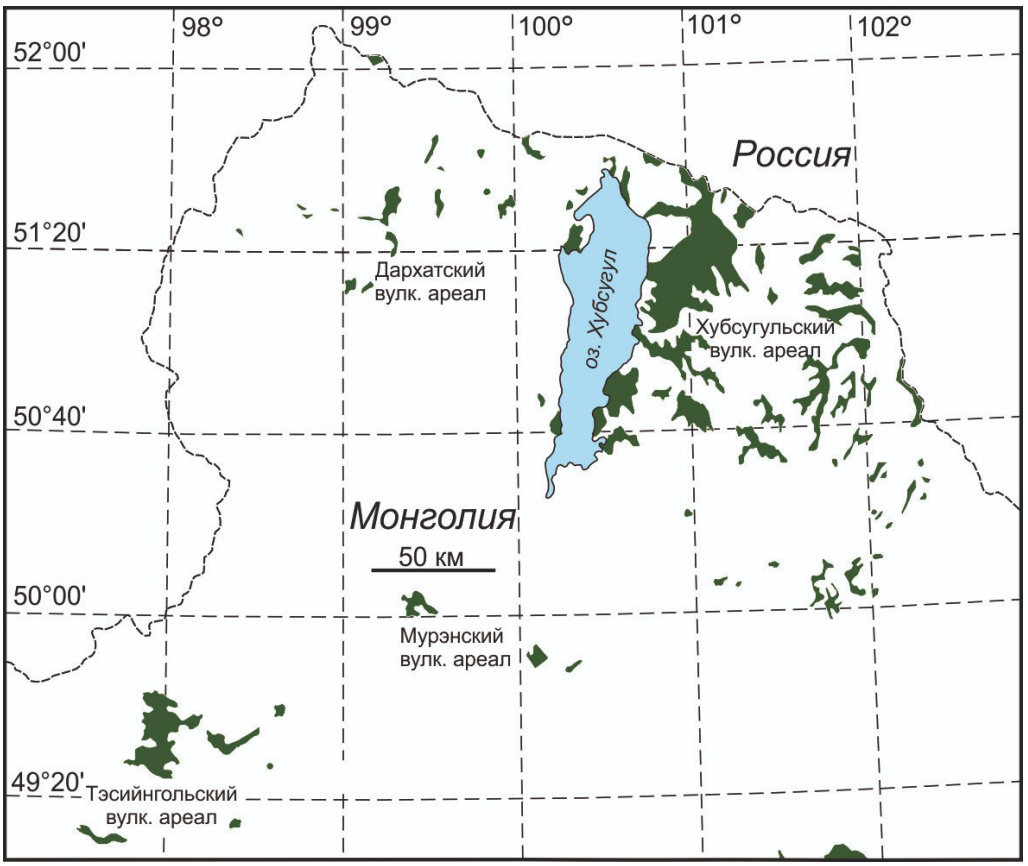


Рисунок 1. Схема распространения позднекайнозойских вулканических ареалов Северной Монголии.

Figure 1. Scheme of late Cenozoic volcanic area distribution in northern Mongolia.

Возраст развития вулканических ареалов Северной Монголии заключен в интервале ~ 29±4 млн. лет (поздний олигоцен – ранний плиоцен). При этом каких либо закономерностей в пространственном распределении разновозрастных вулканических комплексов не наблюдается. Извержения, которые привели к формированию вулканических ареалов Северной Монголии, носили, как правило, трещинный характер. Вулканические постройки центрального типа редки, слабо выражены в рельефе и наблюдались только в строении Дархатского и Тэсийнгольского ареалов.

Среди вулканических пород позднекайнозойских ареалов преобладают трахибазальты и трахиандезибазальты. Они имеют Ol±Cpx парагенезис минералов-вкрапленников. Значительно реже в строении ареалов обнаруживаются андезиты, гавайиты, базаниты и фонотефриты. В отличии от трахибазальтов гавайиты имеют Pl (андезин)-содержащий парагенезис минералов-вкрапленников (Pl+Ol+Cpx). В зависимости от условий происхождения и вариаций составов базаниты и фонотефриты обладают различными минеральными парагенезисами. Выделены базаниты, которые отвечают типу первичных недифференцированных магм с вкрапленниками исключительно Ol, и базаниты, имеющие признаки происхождения в результате кумулятивного обогащения расплавов Ol и Cpx. И тот и другой тип базанитов содержат Lc и Ne. Среди фонотефритов также установлены два типа.

Одни из них отвечают составу первичных магм с вкрапленниками Ol и Lc+Ne+Kfs±Cpx парагенезисом субфенокристаллов, а другие являются продуктами глубокой дифференциации гавайитовых магм и отличаются наличием вкрапленников Pl (андезин) в составе минерального парагенезиса Pl+Cpx+Ol+Lc+Ne. Андезиты обнаружены исключительно среди пород Тэсийнгольского вулканического ареала, они редки, обычно афировые или редкопорфировые, а их происхождение может быть связано не только с длительной эволюцией трахибазальтовых магм, но и с процессами ассимиляции базитовыми магмами салического корового компонента. Установлено, что в строении вулканических ареалов Северной Монголии или на отдельных временных этапах их развития участвуют или формируются такие ассоциации пород, как трахибазальт-трахиандезибазальтовые, трахибазальт-трахиандезибазальт-базанитовые, базанит-фонотефритовые и базанит-гавайит-фонотефритовые. Имеются примеры, когда на отдельных этапах формирования вулканических ареалов проявляются исключительно трахибазальтовые или только трахиандезибазальтовые магмы. В различной степени распространенности в породах и эруптивных отложениях вулканических ареалов Северной Монголии наблюдаются ксенолиты Sp-Grt перидотитов, пироксенитов, гранулитов, ксенокристаллы высоко-Cr граната, а также мегакристаллы салических и темноцветных минералов (полевой шпат, гранат, пироксен, ильменит, слюда, амфибол, апатит). Важно отметить почти повсеместное присутствие в вулканических породах, в ксенолитах, а также

в минералах и среди интерстиционных выделений карбонатного вещества, кальцита и доломита.

Породы вулканических ареалов Северной Монголии относятся к субщелочному и щелочному типам, а их редкоэлементные характеристики соответствуют внутриплитному геохимическому типу. Они обладают высокими содержаниями HFSE (Ti, Ta, Nb) и LILE элементов, но, как правило, отличаются от составов базальтов OIB типа более высокой степенью фракционирования REE, относительным дефицитом U и Th, а также более низкими содержаниями PGE. Редкоэлементное моделирование показывает, что субщелочные и щелочные расплавы ареалов могли быть образованы при низких степенях плавления Grt-содержащих пироксенитов без значимого участия перидотитового субстрата. Изотопные характеристики пород (Sr, Nd, Pb) указывают на то, что одним из источников магм для позднекайнозойских ареалов Северной Монголии была обогащенная мантия EMI типа. При этом обогащенный источник мог быть образован вблизи границы астеносферной и литосферной мантии в результате метасоматического воздействия потоков (плюмов), восходящих из переходной зоны мантии. Причиной возникновения таких потоков вещества могли быть процессы высокобарического преобразования и плавления вулканогенно-осадочного материала субдуцированной в геологическом прошлом океанической литосферы. Одними из доказательств возможности протекания таких процессов являются, в частности, участие в магмообразовании карбонатного вещества, сходство составов мегакристаллов темноцветных минералов с минералами эклогитового парагенезиса, редкоэлементные характеристики пород и их высокорадиогенный изотопный состав Nd.

Причиной позднекайнозойской активизации вулканических процессов в Центральной и Северной Монголии являлись, вероятно, глобальные геодинамические события в Центральной Азии, возможно такие, как отдаленный эффект событий Индо-Азиатского столкновения или смена вектора вращения литосферных плит в обрамлении Сибирского кратона.

Исследования выполнены по теме государственного задания ИГХ СО РАН, проект № 0284-2021-0007.

КОРОВЫЕ КАРБОНАТИТЫ ОЛЬХОНСКОГО ТЕРРЕЙНА (ЗАПАДНОЕ ПРИБАЙКАЛЬЕ, РОССИЯ)

Е.В. Скляров[1], А.В. Лавренчук[2,3]

[1]Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, e-mail: skl@crust.irk.ru

[2]Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск

[3]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

Аннотация.Охарактеризованы коровые карбонатиты Ольхонского террейна, присутствующие в виде даек в амфиболитах и габброидах, а также тел более сложной формы в габбро-сиенитовом Тажеранском массиве. Коровые карбонатиты являются продуктами плавления осадочных карбонатных толщ в нижних частях земной коры, которые в отличие от мантийных карбонатитов не характеризуются специфическими минералогическими и геохимическими особенностями.

GEOLOGY, PETROLOGY AND MINERALOGY OF BEERBACHITE OF THE EARLY PALEOZOIC OLKHON COLLISIONAL OROGEN (WEST BAIKAL AREA, RUSSIA)

E.V. Sklyarov[1], A.V. Lavrenchuk[2,3]

[1]Institute of the Earth crust SB RAS, Irkutsk, e-mail: skl@crust.irk.ru

[2]Institute of geology and mineralogy SB RAS, Novosibirsk,

[3]Novosibirsk State University, Novosibirsk

Abstract. Crustal carbonatites of the Olkhon terrane present in the form of dikes in amphibolites and gabbroids, as well as bodies of a more complex shape in the gabbro-syenite Tazheran massif are characterized. Crustal carbonatites are products of melting of sedimentary carbonate sequence in the lower crust, which, unlike mantle carbonatites, are not characterized by specific mineralogical and geochemical features.

Коровые карбонатиты — интрузивные породы, содержание карбонатов в которых превышает 50%, а количество SiO_2 не превышает 20 мас. %, являющиеся продуктами кристаллизации расплава, образовавшегося в результате плавления первично осадочных карбонатных пород в нижних частях земной коры. Такие породы известны уже давно, но для их описания используются разные термины: «карбонатитоподобные дайки», «карбонатные

эманации», «коровые карбонатиты», «псевдо-карбонатиты», «инъекционные мраморы и кальцифиры», «мраморные дайки», «паракарбонатиты» ([1, 5, 7] и ссылки в них). Главное отличие от мантийных карбонатитов — низкие содержания большинства индикаторных микроэлементов, в частности РЗЭ. В карбонатитах с низким содержанием силикатных минералов и оксидов геохимические характеристики близки осадочным карбонатным комплексам, при повышенных количествах силикатных минералов могут быть более высокими, но ниже концентраций в мантийных карбонатитах. Необходимыми условиями для коровых карбонатных выплавок являются: 1) присутствие осадочных карбонатных пород в нижних частях земной коры; 2) поступление значительных количеств водного флюида в зону магмогенерации; 3) внедрение в нижние части коры мантийных базитовых расплавов (андерплейтинг), обеспечивающих достаточный для плавления карбонатов прогрев; 4) активная тектоническая обстановка (сдвиговый тектоногенез, рифтогенез, постколлизионное растяжение) для поступления порций карбонатитового расплава в верхние части коры.

Формы проявления коровых карбонатитов разнообразны, но достаточно уверенно они выделяются, когда присутствуют в виде даек в метаморфических комплексах, а также в пределах массивов габбро и сиенитов.

В пределах Ольхонского террейна дайки редки и уверенно диагностируются, в основном, в скальных береговых обнажениях (рис. 1). Несколько даек кальцитовых карбонатитов мощностью от 0.3 до 3 м закартированы в амфиболитах (рис. 1Г, Д). Эти дайки являются кососекущими по отношению к метаморфогенной гнейсовидности амфиболитов, и в условиях неполной обнаженности на поверхности легко могут интерпретироваться в качестве прослоев в карбонатно-вулканогенном разрезе. Кроме амфиболитов, дайки карбонатитов прорывают также габброиды бирхинского (рис. 1А, В), слагающего серию массивов, и устькрестовского (рис. 1Б) комплексов. Реже карбонатиты встречаются в виде более крупных тел в пределах интрузивных массивов сложного строения. Так, в центральной части Тажеранского габбро-сиенитового массива (рис. 1Е) расположено тело доломитсодержащих кальцитовых карбонатитов, ассоциирующих с пироксенитами и нефелин-пироксеновыми породами. Карбонатиты представляют собой среднезернистые до гигантозернистых породы, местами насыщенные фрагментами фассаитовых пироксенитов, которые, по нашему мнению, являются продуктами кристаллизации из контаминированного карбонатами базитового расплава [6], причем внедрение карбонатного и базитового расплавов происходило субсинхронно.

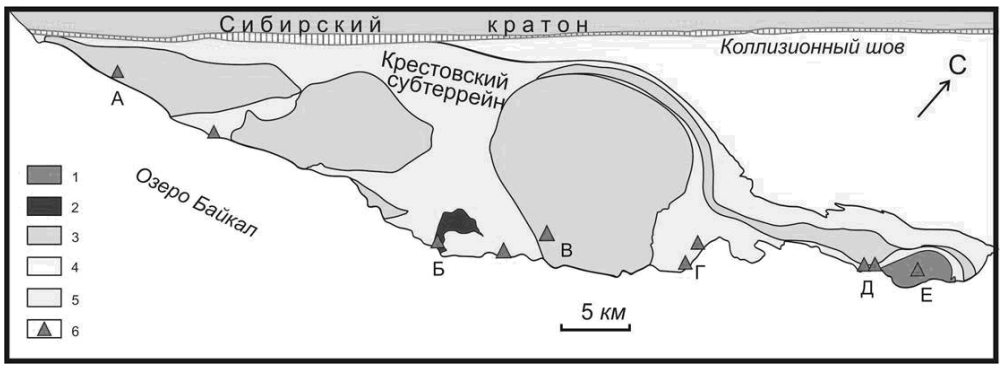


Рисунок 1. Проявления коровых карбонатитов в пределах Ольхонского террейна.
1 – габбро-сиенитовый Тажеранский массив; 2 – субщелочные габброиды устькрестовского комплекса (460 млн. лет), Усть-Крестовский массив; 3 – габброиды бирхинского комплекса (500 млн лет); 4 – гнейсово-карбонатный метаморфический комплекс; 5 – карбонатно-амфиболитовый метаморфический комплекс; 6 – проявления коровых карбонатитов, обсуждаемые в тексте: в Бугульдейском габброидном массиве (А); в Усть-Крестовском габброидном массиве (Б); в Бирхинском габброидном массиве (В); в амфиболитах устьевой части р. Анга (Г); в амфиболитах у Тажеранского массива (Д); в Тажеранском массиве (Е).

Figure 1. Occurrences of crustal carbonatite within the Olkhon terrane.
1 – gabbro-syenite Tazheran massif; 2 – subalkaline gabbroids of the Ustkrestovsky complex (460 Ma), Ust-Krestovsky massif; 3 – gabbroids of the Birkhin complex (500 Ma); 4 – gneiss-carbonate metamorphic complex; 5 – carbonate-amphibolite metamorphic complex; 6 – Occurrences of crustal carbonatite discussed in the paper: in the Buguldey gabbroid massif (A); in the Ust-Krestovsky gabbroid massif (B); in the Birkhin gabbroid massif (C); in the amphibolite at the mouth of the Anga River (D); in the amphibolite near the Tazheran massif (E); in the Tazheran massif (F).

Основными минералами коровых карбонатитов являются пироксены диопсид-геденгбергитового ряда, амфиболы, волластонит, гранаты гроссуляр-андрадитового состава, эпидот-клиноцоизит, алланит, анортит, скаполит. Но также могут встречаться флогопит, форстерит, калишпат, кварц, графит. В качестве акцессориев отмечены оксиды железа, апатит, титанит, ильменит, циркон, редко встречаются редкоземельные минералы.

Ольхонский композитный террейн представляет собой фрагмент нижних горизонтов раннепалеозойской коллизионной зоны между Сибирским кратоном и Баргузинским микроконтинентом [2]. На ранних стадиях косого схождения Баргузинского микроконтинента с Сибирским кратоном происходила фронтальная коллизия с формированием надвиговых структур, утолщением и разогревом коры. На поздних стадиях коллизионного процесса проявился мощный сдвиговый тектогенез, отвечающий по А.И. Ханчуку [3] режиму скольжения литосферных плит. При таком режиме происходило внедрение мантийных базитовых расплавов в нижние части коры, обусловленное аномально горячей мантией, или крупной низкоскоростной мантийной провинцией (Large Low Shear Velocity Province – LLSVP) под структурами Саяно-Байкальской складчатой области, существование которой с венда до мезозоя предполагается В.В. Ярмолюком с соавторами [4]. Это приводило к разогреву коры и плавлению силикатных и карбонатных комплексов. При интенсивно проявленных сдвиговых деформациях формировались локальные «пулл-апарт» структуры, обуславливающие внедрение гранитных и карбонатных

выплавок, а также порций базитового расплава в верхние горизонты коры. По существу, такой режим соответствует позднеколлизионному растяжению коры.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Скляров Е.В., Лавренчук А.В.** Коровые карбонатиты: дефиниции, особенности проявления, геохимии и минералогии. // Геодинамика и тектонофизика. 2025. Т. 16. № 1.

2. **Федоровский В.С., Скляров Е.В.** Ольхонский геодинамический полигон (Байкал): аэрокосмические данные высокого разрешения и геологические карты нового поколения // Геодинамика и тектонофизика. 2010. Т. 1. № 4. С. 331–418.

3. **Ханчук А.И., Иванов В.В.** Мезо-кайнозойские геодинамические обстановки и золотое оруденение Дальнего Востока России // Геология и геофизика. 1999. № 11. С. 1635-1645.

4. **Ярмолюк В.В., Кузьмин М.И., Воронцов А.А.** Конвергентные границы западно-тихоокеанского типа и их роль в формировании Центрально-Азиатского складчатого пояса // Геология и геофизика. 2013. № 12. С. 1831-1850.

5. **Jin C., Zhang Z., Cheng Z.** Carbonatite and related mineralization: an overview. // Geol Soc. London Spec. Publ. 2024. V. 551. P. 335 - 367.

6. **Sklyarov E.V., Lavrenchuk A.V., Doroshkevich A.G., Starikova A.E., Kanakin S.V.** Pyroxenite as a Product of Mafic-Carbonate Melt Interaction (Tazheran Massif, North Baikal Area, Russia) // Minerals. 2021. V. 11. N 6. P. 654.

7. **Su B-X., Wang S-Y., Wang J., Fan H-R.** Crustal-derived versus mantle-derived carbonatites // Lithos. 2024. V. 488-489. P. 107826

CREATION AND DESTRUCTION OF CONTINENTAL CRUST: FROM OCEAN TO CONTINENT

Inna Safonova

Southwest Jiaotong University, Chengdu, China

The creation of continental crust can go by two mains groups of processes: magmatic and tectonic. The magmatic continental growth starts at subduction zones, mainly through juvenile magmatism of intra-oceanic arcs (Stern and Scholl, 2010). More contribution comes from intra-plate continental magmatism linked to mantle plumes and/or rifting zones proving direct “injections” of mantle-derived volcanic rocks into the continental crust. Tectonically the continental crust may overgrow by accretion of the pieces of oceanic plates scrapped off the subducting oceanic lithosphere (Isozaki et al., 1990). Subduction zones are not only major sites of juvenile crust formation on the Earth, but they are also places of strong crust destruction through tectonic erosion, which implies destruction of island arcs and accretionary prism by thrusting, oceanic floor relief, and fracturing (e.g., Scholl, von Huene, 2007; Vanucchi et al., 2016; Safonova and Khanchuk, 2021). Accordingly, two contrast types of Pacific-type convergent margins – accreting or growing and eroding or narrowing - have been recognized so far. The accreting margins form accretionary complexes and grow oceanward. The eroding margins are characterized by shortening distance between arc and trench. The first evidence for the tectonic erosion at Pacific-type convergent margins was obtained from seismic reflection profiles made across the Tonga and Nankai trenches. The modern Pacific is surrounded by 75% of eroding convergent margins and 25% of accreting margins (Scholl, von Huene, 2007). Given that, we are permanently losing the continental crust as the global long-term estimates for crust formation and destruction, i.e. crust volume balance, is minus 0.55 km^3/year (Clift et al., 2009). Therefore, it is important to evaluate the periods and, if possible, volume of created and destructed juvenile continental crust in a historical perspective. The processes of the formation and destruction of continental crust in Phanerozoic time can be best studied in a natural lab of continental growth, the Central Asian Orogenic Belt (CAOB) formed by the evolution and suturing off the Paleo-Asian Ocean (PAO), which actualistic analogue is the present Western Pacific (Safonova et al., 2011; Safonova, 2017). So far, several episodes of tectonic erosion have been reconstructed for the early Paleozoic in the Uzbek Tien Shan, central and eastern Kazakhstan and Russian Altai (Konopelko et al., 2022; Safonova and Perfilova, 2023, Safonova et al., 2024) and for the middle Paleozoic in the Kyrgyz Tienshan and northern Mongolia (Alexeiev et al., 2016; Savinskiy et al., 2021). We have highlighted the following criteria for fixing subduction erosion in fossil Pacific-type orogenic belts, like the CAOB: scarce/small/nil outcrops of arc igneous complexes; disappearance of certain peaks of U-Pb ages of detrital zircons in younger sandstones compared

to older sandstones kept by in accretionary complexes; presence of pieces of arc rocks in serpentinite mélange; magmatic lulls. However, more precise evaluations of created versus destructed Phanerozoic crust in Asia are still a matter of future research.

REFERENCES

1. **Alexeiev D.V., Kröner A., Hegner E., Rojas-Agramonte Y., Biske Yu.S., Wong J., Geng H.G., Ivleva E.A., Mühlberg M., Mikolaichuk A.V., Liu D.N.** Middle to late Ordovician arc system in the Kyrgyz Middle Tianshan: from arc-continent collision to subsequent evolution of a Palaeozoic continental margin. // Gondwana Res. 2016. V. 39. P. 261–291.

2. **Clift P.D., Vannucchi P., Morgan J.P.** Crustal redistribution, crust-mantle recycling and Phanerozoic evolution of the continental crust. // Earth-Science Reviews. 2009. V. 97. P. 80–104.

3. **Isozaki Y., Maruyama S., Fukuoka F.** Accreted oceanic materials in Japan // Tectonophysics. 1990. V. 181. P. 179–205.

4. **Konopelko D., Safonova D., Perfilova A., Biske Y., Mirkamalov R., Divaev F., Kotler P., Obut O., Wang B., Sun M., Soloshenko N.** Detrital zircon U-Pb-Hf isotopes and whole-rock geochemistry of Ediacaran - Silurian clastic sediments of the Uzbek Tienshan: sources and tectonic implications // International Geology Review. 2021. https://doi.org/10.1080/00206814.2021.2010134

5. **Safonova I.Y.** Juvenile versus recycled crust in the Central Asian Orogenic Belt: Implications from ocean plate stratigraphy, blueschist belts and intra-oceanic arcs // Gondwana Res. 2017. V. 47. P. 6-27.

6. **Safonova I.Y., Khanchuk A.I.** Subduction erosion at Pacific-type convergent margins // Russ. J. Pac. Geol. 2021. V. 15. N 6. P. 495–509.

7. **Safonova I., Perfilova A.** Survived and disappeared intra-oceanic arcs of the Paleo-Asian Ocean: evidence from Kazakhstan // National Science Review. 2023. V. 10. N 2. P. 215.

8. **Safonova I., Seltmann R., Kröner A., Gladkochub D., Schulmann K., Xiao W., Komiya T., Sun M.** A new concept of continental construction in the Central Asian Orogenic Belt (compared to actualistic examples from the Western Pacific) // Episodes. 2011. V. 34. P. 186–194.

9. **Safonova I., Krutikova A., Perfilova A., Obut O., Kovach V., Kulikova A.** Early Paleozoic juvenile crustal growth in the Paleo-Asian Ocean: A contribution from the Zasur'ya accretionary complex of NW Altai // Earth Science Reviews. 2024. V. 249. P. 104648.

10. **Savinskiy I., Safonova I., Perfilova A., Kotler P., Sato T., Maruyama S.** A story of Devonian ocean plate stratigraphy hosted by the Ulaanbaatar accretionary complex, northern Mongolia: implications from geological, structural and U–Pb detrital zircon data // Int. J. Earth Sci. 2021. V. 111. P. 2469-2492.

11. **Scholl D., von Huene R.** Crustal recycling at modern subduction zones applied to the past. Issues of growth and preservation of continental basement crust, mantle geochemistry, and supercontinent reconstruction. In: Hatcher, R.D., Jr., Carlson, M.P., McBride, J.H., Martínez Catalán, J.R. (Eds.). 4-D framework of continental crust // Geol. Soc. Am. Memoir. 2007. V. 200. P. 9–32.

12. Stern R.J., Scholl D.W. Yin and Yang of continental crust creation and destruction by plate tectonic processes // Int. Geol. Rev. 2020. V. 52. P. 1–31.

13. Vanucchi P., Morgan J.P., Balestrieri M.L. Subduction erosion, and the deconstruction of continental crust: The Central America case and its global implications. // Gondwana Res. 2016. V. 40. P. 184-198.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, СТРАТИГРАФИЯ И ЛИТОЛОГИЯ ЗОН СУБДУКЦИИ, КОЛЛИЗИИ И СКОЛЬЖЕНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ И ДИНАМИКА ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

GEOLOGICAL STRUCTURE, STRATIGRAPHY AND LITHOLOGY OF SUBDUCTION, COLLISION AND SLIPZONES OF LITHOSPHERIC PLATES AND DYNAMICS OF THEIR INTERACTION

ДИНАМИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ДАВЛЕНИЯ ПРИ МЕТАМОРФИЗМЕ ПОРОД В ЗОНЕ РАЗВИТИЯ НАДВИГОВ

Ш.К. Балтыбаев[1], Э.С. Вивдич[1], О.П. Полянский[2], В.Г. Свердлова[2]

[1]Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт-Петербург, e-mail: shauket@mail.ru

[2]Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация. В юго-восточном фрагменте Раахе-Ладожской шовной структуры на территории России, в пределах Мейерской тектонической зоны предполагается, что тектоническое взаимодействие блока коры архейского основания Карельского кратона (автохтона) и протерозойского гранулитового блока Свекофеннского пояса (аллохтона) контролирует условия формирования аномалий давления. Методами геобарометрии по составам минералов и численным термомеханическим моделированием выявляются давления до 11 кбар, при литостатическом давлении не выше 5–6 кбар. Природа локального появления сверхлитостатического давления объясняется тектоническим взаимодействием неоднородных по физико-механическим свойствам блоков.

DYNAMIC COMPONENT OF PRESSURE DURING METAMORPHISM OF ROCKS IN THE THRUST ZONES

Sh.K. Baltybaev[1], E.S. Vivdich[1], O.P. Polyansky[2], V.G. Sverdlova[2]

[1]Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, St. Petersburg, e-mail: shauket@mail.ru

[2]V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk

Abstract. In the southeastern fragment of the Raahe-Ladoga suture structure in Russia, within the Meyeri tectonic zone, it is suggested that the tectonic interaction between the crustal block of the Archean basement of the Karelian craton (autochthon) and the Proterozoic granulite block of the Svecofennian belt (allochthon) controls the conditions for the formation of pressure anomalies. Methods of mineral geobarometry and numerical thermomechanical modeling reveal pressures up to 11 kbar, while lithostatic pressure not exceeding 5–6 kbar. The nature of the local occurrence of superlithostatic pressure is explained by the tectonic interaction of blocks with heterogeneous physical and mechanical properties.

В данном сообщении мы обращаемся к юго-восточной части зоны сочленения двух крупных блоков Фенноскандии – Свекофеннского подвижного пояса и Карельского кратона. Было высказано мнение, что это сочленение нужно рассматривать как палеоконвергентную зону [7]. Ранее она выделялась как Раахе-Ладожская шовная структура, протягивающаяся от территории Северного Приладожья в России до Ботнического залива в Финляндии. В юго-восточном фрагменте шовной структуры на территории России, в Мейерской тектонической зоне (МТЗ), выявлены повышенные давления («сверхдавления», «overpressure») при метаморфическом минералообразовании. Природа такого давления является предметом нашего рассмотрения.

МТЗ, имеющая субширотное простирание, характеризуется вещественной асимметричной латеральной зональностью: в меридиональном направлении резко и закономерно меняется состав магматических пород, уровень метаморфизма, литология, возраст и формационная специфика стратифицированных толщ. Эти особенности строения тектонической зоны отражают надвиговые соотношения пород аллохтонного (на юге) и автохтонного (на севере) блоков [2].

Метаморфические породы к югу от главного сместителя надвига представляют собой гранулиты, испытавшие диафторез в амфиболитовой фации, тогда как к северу от сместителя развиты средне- и низкотемпературные породы амфиболитовой и зеленосланцевой фации.

Для выявления PT-параметров метаморфизма пород МТЗ были изучены минеральные составы метапелитов и метабазитов. Установлено, что при региональном метаморфизме в гранулитовом аллохтонном блоке пиковые давления не превышали 5–6 кбар [1]. Наряду с этим оказалось, что часть метаморфических пород вблизи к «осевой» части МТЗ содержит минеральные парагенезисы, по которым фиксируются давления 7–11 кбар, т.е. на 2–5 кбар выше литостатического. Эти оценки повышенных давлений получены с использованием разных инструментов термобарометрии (биминеральной, winTWQ, avPT-THERMOCALC, PERPLE_X), что, по нашему мнению, должно исключать вероятность инструментальной ошибки.

В большинстве магматических и метаморфических пород МТЗ развиты вторичные минеральные парагенезисы, по которым прослеживается регрессивный спад давления и температуры. Начало регрессивного тренда в процессе тектонической эксгумации гранулитов характеризуется заметным сбросом давления при высоких температурах, что подтверждено появлением ортопироксен-плагиоклазовых симплектитов, развивающихся по гранату [1].

Численное термомеханическое моделирование тектонического взаимодействия аллохтонного и автохтонного блоков показывает возможность появления в МТЗ локальных очагов повышенных и пониженных давлений относительно литостатического, т.е. динамической составляющей (рис. 1). При построении термомеханической модели учтены стратификация по глубине

и латеральная неоднородность состава протолитов слагающих толщ. Для каждого блока задавались реологические параметры, соответствующие свойствам преобладающих пород. Изучалось поведение вещества в рамках реологической модели упруго-вязко-пластичного тела. В отличие от большинства работ, где в качестве причины сверхлитостатического давления рассматриваются сдвиговые деформации, в расчетной модели основным механизмом появления нелитостатической компоненты давления анализировалась «коллизия» блоков коры с контрастными упруго-вязко-пластическими свойствами.

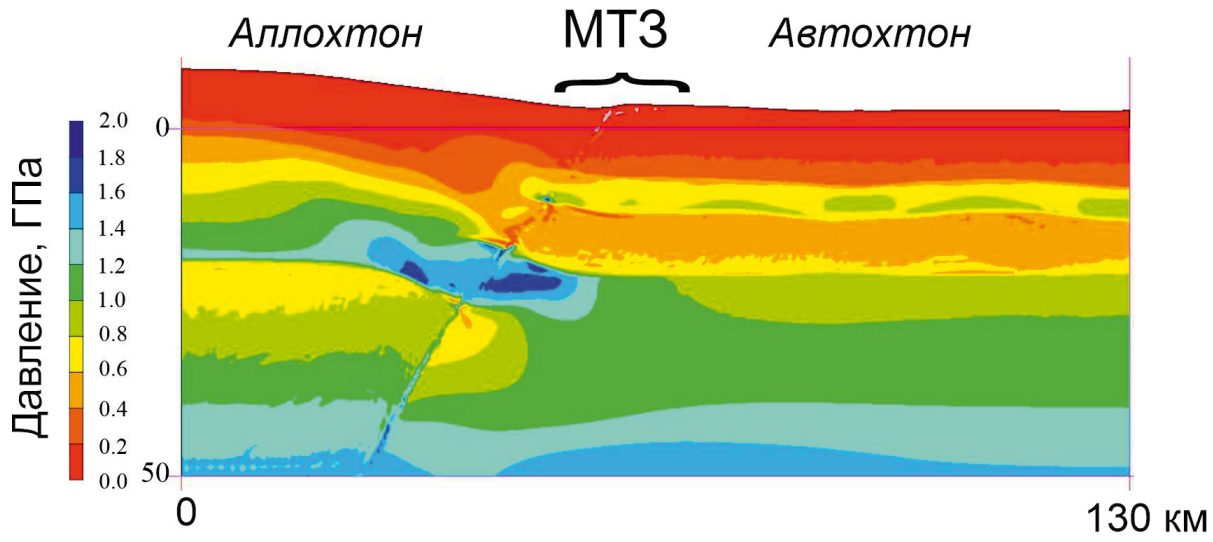


Рисунок 1. Результаты термомеханического моделирования тектонического взаимодействия аллохтонного и автохтонного блоков Мейерской тектонической зоны. Цветовая шкала (рост от красного к синему) отражает суммарное распределение литостатического и динамического давления при образовании надвига.

Figure 1. Thermomechanical modeling of tectonic interaction of allochthonous and autochthonous blocks in the Meyeri tectonic zone. The colour scale (increase from red to blue) indicates the total distribution of lithostatic and dynamic pressure during thrust formation.

Появление сверхдавления в численных моделях субдукции и столкновения плит обсуждается в литературе [5–7 и др.]. Показано, что если субдуцирующая кора однородна по латерали и имеет малые эффективные углы трения, давление внутри канала субдукции отклоняется от литостатического менее чем на 20%. Присутствие флюида и расплава значительно снижает прочность породы в результате механизма деформационного разупрочнения [3, 6]. Однако, если учесть механическую неоднородность коры, результаты моделирования показывают возможность появления давления значительно большего, чем литостатическое, в пределах механически прочных сегментов земной коры. Эти эффекты наиболее выражены в основании земной коры на глубинах ~ 40 км, где давление достигает 2–3 ГПа с последующей диссипацией в течение миллионов лет. Нужно учесть, что давление быстро сбрасывается во время продолжающейся деформации, из чего следует, что такие сверхдавления фиксируются только при эксгумации комплексов сверхбыстрым способом.

Таким образом, анализ распределения величин давления (а также напряжения, пластических и вязких деформаций) позволяет заключить, что отклонения от литостатического давления могут возникать при коллизии крупных блоков без больших тектонических перемещений в надвиговых зонах. Термобарометрические оценки и численное термомеханическое моделирование метаморфизма пород в МТЗ может быть одним из пока еще немногочисленных примеров, демонстрирующим эффект сверхдавления в умеренно-температурных сдвиго-надвиговых зонах. Эффект возникновения динамической составляющей давления пока редко описан на природных объектах, что, скорее всего, является результатом отсутствия систематических исследований в этом направлении.

Исследование выполнено по теме НИР ИГГД РАН FMUW-2022-0002.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вивдич Э.С., Балтыбаев Ш.К., Галанкина О.Л.** Метаморфические минеральные реакции и парагенезисы в породах Мейерской тектонической зоны (Юго-Восток Фенноскандинавского щита) // Петрология. 2024. Т. 32. № 2. С. 195–217.

2. **Baltybaev Sh.K.** Svecofennian orogen of the Fennoscandian shield: compositional and isotopic zoning and its tectonic interpretation // Geotectonics. 2013. V. 47. N 6. P. 452–464.

3. **Bos B., Spiers C.J.** Frictional-viscous flow of phyllosilicate-bearing fault rock: Microphysical model and implications for crustal strength profiles // Journal of Geophysical Research. 2002. V. 107 N B2. 2028.

4. **Gaal G., Gorbatschev R.** An outline of the Precambrian evolution of the Baltic Shield // Precambrian Research. 1987. V. 35. N 1. P. 15–25.

5. **Gerya T.** Tectonic overpressure and underpressure in lithospheric tectonics and metamorphism // Journal of Metamorphic Geology. 2015. V. 33. P. 785–800.

6. **Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyansky O.P. et al.** Causes, geodynamic factors and models of metamorphism // The Nature and Models of Metamorphism. Switzerland: Springer Geology, Cham. 2019. P. 83–228.

7. **Reuber G., Kaus B., Schmalholz S., White R.** Nonlithostatic pressure during subduction and collision and the formation of (ultra)high-pressure rocks // Geology. 2016. V. 44. P. 343–346.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ЗАПАДНОГО ТАЙМЫРА С УЧЕТОМ ДАННЫХ ОРГАНИЧЕСКОЙ ГЕОХИМИИ ПОРОД И БИТУМОВ

Л.Н. Болдушевская

ООО «РН-КрасноярскНИПИнефть», г. Красноярск,
e-mail: BoldushevskayaLN@knipi.rosneft.ru

Аннотация. По геолого-геофизическим данным с использованием результатов органической геохимии пород и битумов (пиролиз Rock-Eval, элементный анализ керогена, отражательная способность витринита, данные хроматомасс-спектрометрии) проведена реконструкция истории тектонического развития и нефтегазообразования в виде 1D и 2D моделей. Уточнена степень метаморфизма углей до внедрения нижнетриасовых интрузий долеритов, оценены масштабы тектонических движений и размыва отложений на разных этапах, прослежена история погружения и нефтегазообразования.

TECTONIC HISTORY RECONSTRUCTION OF THE OF WESTERN TAIMYR TAKING INTO ACCOUNT THE DATA OF ROCKS AND BITUMEN ORGANIC GEOCHEMISTRY

L.N. Boldushevskaya

RN-KrasnoyarskNIPIneft LTD, Krasnoyarsk,
e-mail: BoldushevskayaLN@knipi.rosneft.ru

Abstract. Based on geological and geophysical data using the results of organic geochemistry of rocks and bitumen (Rock-Eval pyrolysis, elemental analysis of kerogen, vitrinite reflectivity, chromatomass spectrometry data), the reconstruction of the history of tectonic development and oil and gas formation in the form of 1D and 2D models was carried out. The degree of coal metamorphism before the introduction of Lower Triassic dolerite intrusions has been clarified, the capacities of tectonic movements and sediment erosion at different stages have been estimated, and the history of sinking and oil and gas formation has been traced.

Западный Таймыр представляет собой северо-восточную часть палеозойских структур обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна и западную часть Южно-Таймырской (Быррангской) раннемезозойской (древнекиммерийской) складчатой системы (рис.1). Разрезы ордовика, силура, девона и нижнего карбона здесь слагаются относительно глубоководными глинисто-кремнисто-карбонатными комплексами. Для низов верхней перми характерны мелководно-морские

осадки, которые постепенно сменяются вверх по разрезу континентальной терригенной угленосной толщей. Нижний триас представлен трапповым комплексом.

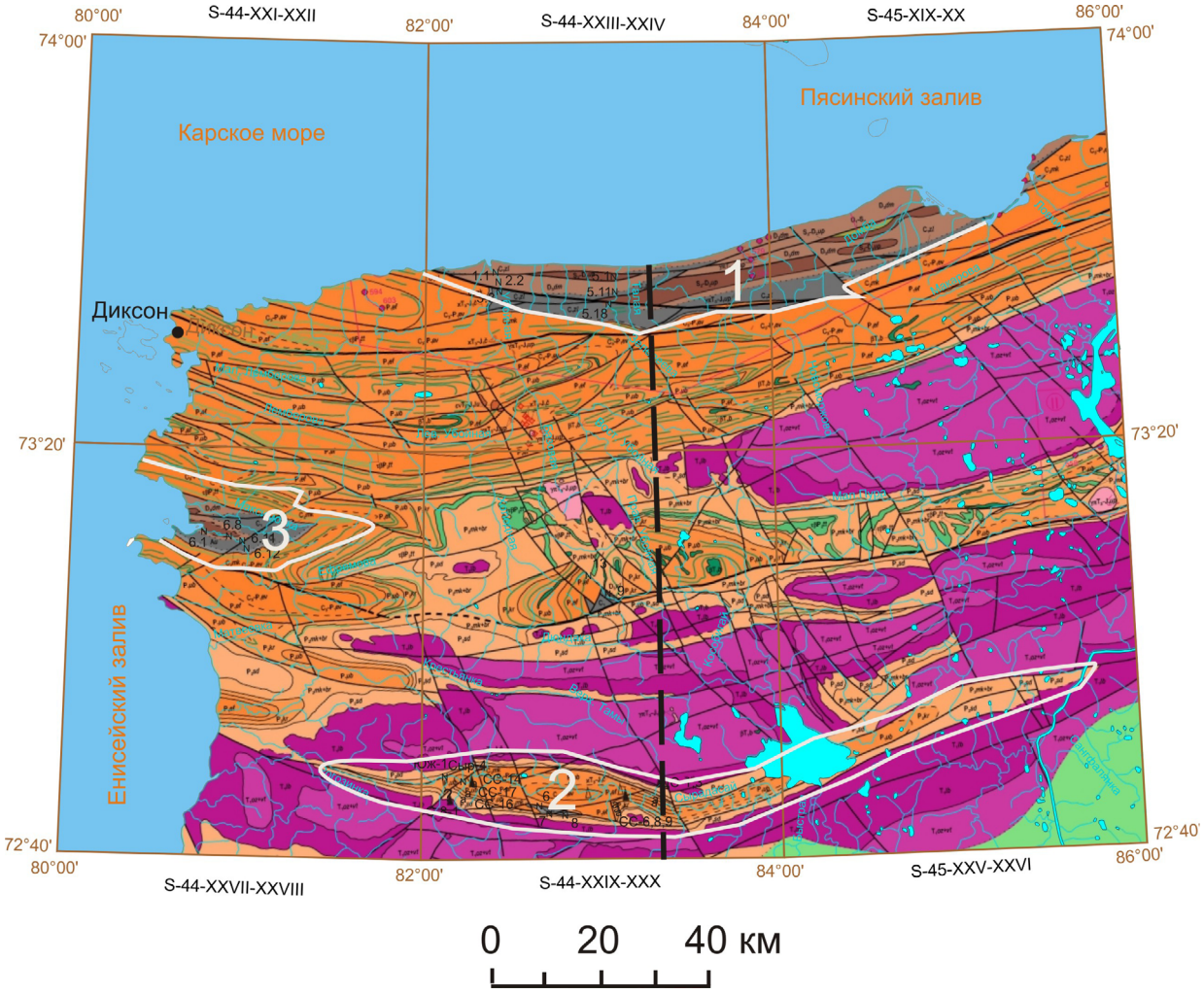


Рисунок 1. Геологическая карта территории Западного Таймыра.
1 – выходы отложений силура, девона и нижнего карбона (усть-пясинской, домбинской, зеледеевской и макаровской свит) в Северной фациальной зоне; 2 – Сырадасайская горст-антиклиналь; 3 – Ефремовская антиклиналь; вертикальной пунктирной линией показан северный фрагмент регионального сейсмопрофиля Диксон – оз. Хантайское.

Figure 1. Geological map of the Western Taimyr.
1 – outcrops of Silurian, Devonian and Lower Carboniferous deposits (Ust-Pyasinskaya, Dombinskaya, Zeledeevskaya and Makarovskaya formations) in the Northern facies zone; 2 – Syradasayskaya mountain anticline; 3 – Efremovskaya anticline; the vertical dotted line shows the northern fragment of the regional seismic profile Dixon – Lake Khantaiskoe.

Методы органической геохимии (пиролиз Rock-Eval, отражательная способность витринита, элементный анализ керогена, газовая хроматография, хроматомасс-спектрометрия, изотопный анализ) могут использоваться не только для оценки нефтегазогенерационных свойств пород и перспектив нефтегазоносности. В данном случае, при проведении геохимических работ мы выходим на оценку тектонических движений, в частности на определение и уточнение масштабов тектонических движений и размывов.

В пределах Западного Таймыра для оценки нефтегазогенерационных свойств палеозойских отложений методами органической геохимии были проанализированы породы силура-нижнего девона (S_2-D_2*up* – усть-пясинская свита), верхнего девона (D_3*dm* – домбинская свита), карбона (C_1*zl* и C_2*mk* – зеледеевская и макаровская свиты) в Северной фациальной зоне (рис. 1); отложения крестьянской P_2*kr*, макаревичско-бражниковской P_2*mk* и сырадасайской свит P_2*sr*, а также битумы из миндалекаменных базальтов триаса в пределах Сырадасайской антиклинали [1, 2].

В обнажениях Северной фациальной зоны (рр. Зеледеево, Убойная) по данным элементного состава керогена степень катагенеза органического вещества (ОВ) углеродистых сланцев палеозоя высокая при высоком содержании органического углерода (до стадии апокатагенеза АК). Содержание $C_{орг}$ в отложениях усть-пясинской и домбинской свиты по данным пиролиза ОВ достигают 5-6%. Эти отложения реализовали свой нефтегазогенерационный потенциал в начале триаса, погрузившись на глубину 7-8 км, и в ходе погружения в течение геологической истории генерировали углеводороды, т.к. по данным хроматомасс-спектрометрии ОВ в их составе коррелирует с битумами в нижнетриасовых базальтах Сырадасайской площади [2].

Пермские отложения на большей части территории прогреты многочисленными межпластовыми и секущими интрузиями долеритов. В обнажениях и скважинах Сырадасайского участка отобраны пробы каменных углей, алевролитов и аргиллитов, органическое вещество которых на удалении от интрузий подвержено региональному катагенезу. Содержание $C_{орг}$ в пермских терригенных отложениях Сырадасайской площади варьирует от 0.25% в глинистых алевролитах до 8% в углистых аргиллитах.

Отражательная способность микрокомпонента углей витринита (R°) фиксирует максимальные температурные изменения и используется, наряду с другими геохимическими данными, для определения степени катагенеза ОВ пород, стадии реализации нефтегазогенерационного потенциала в зоне нефтяного окна, а также для определения величины размыва отложений на этапе воздымания. Собраны и проанализированы данные углепетрографических исследований на угольных месторождениях Западного Таймыра. Для оценки масштабов региональных максимальных погружений используются значения отражательной способности витринита углей в горизонтах, не затронутых влиянием интрузий. На Сырадасайской площади такие значения R° изменяются от 0.7-1.1% (в среднем 1,03%) в верхнепермских отложениях (крестьянская свита) до 1.1-1.4% в нижнепермских отложениях (ефремовская свита). На Тарейской площади фиксируется R° на уровне 0.74-1.0%, в среднем 0.95% [4]. В зонах, прогретых пластовыми или секущими интрузиями, степень преобразованности углей достигает тощей и полуантрацитовой стадии. Зона контактовых изменений приблизительно составляет две мощности интрузии. Метаморфизм углей, не затронутых контактовыми интрузивными изменениями,

в разрезе ефремовской и убойнинской свит в обнажениях и колонковых скважинах Сырадасайской площади, достигает газовой-жирной стадий $МК^2_1$(Г)-$МК_2$(Ж) на глубинах 200-400 м. Эта преобразованность могла быть достигнута на момент максимального погружения в конце триаса на глубинах 3500-4000 м. Таким образом, мощность эрозии здесь составила около 3,5 км. Эта мощность вполне реальная, учитывая толщины верхнепермских и триасовых отложений, сохранившихся от размыва на соседних территориях [3]. С учетом интерпретации геохимических данных построены 1D модели истории погружения по скважинам Сырадасайской площади, отражающие этапы погружений, воздыманий и эрозий, изменения температур.

На основе приведенных выше геохимических данных, геологосъемочных материалов и результатов сейсморазведки [5] по северномуфрагменту регионального профиля Диксон – оз. Хантайское проведена реконструкция истории погружения и нефтегазообразования (рис. 2).

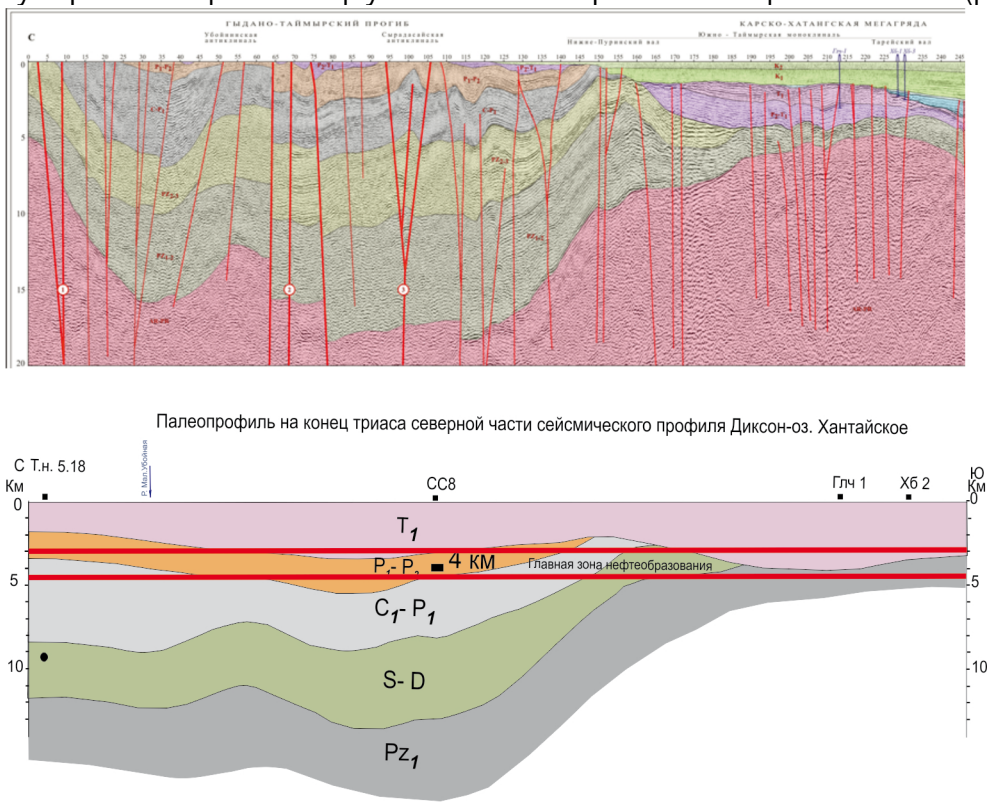


Рисунок 2. Реконструкция истории погружения и нефтегазообразования по региональному профилю Диксон – оз. Хантайское.

Figure 2. Reconstruction of the subsidence history and oil and gas production according to the regional profile Dixon – Lake Khantaiskoe.

Построен схематический модельный палеотектонический профиль на конец триаса с севера на юг: обнажения домбинской и усть-пясинской свит р. Зеледеево – скважина 8-Сырадасайская – Гольчихинская 1 и Хабейская 1. Параллельными линиями показана зона нефтяного окна. Отражены глубины максимального погружения и размыва палеозойских отложений. Складчатые деформации Южно-Таймырской зоны происходили до начала юры. Вторая,

но более слабая фаза деформаций была на рубеже юры и мела. В пределах центральной и южной части участка, в том числе и на Сырадасайской площади, при постепенном погружении углеродистые отложения домбинской D_3dm и усть-пясинской S_2-D_2up свит проходили зону нефтяного окна, вступали в зону газогенерации и уже на этапе максимального погружения реализовали свой потенциал. Южнее Сырадасайской антиклинали в пределах Нижне-Пуринского вала отложения девона и силура находились в главной зоне нефтеобразования на этапе максимального погружения в конце триаса и также, вероятно, являются источниками углеродистого вещества, которые могли здесь сохраниться, в отличие от северной и центральной зоны Западного Таймыра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Болдушевская Л.Н., Ладыгин С.В., Назимков Г.Д., Романов А.П., Филипцов Ю.А., Фомин А.Н.** Органическое вещество палеозойских отложений Западного Таймыра и западной части Енисей-Хатангского регионального прогиба, палеотектонические реконструкции по геолого-геохимическим данным // Фундамент, структуры обрамления Западно-Сибирского мезозойско-кайнозойского осадочного бассейна. Тюмень-Новосибирск. 2008. С. 23-25.

2. **Болдушевская Л.Н., Филипцов Ю.А., Ладыгин С.В., Романов А.П.** Нефтегазоматеринские толщи палеозойского разреза Западного Таймыра и корреляционные связи: органическое вещество пород – нафтиды // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2012. № 4. С. 26-33.

3. **Погребицкий Е.Ю.** Палеотектонический анализ Таймырской складчатой системы. М.: Недра, 1976.

4. **Угольная база России.** Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири: Москва. ЗАО «Геоинформмарк», 2001. Т. IV.

5. **Казаис В.И., Мельник А.И., Кушнир Д.Г.** Эффективность нового этапа региональной сейсморазведки на Таймыре // Перспективы развития нефтегазодобывающего комплекса Красноярского края. Материалы научно-практической конференции. Красноярск. 2007.

СКОРОСТНЫЕ НЕОДНОРОДНОСТИ В ЛИТОСФЕРЕ РАЙОНА ЮЖНОЙ ГРАНИЦЫ ОХОТСКОЙ ПЛИТЫ ПО ДАННЫМ JMA КАТАЛОГОВ

Н.А. Бушенкова[1], Т.А. Ступина[1], В.Д. Кондратюк[2]

[1]Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: bushenkovana@ipgg.sbras.ru

[2]Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск

Аннотация. Исследование посвящено построению детальной 3D структуры коры и верхов мантии до глубин ~100 км района южной границы Охотской плиты. Моделирование распределения скоростных аномалий выполняется с использованием алгоритма локальной сейсмической томографии, оптимизированного для работы с исключительно плотными исходными данными из бюллетеней Японского Метеорологического Агентства (JMA) за 1998-2022 гг. Результаты сейсмотомографического моделирования показывают значительную раздробленность верхней коры вдоль южной границы ОП под заливом Утиура и в его прибрежной зоне на островах Хоккайдо и Хонсю.

VELOCITY HETEROGENEITIES IN THE LITHOSPHERE OF THE OKHOTSK PLATE SOUTHERN BOUNDARY AREA ACCORDING TO JMA CATALOGS

N.A. Bushenkova[1], T.A. Stupina[1], V.D. Kondratyuk[2]

[1]A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, e-mail: bushenkovana@ipgg.sbras.ru

[2]Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk,

Abstract. The study is devoted to constructing a detailed 3D structure of the Earth's crust and upper mantle to depths of ~100 km in the Okhotsk Plate southern boundary area. Modeling of velocity anomalies distribution is performed using the local seismic tomography algorithm optimized for working with extremely dense source dataset from the Japan Meteorological Agency (JMA) bulletins for 1998-2022. The results of seismic tomographic modeling show significant fragmentation of the upper crust along the Okhotsk Plate southern boundary beneath Uchiura Bay and in its coastal zone on Hokkaido and Honshu.

Подавляющий процент всей сейсмической активности на Земле происходит в условиях конвергентной тектоники на границах плит, что придает высокую социальную значимость исследованиям таких зон. Многие аспекты глубинной геодинамики на границах литосферных плит привлекают пристальное внимание ученых мира. Однако, ответы на большинство важных вопросов не могут быть получены без надежной информации о строении земной коры и мантии. Настоящее исследование посвящено построению детальной 3D структуры коры и верхов мантии до глубин ~100 км района южной границы Охотской плиты (ОП), проходящей, согласно [1], вкрест зоны субдукции Тихоокеанской плиты через залив Утиура и п-ов Осима (юго-западная оконечность о. Хоккайдо), а не по хребту Хидака, и не через о. Хонсю, как представлялось в более ранних исследованиях (например, [5, 6] и др.).

Моделирование выполняется в соответствии с алгоритмом локальной сейсмической томографии LOTOS [4], оптимизированным для работы с исключительно плотными исходными данными (~2 млн. локальных событий, зарегистрированных более 2 тыс. региональных сейсмических станций), отобранными из бюллетеней Японского Метеорологического Агентства (JMA, https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/bulletin/) за период 1998-2022 гг. При выборке данных из JMA мы соблюдали условие, что каждое из событий должно быть зарегистрировано как минимум 10 местными сейсмостанциями для обеспечения точности определения гипоцентров, при этом максимальное количество станций на одно событие достигало 136. Предварительно проведенные детальный анализ выборки сейсмических событий по параметрам атрибутов, структурный анализ распределения гипоцентров событий и фиктивных скоростей в пространстве, анализ частотно-магнитудного распределения и параметров графика повторяемости Гутенберга-Рихтера в динамике по годам были представлены в докладе на конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» в ИФЗ РАН [2]. В ходе сейсмотомографического моделирования большое внимание уделяется определению оптимальных параметров инверсии и проверке разрешающей способности путем тестирования на синтетических аномалиях разного характерного размера.

Полученные результаты согласуются с выводами о расположении южной границы Охотской плиты, предварительно установленном в [1]. Выявлены интересные особенности распределения скоростных аномалий в коре изучаемой области. Например, на коровых глубинах (~10 км) под заливом Утиура и соседствующими с ним прибрежными областями островов Хоккайдо и Хонсю отчетливо наблюдается отрицательная аномалия скоростей P-волн, которая, судя по совокупности характеристик аномалий Vs и отношения Vp/Vs, указывает на значительную раздробленность верхней коры. В пределах территорий островов Хонсю и Хоккайдо на глубине ~20-40 км во взаимном

расположении скоростных аномалий наблюдается заметное соответствие с распределениями значений толщины коры, представленными в работах [3, 7].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бушенкова Н.А., Ступина Т.А., Кучай О.А.** Локализация южной границы Охотской плиты на основе комплекса сейсмических характеристик // Геология и Геофизика. 2025. Т. 66. № 6. С. 723-733. https://doi.org/10.15372/GiG20251051.

2. **Ступина Т.А., Бушенкова Н.А.** Оценка сейсмичности в зоне границ Охотоморской плиты в районе Японских островов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле. Аннотации докладов Шестой Всероссийской тектонофизической конференции, приуроченной к 300-летию РАН (Москва, 7-12 октября 2024 г.). Москва: ИФЗ РАН, 2024. 102 с.

3. **Iwasaki T., Levin V., Nikulin A., Iidaka T.** Constraints on the Moho in Japan and Kamchatka // Tectonophysics. 2013. V. 609. P. 184-201.

4. **Koulakov I.** LOTOS code for local earthquake tomographic inversion. Benchmarks for testing tomographic algorithms // Bulletin of the Seismological Society of America. 2009. V. 99. N 1. P. 194-214. https://doi.org/10.1785/0120080013.

5. **Savostin L., Zonenshain L., Baranov B.** Geology and plate tectonics of the Sea of Okhotsk. In: T.W.C. Hilde and S. Uyeda (Eds.), Geodynamics of the Western Pacific-Indonesian region. American Geophysical Union, Washington, DC, 1983. Geodyn. Ser., V. 11. P. 189-221.

6. **Seno T., Sakurai T.** Can the Okhotsk plate be discriminated from the North American plate? // Journal of Geophysical Research. 1996. V. 101. Iss. b5. P. 11305-11315.

7. **Zhao D., Hasegawa A., Kanamori H.** Deep structure of Japan subduction zone as derived from local, regional, and teleseismic events // Journal of Geophysical Research. 1994. V. 99. Iss. B11. P. 22313–22329.

СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ РУДНЫХ ТЕЛ ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЖЕРЕК (ВОСТОЧНЫЙ КАЗАХСТАН)

А.С. Гладков[1], С.С. Зинякин[2], Ю.А. Калинин[3], М.С. Михайлов[1], В.П. Сухоруков[3], В.Е. Волкова[3]

[1]Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, e-mail: gladkov@crust.irk.ru

[2]НАО «Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева», Казахстан

[3]Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация. Представлены первые результаты геолого-структурных исследований на золоторудном месторождении Жерек. Охарактеризованы основные тектонические элементы, определяющие структуру месторождения. Восстановлены поля тектонических напряжений и определена последовательность их проявления во времени. Формирование рудных тел связывается с постколлизионной геодинамической обстановкой.

STRUCTURAL CONTROL OF ORE BODIES OF ZHEREK GOLD DEPOSIT (EAST KAZAKHSTAN)

A.S. Gladkov[1], S.S. Zinyakin[2], Yu.A. Kalinin[3], M.S. Mikhailov[1], V.P. Sukhorukov[3], V.E.Volkova[3]

[1]Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, e-mail: gladkov@crust.irk.ru

[2]NCJSC «D. Serikbayev East Kazakhstan Technical University», Kazakhstan

[3]Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, Novosibirsk

Abstract. The first results of geological and structural studies at the Zherek gold deposit are presented. The main tectonic elements determining the structure of the deposit were characterized. Tectonic stress fields were reconstructed and the sequence of their manifestation in time was determined. The formation of ore bodies is associated with post-collisional geodynamic setting.

Золоторудное месторождение Жерек расположено на северо-западе Западно-Калбинского металлогенического пояса (ЗКМП) в Семипалатинском Прииртышье (Восточный Казахстан). В настоящее время достаточно подробно охарактеризованы вещественные аспекты строения месторождения Жерек, включающие особенности строения и состав рудовмещающих отложений, магматических образований, а также рудных тел [2, 3, 6]. Вмещающими породами являются песчано-алевролитовые углеродсодержащие отложения нижнего карбона, прорванные малыми интрузивными телами и дайками гранит-порфиров позднепалеозойского-нижнемезозойского возраста (кунушский комплекс). Считается, что именно с последними пространственно и генетически связано оруденение кварцево-жильного и прожилково-вкрапленного типов. Рудная минерализация представлена пиритом, арсенопиритом, самородным золотом, блеклой рудой, сфалеритом, халькопиритом, марказитом, самородным серебром. Кварцевые жилы содержат незначительные содержания золота и не представляют промышленного интереса в качестве самостоятельных рудных тел. Минерализованные зоны играют главную роль при оценках запасов месторождения. Отмечается, что линзовидно-лентовидные по форме рудные тела ориентированы вдоль слоистости вмещающих пород, косо секут субсогласные тела плагиогранитов и падают на север под углами 15 – 55°.

В то же время, информация о тектоническом строении месторождения носит самый общий характер. Известно, что оно локализовано в пределах Мукурской зоны северо-западного простирания, образуемой тремя сближенными крупными разломами — Северо-Мукурским, Центрально-Мукурским, Южно-Мукурским. Отмечено, что рудовмещающей структурой служит зона Южно-Мукурского разлома на участке его усложнения широтными разрывами. Также отмечено, что важную роль в локализации оруденения играют разноранговые разломы и узлы их пересечений — как области высокой проницаемости для тепловых и флюидных потоков. Подобной информации недостаточно для определения локальных факторов структурного контроля золотоносных тел, необходимых для прогнозно-поисковых построений. Выходом из подобной ситуации должно стать создание структурной модели месторождения на основе картирования основных элементов разломно-блоковой структуры участка, детального изучения тектонической трещиноватости и восстановления полей тектонических напряжений.

В рамах решения данной задачи в карьере месторождения начат сбор фактического материала, характеризующего пространственные характеристики и особенности строения дизъюнктивных и пликативных структур, сделаны массовые замеры трещиноватости, а также выполнено структурное дешифрирование космоснимков для сопредельной площади. В процессе проведения работ и анализа полученных данных использовались методологические принципы спецкартирования [5] в сочетании с классическими методами восстановления полей тектонических напряжений [1, 4, 7].

Карьером вскрыт фрагмент зоны Южно-Мукурского разлома, представленный наклонными зонами пластического течения и рассланцевания пород, межслоевыми срывами в сочетании с изометричными наклонными и лежачими складками. Мощности зон колеблются от первых десятков сантиметров до десятков метров. Большинство из них характеризуются запад-северо-западным простиранием (280-300°) с падением на север-северо-восток под углами 25-50°. Шарниры большинства складок ориентированы под острым углом к направлению зон и простираются на северо-запад 310-320°. Подобное взаимоотношение разрывных нарушений и складок в зоне Южно-Мукурского разлома может указывать на обстановку косого сжатия (транспрессии). Значительная часть минерализованных зон тяготеет к участкам наиболее напряженной складчатости и характеризуется падениями в северных румбах с углами 25-45°. Другими элементами тектонической структуры месторождения являются субвертикальные нарушения (углы падения от 60 до 90°). Они представлены зонами повышенной трещиноватости и дробления, реже смятия, мощностями от нескольких метров до первых десятков метров. Для большинства из них характерна север-северо-восточная ориентация с преимущественным падением на запад-северо-запад. В крыльях данных разломов отмечаются крупные складки, шарниры которых ориентированы субпараллельно простиранию сместителей. Реже встречаются субвертикальные нарушения широтного и северо-восточного направлений. Результаты структурного дешифрирования свидетельствуют о том, что на восточном фланге месторождение ограничено разломной зоной северо-восточной ориентации, а на западном – север-северо-восточной.

Анализ полей тектонических напряжений показал, что тектоническая структура месторождения и сопредельной площади формировалась и активизировалась в течение, как минимум, пяти этапов, отличающихся направлениями действий главных нормальных напряжений. На первом из них сформировался ансамбль складчатых структур и надвиговых (взбросовых) разломов зоны Южно-Мукурского разлома, а также были заложены субвертикальные разломы северо-восточной, север-северо-восточной и север-северо-западной ориентаций. Данный временной отрезок отвечает коллизионной геодинамической обстановке, обусловленной закрытием океанического бассейна на стыке Сибирской и Казахстанской тектонических плит. Второй и третий ассоциируются с постколлизионной геодинамической обстановкой. На данных этапах происходило формирование кварцево-жильных и прожилково-вкрапленных рудных тел в структурах Южно-Мукурского разлома. Четвертый и пятый этапы соответствуют субплатформенной обстановке. Для них характерна активизация прежде всего субвертикальных разломов, смещения по которым носили преимущественно сдвиговый характер.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гзовский М.В.** Основы тектонофизики. М.: Наука, 1975. 536 с.

2. **Зинякин С.С.** Критерии локализации золоторудной минерализации в Семипалатинском Прииртышье на примере месторождения Джерек. Минералообразующие системы месторождений высокотехнологичных металлов: достижения и перспективы исследований. Всероссийская конференция, проводимая в рамках мероприятий, посвященных 300-летию РАН. Материалы конференции. Москва. 2023. С. 50.

3. **Масленников В.В.** Факторы рудолокализации и критерии прогноза золоторудных месторождений в черносланцевых толщах (на примере Восточного Казахстана) // Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук / Томский политехн. ун-т. Томск. 1998.

4. **Николаев П. Н.** Методика тектонодинамического анализа. М.: Недра, 1992. 295 с.

5. **Семинский К.Ж.** Спецкартирование разломных зон земной коры. Статья 2: Этапы и перспективы // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6. № 1. С. 1–43. https://doi.org/10.5800/GT-2015-6-1-0170

6. **Ужкенов Б.С, Любецкий В.Н, Беспаев Х.А., Любецкая Л.Д., Сельтманн Р.** Золоторудные пояса Казахстана (глубинное строение, геодинамика развития, глубинные факторы локализации оруденения) / Институт геологических наук им. К. И. Сатпаева, Комитет геологии и недропользования МЭ и МР РК. Алматы. 2007. 344 с.

7. **Delvaux D., Sperner B.** Stress tensor inversion from fault kinematic indicators and focal mechanism data: the TENSOR program / Geological Society. London. Special Publications. 2003. V. 212. P 75–100.

АНОМАЛИИ СТРОЕНИЯ ЗОНЫ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ МАНТИИ В РАЙОНЕ О. САХАЛИН ПО ДАННЫМ ОБМЕННЫХ ВОЛН

А.Г. Гоев[1,2], Д.В. Костылев[1,3,4]

[1]Институт динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, г. Москва, e-mail: goev@idg.ras.ru

[2]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

[3]Сахалинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Южно-Сахалинск

[4]Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск

Аннотация. В работе представлены новые результаты определения особенностей рельефа границ зоны фазовых переходов мантии на глубинах близких к 410 и 660 км в районе о. Сахалин методом PRF. Для этого были проанализированы записи 9 широкополосных сейсмических станций, установленных на о. Сахалин и в близлежащих районах. Продемонстрировано, что граница 410 испытывает подъем в южной части исследуемого региона, а граница 660 понижается в северной части. Данный эффект связан с взаимодействием субдуцирующего холодного слэба с зоной фазовых переходов мантии.

ANOMALIES IN THE STRUCTURE OF THE MANTLE TRANSITION ZONE BENEATH SAKHALIN ISLAND ACCORDING TO CONVERTED WAVE DATA

A.G. Goev[1,2], D.V. Kostylev[1,3,4]

[1]Sadovskiy Institute of Geosphere Dynamics RAS, Moscow, e-mail: goev@idg.ras.ru

[2]Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow

[3]Sakhalin Branch, Geophysical Survey RAS, Yuzhno-Sakhalinsk

[4]The Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk,

Abstract. This study presents new findings on the topography of the mantle transition zone boundaries at depths of 410 km and 660 km beneath Sakhalin Island, obtained through P-receiver function (PRF) analysis of data from 9 broadband seismic

stations deployed across Sakhalin and adjacent regions. The results demonstrate an upward deflection of the 410-km boundary in the southern part of the study area and a downward depression of the 660-km boundary in the northern sector, which we interpret as evidence of thermal and dynamic interactions between the subducting cold slab and the mantle transition zone beneath the region.

Активные континентальные окраины являются предметом изучения мировой сейсмологии, т.к. во многом они являются ключом для понимания процессов как активной современной, так и палеогеодинамики. Отдельное внимание в исследованиях уделяется взаимодействию слэба и границ зоны фазовых переходов верхней мантии (MTZ, [3, 6] и ссылки в них). Зоной фазовых переходов в мантии (MTZ) является слой, лежащий на глубинах, близких к 410–660 км и связанный с фазовыми переходами оливина в более плотные модификации в условия высоких давлений и температур [7]. Изучение характеристик этой области имеет важнейшее значение, т.к. она во многом контролирует массоперенос между верхней мантией и нижележащими частями Земли и существенно влияет на конвективные мантийные процессы. Глубины залегания границ 410 и 660, а также мощность MTZ, варьируются для различных регионов, и даже в пределах одного региона. Важным фактором, влияющим на ее характеристики, является температурный режим. Так, при погружении в MTZ холодной субдуцирующей литосферы, граница 410 км поднимается вверх, тогда как граница 660 км опускается, в результате чего мощность зоны растет [5]. При повышении температуры (например, вблизи горячего плюма) наблюдается обратный эффект.

Одним из наиболее удобных методов изучения этих границ является метод функций приемника или PRF [1]. Методика анализирует обменные P-S сейсмические волны, которые сформировались на контрастных сейсмических границах (например, на границах 410 и 660) при прохождении сигналов телесейсмических событий. Необходимым условием возможности применения методики является наличие длительного архива волновых форм широкополосных сейсмостанций. По этой причине методика PRF была применена к Дальневосточной зоне РФ только один раз, а полученные результаты носили региональный характер с низкой степенью детализации [2].

К настоящему моменту в анализируемом регионе Сахалинским филиалом Единой геофизической службы РАН (СФ ЕГС РАН) установлено девять станций, непрерывно работающих более 12 лет и равномерно покрывающих исследуемый регион (рис. 1), данные которых и были проанализированы.

Анализ полученных PRF позволил выявить существенный рельеф границ 410 и 660. Показано, что в северной части острова глубина залегания границы 410 существенно понижается с последующим возвратом к стандартным значениям в центральной части острова. Граница же 660

начинает свое опускание, начиная с центральной части о. Сахалин, и этот прогиб продолжается дальше на север. Выявленные аномалии хорошо согласуются моделью глубины залегания слэба в исследуемой области [4] и объясняются взаимодействием холодной субдуцирующей литосферы с MTZ.

Работа выполнена за счет средств гранта РНФ 25-27-00240 и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке – «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира».

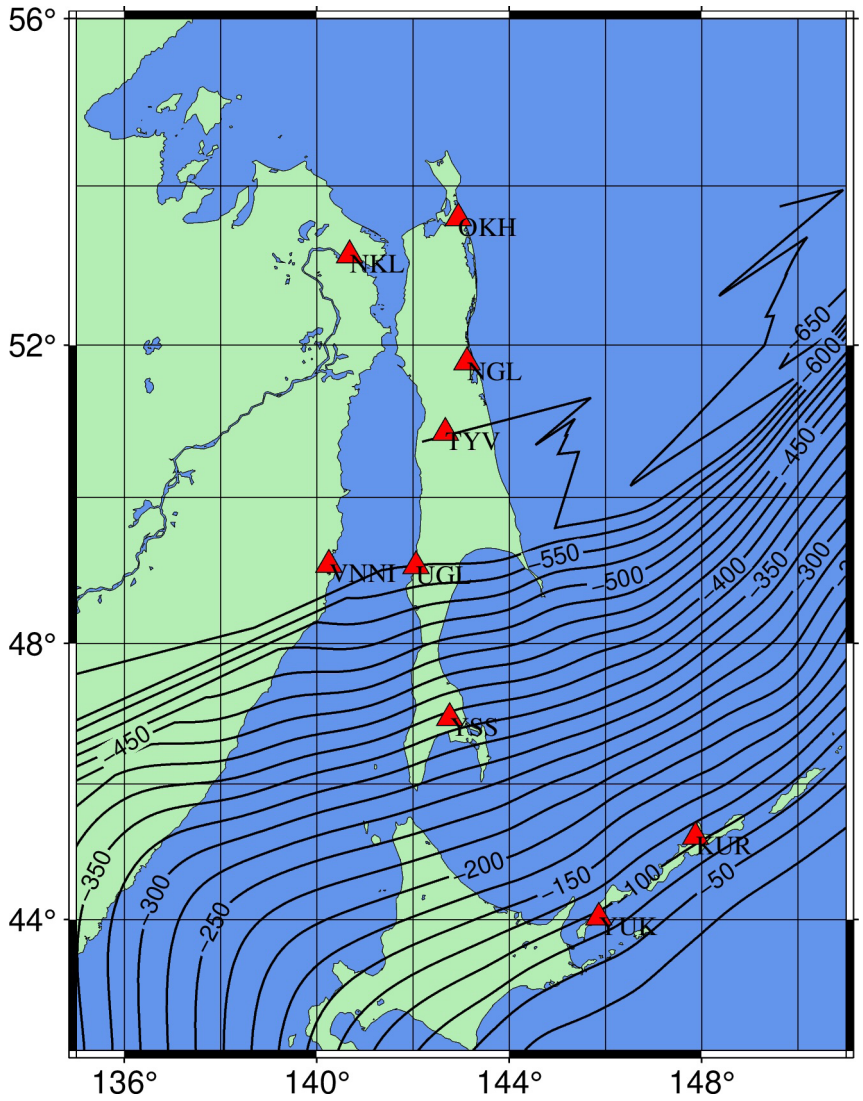


Рисунок 1. Карта региона исследований. Красными треугольниками показано расположение широкополосных сейсмических станций, данные которых проанализированы в работе. Изолиниями показана глубина залегания кровли слэба согласно глобальной модели [4].

Figure 1. Study region map. Broadband seismic stations used in this study are marked by red triangles. Contours indicate the depth of the slab surface according to the global model [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Винник Л.П.** Сейсмология приемных функций // Физика Земли. 2019. № 1. С. 16—27.

2. **Винник Л.П., Косарев Г.Л., Петерсен Н.В.** Передаточные функции мантии в дальневосточной зоне субдукции // Докл. РАН. 1997. Т. 353. № 3. С. 379–382.

3. **Goes S., Yu C., Ballmer M.D. et al.** Compositional heterogeneity in the mantle transition zone // Nature Review Earth & Environment. 2022. V. 3. P. 533–550. https://doi.org/10.1038/s43017-022-00312-w

4. **Hayes G.P., Moore G.L., Portner D.E., Hearne M., Flamme H., Furtney M., Smoczyk G.M.** Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model // Science. 2018. V. 362. P. 58-61. https://doi.org/10.1126/science.aat4723

5. **Helffrich G.** Topography of the transition zone seismic discontinuities // Rev. Geophys. 2000. V. 38. N 1. P. 141-158.

6. **Ishii T., Ohtani E.** Dry metastable olivine and slab deformation in a wet subducting slab // Nature Geoscience. 2021. V. 14. P. 526–530. https://doi.org/10.1038/s41561-021-00756-7.

7. **Ringwood A.E.** Phase transformations and their bearing on the constitution and dynamics of the mantle // Geochim. Cosmochim. Acta. 1991. V. 55. P. 2083-2110.

КАССИТЕРИТ КАК ИНДИКАТОР РАЗНОВОЗРАСТНЫХ ОЛОВОНОСНЫХ РУДНО-МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СИХОТЭ-АЛИНЯ

Н.В. Гореликова[1], В.В. Раткин[2], И.А. Чижова[1], В. Павловски-Глан[3], Б.И. Семеняк[2]

[1]Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, e-mail: nv-gorelikova@yandex.ru

[2]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

[3]Университет Жирона, Испания

Аннотация. На основе анализа базы геохимических данных — содержаний элементов-примесей в касситерите оловорудных месторождений — показана возможность использовать характеристику касситерита не только в оценке прогнозного потенциала месторождений, но также решать обратную задачу, где касситерит выступает как геохимический индикатор геодинамического режима формирования рудоносных магматических комплексов.

CASSITERITE AS AN INDICATOR OF DIFFERENT AGE TIN-BEARING ORE-MAGMATIC SYSTEMS OF SIKHOTE-ALIN

N.V. Gorelikova[1], V.V. Ratkin[2], I.A.Chizhova[1], V. Pawlowsky-Glahn[3], B.I. Semenyak[2]

[1]Institute of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moskow, e-mail: nv-gorelikova@yandex.ru, e-mail: nv-gorelikova@yandex.ru

[2]Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok

[3]University Girona, Spain

Abstract. Based on the analysis of the base of geochemical data - the contents of impurity elements in cassiterite of tin ore deposits, it is shown that it is possible to use the cassiterite characteristic not only in assessing the predictive potential of deposits, but also to solve the inverse problem, where cassiterite acts as a geochemical indicator of the geodynamic regime of the formation of ore-bearing magmatic complexes.

Как итог многолетнего изучения оловорудных месторождений ДВ региона РФ, изучен микроэлементный состав касситеритов типовых месторождений. По данным количественного спектрального анализа (содержания Sc, W, Nb, V, Cr, Be, Ti, Zr, Fe, Mn) охарактеризовано 900 мономинеральных фракций касситерита. Созданная геохимическая база использовалась в рамках традиционного формационного анализа оловорудных объектов. Однако прогностичность выполняемых обобщений была ограничена в силу отсутствия информации о характере и особенностях проявления рудоносного магматизма в меняющихся услових геодинамического режима развития территории.

Современные изотопно-геохимические данные указывают, что источники рудоносного гранитного магматизма связаны как с субдукцией, так и с трансформным режимом проскальзывания литосферных плит, с внедрением астеносферных диапиров в разрывы субдуцированной литосферы (слэб-виндоу). Представляется, что режим определяет прогнозный потенциал оловорудных месторождений. В развитии анализа базы геохимических данных постулируется, что элементы-примеси в касситерите и их сочетания могут выступать в качестве индикаторов геодинамического режима.

Выделяется несколько этапов оловоносного магматизма: 1) альб-ранний сеноман (100-93 млн лет) — *трансформная окраина (ороген)*, 2) поздний сеноман-маастрихт (93-65 млн лет) — *надсубдукционная окраина*, 3) палеоцен (65-57 млн лет) — *переходный режим (смена субдукции режимом трансформной окраины)* [2].

В процедуре совмещения геохимических данных и типизации геодинамических этапов формирования месторождений использованы два метода многомерной статистики.

Метод J. Aitchison (1986) представляет новый методологический подход для статистического анализа баз данных (CoDa). Этот метод использует отношения логарифмов или логарифмов-контрастов или линейные комбинации логарифмов компонент, которые играют роль проекций. В графическом виде представления баз данных (compositional bi-plot) каждый луч характеризует собой переменную в виде оси, где содержание компонента в образце тем выше, чем ближе точка к вершине луча.

В настоящей работе мы используем методологический подход, который является комбинацией классического дискриминантного анализа с геометрией Атчисона в симплексе. Основная идея метода — охарактеризовать структуру векторного пространства выборки (Pawlowsky-Glahn, 2003).

На рисунках 1 и 2 приведены результаты дискриминантного анализа.

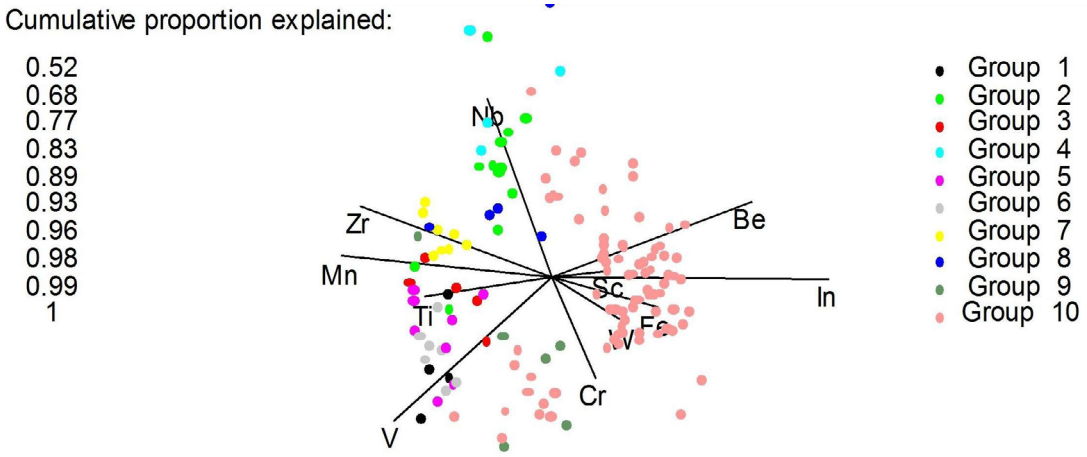


Рисунок 1. Векторная диаграмма микроэлементов в касситеритах.
Группы: 1- Фестивальное, 2-Перевальное; 3-5 – Высокогорское: 3 – 8-ая Восточная зона, 4 - Кулисная, 5 – Тектоническая; 6-10 – Арсеньевское: 6 – Подружка, 7 – Турмалиновая, 8 – Фельзитовая, 9 – Индукционная, 10 – Южная.

Figure 1. Vector diagram of trace elements in cassiterites.
Groups: 1-Festivalnoye, 2-Perevalnoye; 3-5 – Vysokogorskoye: 3 – 8th Eastern zone, 4 – Kulisnaya, 5 – Tektonicheskaya; 6-10 – Arsenievskoye: 6 – Podruzhka, 7 – Turmalinovaya, 8 – Felzitovaya, 9 – Induktsionnaya, 10 – Yuzhnaya.

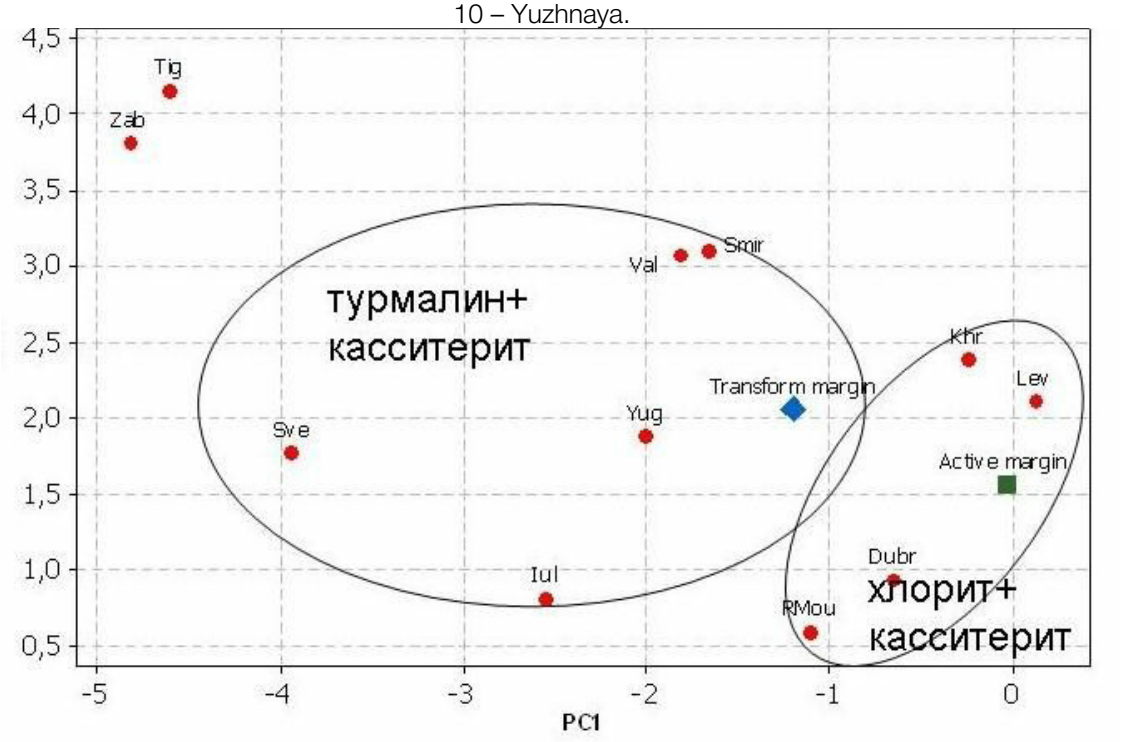


Рисунок 2. (PC1, PC2) plot центры стандартных объектов и изучаемых месторождений (трансформная окраина и надсубдукционная окраина). Месторождения: Zab – Забытое, Tig – Тигриное, Sve – Светлое, Iul – Иультин, Val –Валькумей,Yug –Южное RMou – Красная Гора, Dubr – Дубровское,, Smr –Смирновское, Khr –Хрустальное, Lev –Левицкое.

Figure 2. (PC1, PC2) plot centers of standard objects and studied deposits (transform margin and suprasubduction margin). Deposits: Zab – Zabytoye, Tig – Tigrinoye, Sve – Svetloye, Iul – Iultin, Val – Valkumei, Yug – Yuzhnoye RMou – Krasnaya Gora, Dubr – Dubrovskoye, Smr – Smirnovskoye, Khr – Khrustalnoye, Lev – Levitskoye.

В качестве второго математического метода в работе применен специальный алгоритм распознавания образов, основанный на изучении вариационных рядов и принципе общности свойств. Сущность метода состоит в разделении различных групп базы данных, описании испытуемых объектов и оценке степени их сходства и различия [1].

На графике (рис. 3) отчетливо выражены две группы разновозрастных оловорудных месторождений: сформированные в геодинамике трансформной континентальной окраины (ороген) альб-раннесеноманского возраста (Фестивальное и Высокогорское в части рудных зон); сформированные в геодинамике сеноман - маастрихтской субдукционной окраины (рудные зоны Индукционная и Южная Арсеньевского месторождения). Рудная зона Подружка, где совмещены руды орогенного и субдукционного этапа, имеет переходные характеристики. Касситериты зоны Фельзитовой, сформированной в палеоценовый этап (смена субдукционного режима трансформным), практически не отличимы от «субдукционных». Можно предполагать, что палеоценовый магматизм может наследовать особенности очагов предшествующего субдукционного этапа. Но есть также представления, что все месторождения концентра «хлорит+касситерит» на рисунке 2 сформированы в палеоцене. Это следует учитывать в прогнозных построениях.

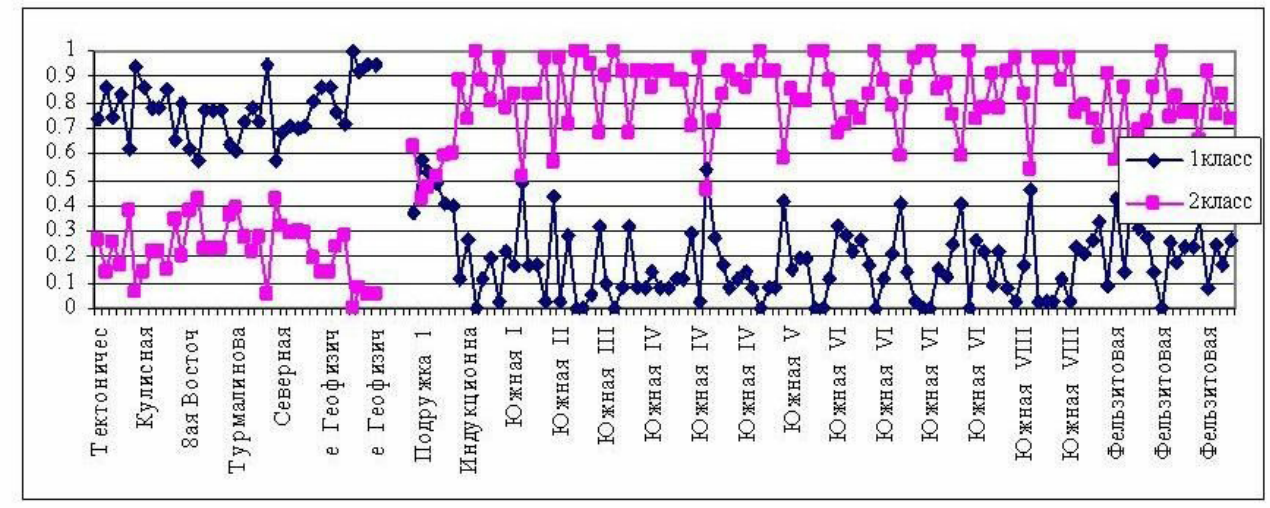


Рисунок 3. Геодинамическая типизация оловорудных месторождений Сихотэ-Алиня.
Высокогорское – зоны Тектоническая, Кулисная, 8-ая Восток, Северная. Фестивальное – зона Геофизическая.
Арсеньевское – зоны Подружка, Индукционная, Южная, Фельзитовая.

Figure 3. Geodynamic typification of the Sikhote-Alin tin ore deposits.
Vysokogorskoye – Tectonic, Kulisnaya, 8th Vostok, and Severnaya zones. Festivalnoye – Geophysical zone.
Arsenyevskoye – Podruzhka, Induktsionnaya, Yuzhnaya, and Felzitovaya zones.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Чижова И.А.** Логико-информационное моделирование при прогнозно-металлогеническом анализе перспективных площадей // Современные проблемы рудной геологии, петрологии, минералогии и геохимии. М.: ИГЕМ РАН, 2010. С. 59-84.

2. Ханчук А.И. Палеогеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока России // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 5-34.

3. Aitchison J. The statistical analysis of compositional data. Chapman & Hall, London (2nd edn 2003, The Blackburn Press, Caldwell, NJ, USA), 1986. P. 375–392.

4. Barcelo′-Vidal C. Mixturas de datos composicionales. [Mixtures of Compositional Data]. PhD thesis, Universitat Polite`cinica de Catalunya. Spain. 1996.

5. Gorelikova N., Tolosana- Delgado R., Pawlowsky- Glahn V., Khanchuk A. & Gonevchuk V. Discriminating geodynamical regimes of tin ore formation using trace element composition of cassiterite: the Sikhote'Alin case (Far Eastern Russia). 2006. P. 44-57.

ОТРАЖЕНИЕ ПАЛЕОТИХООКЕАНСКОЙ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ В ФОРМИРОВАНИИ МОНГОЛО-ОХОТСКОГО ОРОГЕННОГО ПОЯСА

И.М. Дербеко

Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
г. Благовещенск, e-mail: derbeko@mail.ru

Аннотация. Формирование Монголо-Охотского орогенного пояса (МООП) есть следствие закрытия одноимённого океанического бассейна (МОБ). По определению Л.М. Парфёнова с соавторами (1999), МООП является осевой структурой Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП). Значит, он является представителем палеоазиатской тектонической области. Но его восточное окончание — суть совмещения в пространстве и времени двух суперструктур: Центрально-Азиатского и Тихоокеанского подвижных поясов. Значит, восточное окончание МООП является Монголо-Охотским сектором Тихоокеанского складчатого пояса (МОСТСП), с завершением формирования которого завершилось формирование и ЦАСП.

REFLECTION OF PALEO-PACIFIC TECTONIC EVOLUTION IN THE FORMATION OF THE MONGOL-OKHOTSK OROGENIC BELT

I.N. Derbeko

Institute of Geology and Nature Management FEB RAS,
Blagoveshchensk, e-mail: derbeko@mail.ru

Abstract. The formation of the Mongol-Okhotsk orogenic belt (MOOB) is a consequence of the closure of the ocean basin of the same name (MOB). According to the definition of L.M. Parfenov et al. (1999), the MOOB is an axial structure of the Central Asian folded belt (CAOB). This means that it is a representative of the Paleo-Asian tectonic region. But its eastern end is a combination in space and time of two superstructures: the Central Asian and Pacific mobile belts. This means that the eastern end of the MOOB is the Mongolian-Okhotsk sector of the Pacific folded belt (MOSPB), with the completion of the formation of which the formation of the CAOB was also completed.

Завершение формирования Монголо-Охотского орогенного пояса стало завершающим этапом формирования Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) — крупнейшего фанерозойского аккреционного орогена Евразийского континента. По сути, формирование ЦАСП является одним из этапов эволюции Евразийского континента. Поскольку Центрально-Азиатский складчатый пояс является результатом закрытия Палеоазиатского

океана, можно утверждать, что Монголо-Охотский орогенный пояс (МООП) является следствием закрытия его рудимента, известного в литературе как Монголо-Охотский океанический бассейн (МОБ). Это означает, что МООП является представителем Палеоазиатской тектонической области. Пояс окружен палеозойскими структурами Центральной Азии. Но на востоке он представлен двумя совмещенными в пространстве и времени суперструктурми: Центрально-Азиатским и Тихоокеанским складчатыми поясами. Поэтому его восточным окончанием является Монголо-Охотский сектор Тихоокеанского складчатого пояса. Проблема заключается в том, чтобы установить, какая часть пояса эволюционировала в зависимости от геодинамических процессов, происходящих в акватории Тихого океана, а какая сопутствовала эволюции ЦАСП.

Формирование МООП завершилось в конце мезозоя в результате закрытия МОБ, основанием которого является офиолитовый комплекс среднего ордовика. С временными перерывами океанический бассейн пополнялся осадочными и вулканогенными образованиями. Осадконакопление завершилось в аалене, а в байосе началось воздымание океанического дна. Нарушение его целостности формирует серию тектонических блоков, которые в литературе описываются как террейны [3]. Согласно полученным данным [2], структуре ВФ МООП принадлежат террейны: Тукурингра-Джагдинский, Ниланский, Тугурский и Ульбанский (условно), так как они родственны по вещественному составу, периодам осадконакопления, идентичным органическим остаткам. Ульбанский террейн по времени накопления осадков (T_3-J) близок к ним, но его образования сопоставимы с глубинными океаническими породами, а в акватории МОБ в этот период накапливаются осадки мелководных фаций. Ланской и Галамский террейны, Баладекский выступ являются составляющими южного обрамления Сибирского кратона [2]. Формирование террейнов, а фактически раскол океанического дна МОБ, связано с пульсационным встречным движением двух кратонов: Сибирского и Северо-Китайского, что провоцировало синхронную субдукцию пород МОБ под кратоны и их обрамление. Субдукционные сценарии сопровождались формированием надсубдукционных магматических комплексов в интервале 149-122 млн лет. [5]. Почти сразу, 119-97 Ма, начинается коллизионный этап в эволюции ВФ МООП. Он фиксируется по появлению бимодальных магматических комплексов [4], что привело к окончательному формированию орогена. Но все эти магматические комплексы ограничены в распространении на восток: в северном обрамлении — структурами Охотско-Корякского орогенного пояса (ОКОП), а в южном — структурой Бурея-Цзямусинского супертеррейна (БЦС).

В северном обрамлении в позднем триасе закладывается преддуговой прогиб — Торомский бассейн. В настоящее время он представлен разрозненными бассейнами: Торомским, Удским, Унья-Бомским и Малотындинским. Их

разрезы характеризуются идентичными фаунистическими остатками, синхронными перерывами в осадконакоплении. Начиная с границы ранняя – средняя юра, эволюция Торомского бассейна зависела от формирования УМВС. А прекращение осадконакопления в Торомском бассейне произошло с началом формирования Селитканской вулканической структуры (СВС) 105–101 млн лет назад [1]. Обе структуры формировались за пределами восточного окончания МООП на образованиях южного обрамления Сибирского кратона и являются составляющими ОКОП, становление которого зависело от эволюции тихоокеанской акватории. В аналогичных геодинамических условиях формировалась СВС. Эволюция этих структур есть результат последовательных во времени субдукционных процессов Палеотихоокеанской океанической коры под южное – юго-восточное обрамление Сибирского кратона. Этот временной этап в южном обрамлении восточного окончания МООП отличается геодинамическими событиями. По данным S. Maruyama, T. Seno (1986), около 135 млн лет назад произошло резкое изменение направления (на 50°) и скорости (с 5.3 до 30 см/год) субдукции плиты Изанаги под восточную окраину ещё разрозненного Азиатского континента. Это отразилось не только в пространственном положении БЦС, но и в формировании серии зон растяжения — рифтогенных впадин. Они заполнялись вулканогенно-осадочной толщей с возрастом 135 Ма. Магматиты известково-щелочной – щелочной серии сопоставимы с гранитоидами А-типа. В интервале 120–105 Ма рифтогенные впадины заполнялись вулканогенно-осадочными породами (андезитового состава). Показано [6], что формирование пород этого комплекса происходило в результате плавления океанической коры, контаминирования континентальной коры, преобразования мантийного клина под воздействием флюидов. Глубина формирования магмы, продуцирующей вулканиты с возрастом 120–105 Ма, составляет более 30 км. На севере БЦС вулканиты аналогичного возраста (111–105 Ма) образуют поле субширотного простирания на границе БЦС и МООП. Они согласно залегают на угленосных апт-альбских образованиях. Терригенная составляющая этих осадков насыщена туфовым материалом, что говорит об одновременном осадконакоплении. По соотношению ряда некогерентных элементов эти породы сопоставимы с островодужными вулканитами Курильской островной дуги. Глубина формирования магмы, продуцирующей вулканиты с возрастом 111–105 Ма, составляет 10 км и менее.

По данным [7], субдукционные процессы и присоединение БЦС к Южномонгольско-Хинганскому орогенному поясу (Сунляо-Силиньхот в Китае) произошло в J_2, после чего произошёл переход БЦС из палеоазиатской тектонической области к палеотихоокеанской. И эти процессы были связаны с западной субдукцией Палеотихоокеанской плиты (Изанаги). Но период J_{2-3} не отражён в каких-либо магматических процессах на территории БЦС. Поэтому предложенная схема не объясняет, почему, начиная с границы валанжин-

готерив (135 млн лет назад) и до альба включительно, здесь происходили интенсивные магматические события. Значит, субдукционный сценарий существовал в интервале 120–105 Ma и сопровождался формированием на территории БЦС надсубдукционных магматических комплексов активных континентальных окраин и островной дуги.

Вывод. Согласно представленному тектоническому районированию ВФ МООП, он делится на два сектора (рис. 1): Палеоазиатский (от 120 до 130 меридиана) и Палеотихоокеанский (от 130 до 140 меридиана). Установлено, что в северном обрамлении Палеотихоокеанского сектора пояса геодинамическая обстановка определяется субдукционными сценариями, характерными для зон активных континентальных окраин. В южном обрамлении происходили более сложные геодинамические сценарии.

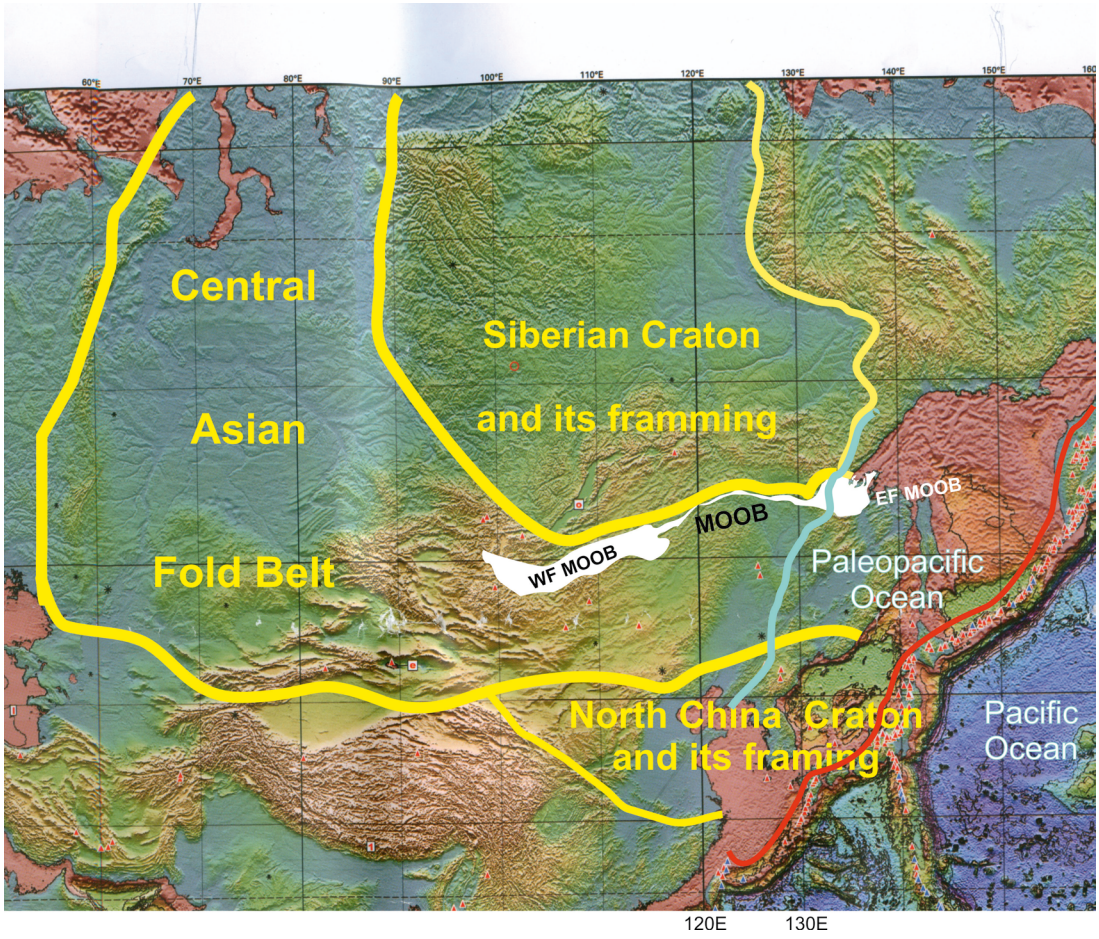


Рисунок 1. Пространственное положение Монголо-Охотского орогенного пояса среди основных структур региона на карте масштаба 1:50 000 000 (Bouysse F, 2009). Голубая линия — граница влияния Палеотихоокеанской акватории.

Figure 1. Spatial position of the Mongol-Okhotsk orogenic belt among the main structures of the region on a map at a scale of 1:50,000,000 (Bouysse F, 2009). The blue line is the boundary of influence of the Paleo-Pacific Ocean area.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дербеко И.М.** Схема формирования магматических комплексов Селитканской вулканоплутонической зоны восточного фланга Монголо-Охотского орогенного пояса (Россия) по геохимическим данным // Геохимия. 2009. № 11. С. 1155-1172.

2. **Дербеко И.М.** Тектоническое районирование северной границы восточного фланга Монголо-Охотского орогенного пояса. Вопросы геологии и комплексного изучения экосистем Восточной Азии. Благовещенск: ИГиП ДВО РАН, 2024. С. 4-7.

3. **Парфенов Л.М., Попеко Л.И., Томуртогоо О.** Проблемы тектоники Монголо-Охотского орогенного пояса // Тихоокеанская геология. 1999. Т.18. № 5. С. 24-43.

4. **Derbeko I.** Bimodal Volcano-Plutonic Complexes in the Northern Frames of Eastern Section of Mongol-Okhotsk Orogenic Belt // Journal of Earth Science and Engineering. 2012. V. 2. N 2. P. 84-96.

5. **Derbeko I. M.** Late Mesozoic Granitoid Magmatism in the Evolution of the Eastern Flank of the Mongol-Okhotsk Orogenic Belt (Russia) // Minerals. 2022. V. 12. N 11. P.1374.

6. **Derbeko I.M., Ponomarchuk V.A., Chugaev A.V., Travin A.V., Ponomarchuk A.V.,** Correlation of Andesite Complexes in the Southern Framing of the Eastern part of the Mongol-Okhotsk Orogenic Belt according to Geochronological, Geochemical, and Isotope-Geochemical Data // Russ. Geol. Geophys. 2020. V. 61. N 10. P. 1109–1120.

7. **Liu Y., Li W., Ma Y., Feng Z., Guan Q., Li S., Chen Z., Liang C., Wen Q.** An orocline in the eastern Central Asian Orogenic Belt // Earth-Science Reviews. 2021. V. 221. P. 103808

СТРУКТУРА МАГНИТОАКТИВНОГО СЛОЯ АМУРСКОЙ ЛИТОСФЕРНОЙ ПЛИТЫ

А.Н. Диденко[1,2], М.Ю. Носырев[2], Г.З. Гильманова[2]

[1]Геологический институт РАН, г. Москва,
e-mail: alexei_didenko@mail.ru

[2]Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск

Аннотация. Построена карта подошвы магнитоактивного слоя Амурской плиты (CPD), отождествляемая с изотермой 578 °С — температура точки Кюри магнетита. На карте выделяются три основные области: 1) северо-восточная С-В простирания с CPD 25-20 км, охватывающая акваторию Жёлтого моря, Корейский полуостров и Японское море; 2) центральная ВСВ простирания с CPD 30-38 км. Увеличенная мощность слоя связана с развитием здесь позднепалеозойских и мезозойских осадочных бассейнов: Ерлянь, Сунляо и Среднеамурский; 3) северная субширотного простирания, где наблюдаются четыре ареала повышенных значений CPD 13-22 км. Три из них на западе и востоке пространственно совпадают с позднепалеозойским Ангаро-Витимским и мезозойскими Хэнтейским и Дуссе-Алиньским гранитоидными батолитами. В центральной части зоны в районе Токийского Становика зафиксированы вулканические постройки, сложенные позднекайнозойскими щелочными базальтоидами с мантийными включениями.

THE STRUCTURE OF THE MAGNETICALLY ACTIVE LAYER OF THE AMUR LITHOSPHERIC PLATE

A.N. Didenko[1,2], M.Y. Nosyrev[2], G.Z. Gilmanova[2]

[1]Geological Institute RAS, Moscow, e-mail: alexei_didenko@mail.ru

[2]Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk

Abstract. A map of the Curie Point Depth (CPD) for the Amur Plate's magnetoactive layer has been constructed, corresponding to the 578 °C isotherm — the Curie temperature of magnetite. The map reveals three main distinct regions: 1) Northeastern (NE trend) with CPD 25-20 km, encompassing the Yellow Sea, Korean Peninsula, and Sea of Japan; 2) Central (ENE trend) with deeper CPD 30-38 km. The increased layer thickness is associated with Late Paleozoic and Mesozoic sedimentary basins in this area: the Erlian, Songliao, and Middle Amur basins; 3) Northern (sub-latitudinal trend) showing four areas with elevated CPD to 13-22 km. Three of these areas in the western and eastern parts spatially correlate with the Late Paleozoic Angara-Vitim and Mesozoic Khentei and Dusse-Alin

granitoid batholiths. In the central part of this zone, within the Tokiysky Stanovik area, volcanic structures composed of Late Cenozoic alkaline basalts with mantle xenoliths have been identified.

Определение нижней границы магнитоактивного слоя (глубина температуры Кюри/Curie Point Depth – CPD) и всей структуры литосферного магнитоактивного слоя на основе спектрального анализа аномального магнитного поля является одной из составляющих общего комплекса глубинных исследований. Расчет и интерпретация CPD важны как с точки зрения структурно-тектонических построений, так и в связи с изучением мантийного теплового потока Земли. Нам представляется актуальной разработка модели CPD территории Амурской плиты и ее обрамления для оценки проявления ее границ с точки зрения изменения нижней границы магнитоактивного слоя, оценки особенностей пространственного распределения данного параметра в связи с тектоническим строением территории и некоторыми глубинными характеристиками.

На первых глобальных моделях тектонических плит Амурская литосферная плита не выделялась, и ее территория полностью относилась к большой Евразийской плите, например NUVEL-1A [3]. Хотя о наличии Амурской плиты было уже указано Л.П. Зоненшайном с соавторами сначала в небольшой «докладовской» статье, а затем уже в монографии [2], где на базе обширного геолого-геофизического материала аргументировано доказано ее существование. Впоследствии во всех глобальных моделях тектонических плит 21 века Амурская литосферная плита уже присутствует, и, хотя со времени её выделения как самостоятельного геодинамического объекта прошло уже почти 50 лет, до сих пор имеются разногласия в определении её границ. Существуют как минимум 10 вариантов границ Амурской плиты (более подробно см. [1, 4]).

В качестве основы для расчета границ магнитоактивного слоя Амурской плиты и прилегающих территорий была выбрана модель EMAG2v3 аномального магнитного поля Земли на высоте 4 км над поверхностью геоида [5], представляющая собой грид с разрешением 2′, скомпилированный из данных спутниковых, аэро и морских магнитных съемок (74.4 млн точек). Одной из отличительной от предыдущих моделей особенностью, важной для расчета CPD, является отражение в EMAG2v3 высоких по интенсивности магнитных аномалий в холодной континентальной литосфере.

Для проведения расчетов CPD в земной коре и верхней части литосферы Амурской плиты из EMAG2v3 был «вырезан» участок, существенно превосходящий по площади Амурскую плиту. Это было сделано для устранения краевых эффектов при расчете CPD у границ плиты. Анализируемый грид содержит 1295981 точку, единственное «белое» пятно – это территория Северной Кореи, для которой нет данных.

Аномальное магнитное поле территории Амурской плиты неоднородно и отражает крупные тектонические единицы региона в соответствии с магнитными свойствами слагающих их пород. Величина поля меняется в диапазоне от -637 до +1366 нТл, имеет размах порядка 700 нТл, без учета локальных положительных магнитных аномалий на железорудных месторождениях. Пониженным и слабо дифференцированным магнитным полем выделяются осадочные террейны орогенных поясов, мезо-кайнозойские наложенные прогибы и впадины, выполненные немагнитными осадками. Краевые части кратонов и древние блоки в Центрально-Азиатском поясе характеризуются знакопеременным магнитным полем, где положительные магнитные аномалии связаны как с древними метаморфизованными магматическим породами основного и ультраосновного состава, так и поздними интрузиями основного состава. Ориентировка аномальных зон в магнитном поле преимущественно северо-восточная. При этом наблюдается два основных азимута простирания — примерно 30 и 60 градусов. Положительные магнитные аномалии этих направлений имеют протяженность от сотен до тысячи км при ширине 100-200 км.

Расчеты проводились в предположении случайного распределения намагниченных масс методом центроида [6] с определением их верхней и нижней границ. Выбор данного метода обусловлен, в первую очередь, отсутствием каких-либо требований к предварительному знанию намагниченности среды. На начальном этапе, учитывая большую протяженность изучаемой площади с севера на юг, была проведена редукция магнитного поля к полюсу. Затем вся изучаемая территория была разбита на квадраты 200х200 км, для которых выполнялся расчет глубин нижней границы магнитоактивного слоя. Шаг окна по долготе составлял 100 км (т.е. с 50% перекрытием), по широте — 200 км. Результаты расчета относились к центру окна. Последующие действия для каждого листа включали в себя следующие операции: 1) расчет среднего кругового энергетического спектра для каждого листа выполнялся на основе реализации быстрого преобразования Фурье; 2) вычисление спектров для оценки глубин центра, кровли и подошвы магнитного тела проводилось согласно [6]; 3) так как модель магнитного поля [5] рассчитана для высоты 4 км над поверхностью геоида, для приведения к истинной глубине в расчетные данные вводилась поправка.

Расчеты глубин магнитных источников Амурской плиты показали следующее:

1) абсолютные отметки кровли магнитоактивного слоя варьируются от 4 до 15 км при среднем 10±2 км. Минимальные глубины кровли наблюдаются для южной части плиты в пределах Японского моря; 2) абсолютные отметки подошвы магнитоактивного слоя варьируются от 15 до 38 км при среднем 25±5 км. Максимальные глубины подошвы наблюдаются для центральной (бассейн Сунляо, Малый Хинган) и юго-восточной (Японские острова) частей плиты.

Наиболее приподнятые участки подошвы (поверхности Кюри) наблюдаются на северо-западном, северном и восточном участках — зонах взаимодействия Амурской плиты с Тихоокеанской на востоке и Евразийской на северо-западе и севере плитами; 3) мощность магнитоактивного слоя варьируется от первых километров до 30 км при среднем 14±6 км. Наибольшие и наименьшие мощности слоя хорошо коррелируют с глубиной его подошвы. Наибольшая – в центральной и юго-восточной, наименьшая – в северо-западной, северной и восточной частях плиты.

В итоге, на основании рассчитанных глубин была построена карта CPD, которая отождествляется нами с изотермой 578 °C — температурой точки Кюри магнетита. На карте отчетливо выделяются три области:

1) зона СВ простирания со значениями CPD 25-20 км — Желтое море – Корейский полуостров – Японское море. Территория фундамента Корейского полуострова сложена докембрийскими породами и относится к Северо-Китайской платформе, тогда как раскрытие Японского моря началось в среднем миоцене путем откола и вращения против часовой стрелки (roll-back механизм) северо-восточного сегмента Японской островной дуги;

2) центральная зона ВСВ простирания со значениями CPD 30-38 км. Большая глубина параметра связана с наличием здесь позднепалеозойского и мезозойских осадочных бассейнов Ерлянь, Сунляо и Среднеамурский. На генерализованной тектонической схеме также хорошо видна зона северо-восточного простирания, сформированная осадочными бассейнами – Хубей на юге, Сунляо и Среднеамурский на севере;

3) северная зона субширотного простирания со значениями CPD 13.4-22 км, в пределах которой видны четыре ареала повышенных значений CPD. На западе и востоке три ареала пространственно совпадают с позднепалеозойским Ангаро-Витимским и мезозойскими Хэнтейским и Дуссеалиньским гигантскими гранитоидными батолитами. Образование в этих трех ареалах гигантских масс гранитоидов связано, вероятно, с закрытием Монголо-Охотского палеоокеана. Подтверждением этому может быть пространственное совпадение минимальных глубин CPD в северной зоне с раннекиммерийским на западе и позднекиммерийским на востоке орогенными поясами, маркирующими закрытие западной и восточной частей Монголо-Охотского палеоокеана соответственно. В центре этой зоны повышенных глубин CPD в районе Токийского Становика установлены так называемы мантийные фидерные структуры, отождествляемые с мантийным плюмом. Подтверждением этому могут быть вулканические постройки в районе Токийского Становика, выполненные щелочными базальтоидами с возрастом 0.3-7.9 млн лет. Можно утверждать, что особенности рисовки карты CPD Амурской плиты, выполненные в настоящей работе, находят вполне приемлемое объяснение при сопоставлении с тектоническим строением региона.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00023-П (https://rscf.ru/project/22-17-00023/). Базовое финансирование за счет субсидий на выполнение государственных заданий ГИН РАН (тема № FMMG-2023-0010) и ИТиГ ДВО РАН (темы НИР № 121021000095-1, № 121021000094-4).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ашурков С.В., Саньков В.А., Мирошниченко А.И. и др.** Кинематика Амурской плиты по данным GPS-геодезии // Геология и геофизика. 2011. Т. 52 № 2. С. 299-311.

2. **Зоненшайн Л. П., Савостин Л. А.** Введение в геодинамику. М.: Недра, 1979. 311 с.

3. **DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F. et al.** Current plate motions // Geophys. J. Int, 1990. V. 101. P. 425-478.

4. **Li S.H., Li C., Wang C-X.** Boundaries of the Amurian Plate identified using multiple geophysical methods // Geosciences Journal. 2019. V. 24. P. 49-59. https://doi.org/10.1007/s12303-019-0011-1

5. **Meyer B., Saltus R., Chulliat A.** EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). Version 3. NOAA National Centers for Environmental Information. 2017. https://doi.org/10.7289/V5H70CVX

6. **Tanaka A., Okubo Y., Matsubayashi O.** Curie point depth based on spectrum analysis of the magnetic anomaly data in East and Southeast Asia // Tectonophysics. 1999. V. 306, Iss. 3–4. P. 461–470. https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00072-4

СВИДЕТЕЛЬСТВА СОБЫТИЙ ГРЕНВИЛЬСКОГО ВОЗРАСТА НА ЗАПАДНОЙ ОКРАИНЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА НА ПРИМЕРЕ ГРАНИТОИДОВ РЯЗАНОВСКОГО МАССИВА (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)

И.И. Лиханов[1], А.Д. Ножкин[1], О.М. Туркина[1], Ю.Л. Ронкин[2]

[1]Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск,
e-mail: likh@igm.nsc.ru

[2]Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург

Аннотация. Получены новые данные по петрогеохимическому составу, особенностям петрогенезиса, U-Pb возрасту циркона, Sr и Nd изотопным параметрам пород Рязановского гранитоидного массива, расположенного вблизи Приенисейской зоны разломов Енисейского кряжа. Формирование этих гранитов на рубеже мезо-неопротерозоя (1013±9.9 млн лет) отвечает раннему этапу орогении гренвильского возраста на юго-западе Сибирского кратона.

EVIDENCE OF GREENVILLE AGE EVENTS AT THE WESTERN MARGIN OF THE SIBERIAN CRATON ON EXAMPLE OF GRANITOIDS FROM THE RYAZANOVSKY MASSIF (YENISEI RIDGE)

I.I. Likhanov[1], A.D. Nozhkin[1], O.M. Turkina[1], Yu.L. Ronkin[2]

[1]Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk,

e-mail: likh@igm.nsc.ru

[2]Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, Ekaterinburg

Abstract. New data were obtained on the major- and trace-element composition, petrogenesis features, U-Pb age of zircon, Sr and 147Sm-143Nd isotopic parameters for the rocks of the Ryazanovsky granitoid massif located near the Yenisei fault zone of the Yenisei Ridge. The formation of these granites at the Meso-Neoproterozoic boundary (1013 ± 9.9 Ma) corresponds to the early stage of the Grenville age orogeny at the western margin of the Siberian craton.

На основании имеющихся в литературе представлений о низкой эндогенной активности в геологической эволюции Земли в интервале между 1.8 и 0.75 млрд лет, известных как скучный миллиард, в ряде работ был сделан вывод об отсутствии на Енисейском кряже (ЕК) коллизионных событий гренвильского возраста, заключительные стадии деформации которого имели возраст 1.2-0.9 млрд лет. Это привело к противоречивой

трактовке вопросов геологической эволюции региона, что связано с дефицитом геохимических данных и возрастных датировок. В докладе обсуждаются особенности происхождения пород Рязановского массива и геохронологические свидетельства ранненеопротерозойских событий в эволюции ЕК.

По своему петрохимическому составу этот массив, расположенный в нижнем течении р. Кия (правый приток р. Енисей), имеет все признаки натрий-калиевых геохимически дифференцированных гранитных массивов, состав которых эволюционирует от гранитов до субщелочных гранитов и лейкогранитов.

Графическая интерпретация U-Pb LA-ICP-MS конкордантых данных для 12 кристаллов циркона, отобранных из субщелочного лейкогранита — 1011.4±7.9 млн лет; результаты расчета средневзвешенных значений конкордантных U-Pb возрастов с помощью четырех алгоритмов показывают возраст 1013.0±9.9 млн лет, который принят в качестве оценки времени формирования гранитов Рязановского массива (рис. 1).

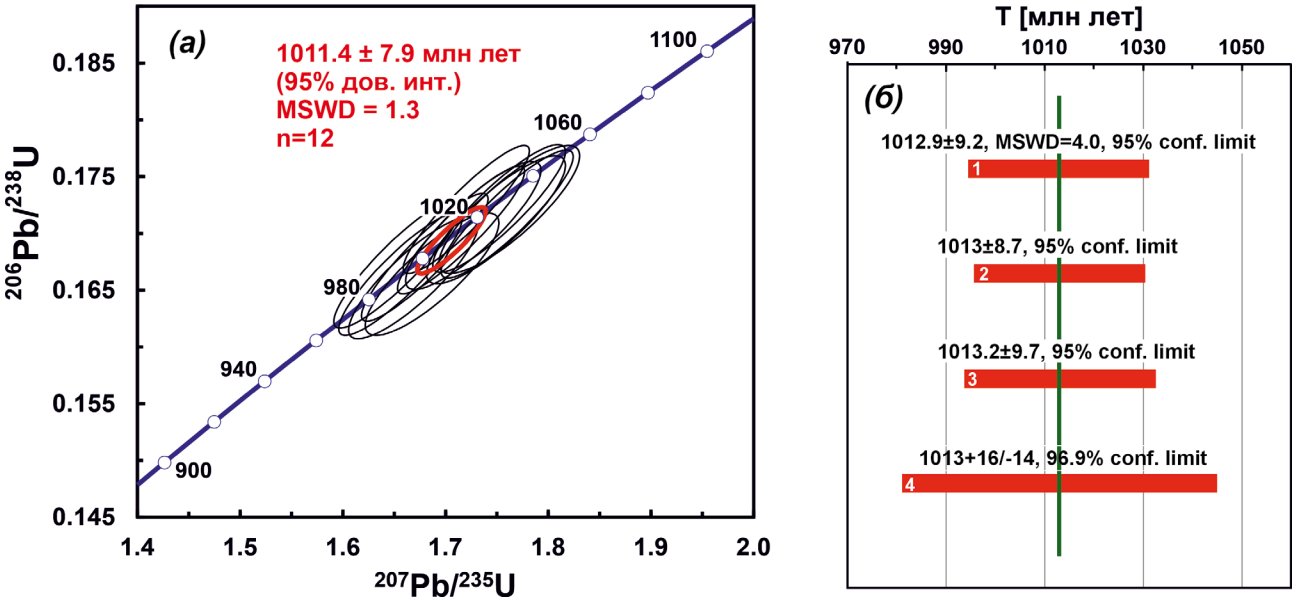


Рисунок 1. Графическая интерпретация U-Pb LA ICP MS данных для циркона из гранитов Рязановского массива (обр. А-314-83). а) U-Pb график с конкордией, без учета неопределенностей константы распада (n=12); б) U-Pb конкордантный возраст 1013.0±9.9 [0.97%] 95% conf. lim., MSWD = 0.00017).

Figure 1. Graphic interpretation of U-Pb LA ICP MS data for zircon from granites of the Ryazanovsky massif (sample A-314-83). a) U-Pb plot with concordia, without taking into account the uncertainties of the decay constant (n=12); b) U-Pb concordant age 1013.0±9.9 [0.97%] 95% conf. lim., MSWD = 0.00017).

Рассмотрение Rb-Sr ID-TIMS изотопной сигнатуры этих образцов в координатах $^{87}Rb/^{86}Sr$ – $^{87}Sr/^{86}Sr$ выявляет эволюционную зависимость с наклоном = $\exp(\lambda_{87}*t)-1)=0.01562$, соответствующим возрасту 1091±55 млн лет. На этом же графике представлена линия согласования с U-Pb LA-ICP-MS возрастом t=1013 млн лет и наклоном = $\exp(\lambda_{87}*t)-1)=0.01449$. Относительно

высокое значение первичного изотопного отношения $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$=0.7124±0.0036 свидетельствует о существенной роли корового компонента в формировании расплава, что находит свое подтверждение и в величинах $\varepsilon_{Nd}(t)$, равных -5.0 – -4.8.

Концентрации Sm и Nd в исследованных образцах гранитов ограничены интервалом 5.3–6.8 г/т, 31–40 г/т, при этом вариации величин $^{147}Sm/^{144}Nd$ и $^{147}Nd/^{144}Nd$ составляют всего лишь 1.6% и 0.003%, что в конечном итоге определяет близость T_{DM} 1902, 1910 млн лет, соответственно. Вычисленные с учетом tU-Pb (1013 млн лет) двухстадийные оценки модельного возраста также практически совпадают (2069, 2057 млн лет) (рис. 2). Поскольку U-Pb возраст гранитов Рязановского массива значимо меньше Nd модельных датировок, последние следует интерпретировать «усредненным» смешанным источником, имеющим как минимум раннепротерозойский возраст.

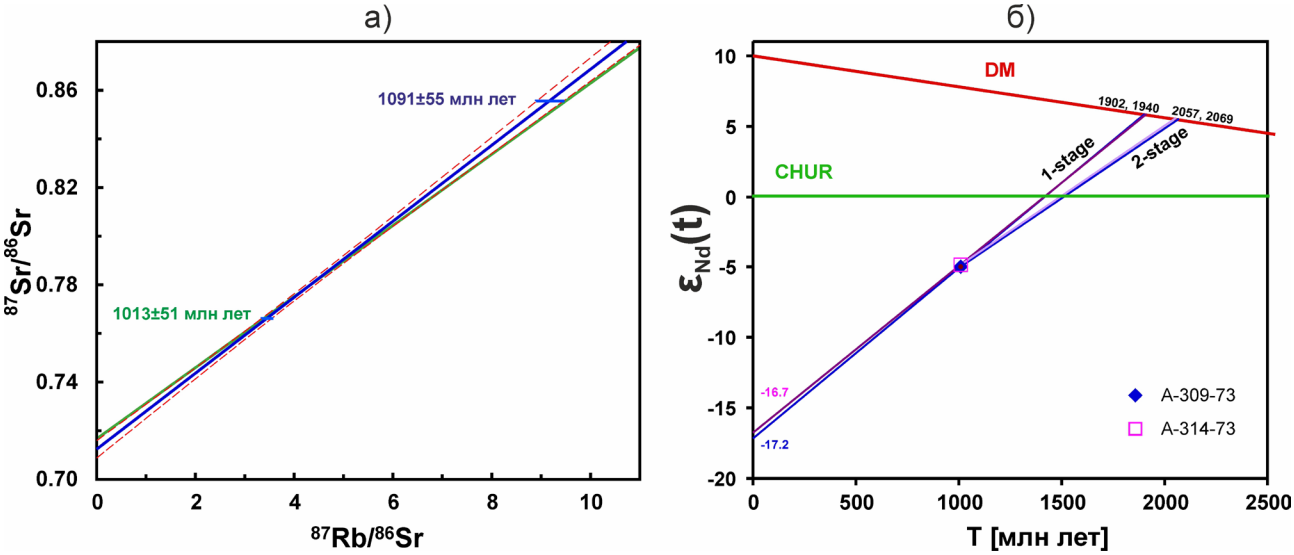


Рисунок 2. (а) Rb-Sr эволюционная диаграмма (синим цветом) и (б) эволюция ^{147}Sm-^{143}Nd изотопной системы для гранитов А-309-73 и А-314-73 Рязановского массива. 1-stage, 2-stage, 1902, 1940, 2057, 2069 — линии эволюции по одностадийной и двухстадийной Nd модели и соответствующие возраста (в млн лет).

Figure 2. (а) Rb-Sr evolution diagram (blue) and (б) evolution of the ^{147}Sm-^{143}Nd isotope system for granites A-309-73 and A-314-73 of Ryazanovsky massif. 1-stage, 2-stage, 1902, 1940, 2057, 2069 - evolutionary lines according to the one-stage and two-stage Nd model and the corresponding ages (in Ma).

Становление гранитоидов Рязановского массива на рубеже мезо- и неопротерозоя (1013±9.9 млн лет) отвечает раннему этапу орогенеза гренвильского возраста на юго-западе Сибирского кратона. В пределах ЕК в качестве возрастных аналогов процессов гренвильской складчатости также рассматриваются гранитогнейсовые купола, гранитоиды Гаревского комплекса, метапелиты низких/умеренных давлений и тектониты Северо- и Южно-Енисейского кряжа, а также метабазиты Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса [1-7].

Геодинамическая история региона сопоставляется с синхронной последовательностью и схожим стилем тектоно-термальных событий по

периферии крупных докембрийских кратонов Лаврентии и Балтики, что подтверждает палеоконтинентальные реконструкции о вхождении Сибирского кратона в состав ядра суперконтинента Родинии [8]. Представленные свидетельства позволяют разрешить ряд противоречий в трактовке ключевых вопросов геологии региона, например, ранние предположения об отсутствии на ЕК орогенных событий гренвильского возраста.

Работа выполнена за счет средств РНФ (проект № 21-77-20018-П).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лиханов И.И.** Свидетельства гренвильских и вальгальских тектонических событий на западной окраине Сибирского кратона (Гаревский метаморфический комплекс, Енисейский кряж) // Петрология. 2023. Т. 31. № 1. С. 49-80.

2. **Лиханов И.И., Зиновьев С.В., Козлов П.С.** Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского кряжа (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // Геотектоника. 2021. Т. 55. № 1. С. 41-65.

3. **Лиханов И.И., Ножкин А.Д., Ревердатто В.В., Козлов П.С.** Гренвильские тектонические события и эволюция Енисейского кряжа, западная окраина Сибирского кратона // Геотектоника. 2014. Т. 48. № 5. С. 32-53.

4. **Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Вершинин А.Е.** Тейский полиметаморфический комплекс в Заангарье Енисейского кряжа – пример совмещенной зональности фациальных серий низких и умеренных давлений // Докл. АН. 2011. Т. 436. № 4. С. 509-514.

5. **Kontorovich A.E., Khomenko A.V., Burshtein L.M., Likhanov I.I., Pavlov A.L., Staroseltsev V.S., Ten A.A.** Intense basic magmatism in the Tunguska petroleum basin, eastern Siberia, Russia // Petroleum Geoscience. 1997. V. 3. Pt. 4. P. 359-369.

6. **Likhanov I.I.** Provenance, Age and Tectonic Settings of Rock Complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): Geochemical and Geochronological Evidence // Geosciences (Switzerland). 2022. V. 12. N 11. Art. 402.

7. **Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyansky O.P., Sheplev V.S., Kolobov V.Y.** The Nature and Models of Metamorphism. Cham: Springer, 2019. 330 p.

8. **Torsvik T.H.** The Rodinia Jigsaw Puzzle // Science. 2003. V. 300. P. 1379-1381.

ЗОНА ФОРЛАНДА БАЙКАЛО-ПАТОМСКОГО НАДВИГОВОГО ПОЯСА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ: ВЛИЯНИЕ НА ФОРМИРОВАНИЕ УГЛЕВОДОРОДНЫХ И ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Н.В. Мисюркеева, А.Г. Вахромеев

Институт Земной коры СО РАН, г. Иркутск, e-mail: mnv@crust.irk.ru

Аннотация. В докладе рассматривается комплексное влияние зоны форланда Байкало-Патомского надвигового пояса Сибирской платформы на формирование углеводородных и гидроминеральных систем Ангаро-Ленской и Непско-Ботуобинской нефтегазоносных областей. Установлено, что закрытие Палеоазиатского океана в позднем палеозое и последующее надвигообразование создали уникальные предпосылки для формирования ловушек в осадочном чехле и благоприятные термобарические условия для генерации углеводородов. Особое значение имела кайнозойская тектоническая активизация, которая определила современное распределение углеводородных и гидроминеральных залежей, способствуя перераспределению флюидов, формированию современных аномальных пластовых давлений.

Полученные в последние годы геолого-геофизические данные позволили подтвердить, что надвиги играют ключевую роль в формировании и контроле углеводородных скоплений и локализации редкометалльных рассолов в краевой части юга Сибирской платформы.

FORELAND ZONE OF THE BAIKAL-PATOM THRUST BELT OF THE SIBERIAN PLATFORM: INFLUENCE ON THE FORMATION OF HYDROCARBON AND HYDROMINERAL SYSTEMS

N.V. Misyurkeeva, A.G. Vakhromeev

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, e-mail: mnv@crust.irk.ru

Abstract. The report examines the complex influence of the Foreland zone and the Baikal-Patom thrust belt of the Siberian Platform on the formation of hydrocarbon and hydromineral systems of the Angara-Lena and Nepa-Botuobin oil-gas area. It has been established that the closure of the Paleo-Asian Ocean in the Late Paleozoic and the subsequent overthrusting created unique conditions for the formation of traps in the sedimentary cover and favorable thermobaric conditions for hydrocarbon generation. Of particular importance was the Cenozoic tectonic activation, which determined the modern distribution of hydrocarbon and hydromineral deposits, contributing to the redistribution of fluids and the formation of modern anomalous reservoir pressures.

The geological and geophysical data obtained in recent years have confirmed that thrusts play a key role in the formation and control of hydrocarbon accumulations and the localization of rare metal brines in the edge of the southern Siberian platform.

Байкало-Патомский складчато-надвиговый пояс на юге Сибирской платформы протяженностью более 1.2 тыс. км закартирован от верховьев р. Ангара на юге до Березовской, Кемпендяйской и Ыгыатинской впадин на северо-востоке. Для рассматриваемой шарьяжно-надвиговой системы характерна поясная зональность. Выявлено, что область форланда надвигового пояса перекрывает значительную часть известных месторождений углеводородов (УВ) с востока (рис. 1).

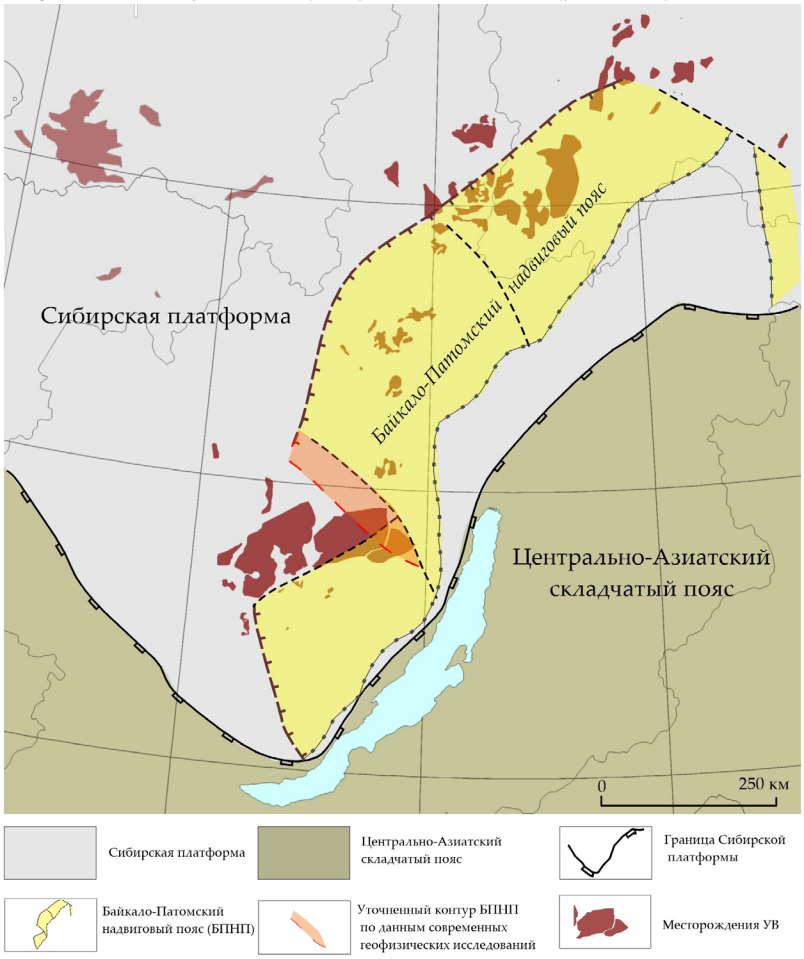


Рисунок 1. Обзорная схема Байкало-Патомского надвигового пояса юго-восточной окраины Сибирской платформы с уточнениями по новым геолого-геофизическим данным.

Figure 1. Simplified map of the Baikal-Patom fold and thrust belt at the southeastern margin of the Siberian platform showing the newly acquired geological and geophysical data.

В данном исследовании модель частичного перекрытия УВ-месторождений проиллюстрирована на примере Ковыктинского газоконденсатного месторождения (ГКМ), расположенного в уникальной геодинамической обстановке зоны перекрытия Сибирской платформы и Байкало-Патомского надвигового пояса и представляет собой исключительный природный объект для изучения взаимосвязи тектонических процессов с формированием углеводородных и гидроминеральных систем.

Несмотря на значительную изученность региона, вопросы генезиса и пространственного распределения залежей остаются дискуссионными.

Современными исследованиями [Мисюркеева и др., 2022, Сибирский кратон…, 2023] с применением комплекса геофизических методов, включая 3D сейсморазведку (МОГТ) и электроразведку (ЗСБ), выявлено, что стратиграфический разрез восточной части Ковыктинского ГКМ характеризуется четким двухярусным строением, включающим автохтонный комплекс слабодислоцированных отложений венда и рифея, а также аллохтонный комплекс интенсивно нарушенных кембрийских галогенно-карбонатных пород. В автохтоне в песчаниках парфеновского горизонта сосредоточены основные запасы газа уникального месторождения. В аллохтоне в галогенно-карбонатных отложениях ангарской, булайской, бельской и усольской свит сосредоточены запасы редкометалльных рассолов, а также фиксируются газопроявления вплоть до промышленных.

Наибольший интерес на сегодняшний день представляет бильчирский карбонатный горизонт (ангарская свита), наиболее часто проявляющий себя как рапопроявлением с аномально-высоким пластовым давлением (АВПД), так и выбросами газа [Вахромеев, 2015, Горлов и др., 2020]. Установлено перекрытие его газовой и рапоносносной залежи аллохтонной Орлингской пластиной [Misyurkeeva et all., 2022], что подтверждает гипотезу авторов о формировании природного карбонатного резервуара на основе надвиговой модели.

Геофизическими исследования (3D МОГТ и 3D ЗСБ) в разрезе галогенно-карбонатной толщи выявлена сложная чешуйчато-надвиговая структура с базальным детачментом в осинском горизонте. Особый интерес представляет выявленная слабонаклонная (15-25°) зона пониженного удельного электрического сопротивления по данным электроразведки. Данная зона могла являться основным каналом латеральной флюидомиграции из области регионального прогиба в платформенные структуры. Реконструкция флюидодинамической эволюции позволяет выделить несколько ключевых этапов: первичную миграцию углеводородов из Байкало-Патомского очага генерации, их латеральный переток по зонам детачмента, аккумуляцию в структурных ловушках фронта надвига и возможное кайнозойское переформирование залежей.

Многочисленные примеры из мировых нефтегазоносных бассейнов демонстрируют, что надвиги играют ключевую роль в формировании и контроле углеводородных скоплений, обеспечивая как формирование ловушек, так и пути миграции флюидов из смежных складчатых областей (Загросский бассейн, Аппалачи, Предуралье). В случае Ковыктинского месторождения комплексные исследования выявляют аналогичные механизмы: данные 3D сейсморазведки показывают чешуйчато-надвиговое строение аллохтонной части, выявляют зоны трещиноватости, а геоэлектрические маркеры позволяют выявлять флюидонасыщенное емкостное пространство и свидетельствуют о возможной миграции флюидов из Байкало-Патомского

палеоочага, подтверждая проницаемость надвиговых зон.

Геологи уже более полувека назад отмечали усложнение геологического строения краевой области юго-восточной части Сибирской платформы, выделяя этапы мощного геодинамического воздействия со стороны террейнов Палеоазиатского океана. Формирование Ковыктинского ГКМ явилось результатом сложного взаимодействия коллизионных и постколлизионных процессов, детально изученных в последних исследованиях [Gladkochub et al., 2022]. Представляется, что особую роль сыграла кайнозойская тектоническая активизация [Вахромеев и др, 2023, Сибирский кратон…, 2023], которая вызвала перераспределение флюидных систем, формирование аномальных пластовых давлений и локализацию залежей редкометалльных рассолов, что в конечном итоге определило современную структурно-флюидную организацию месторождения.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-77-30006, https://rscf.ru/project/25-77-30006/.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Вахромеев А.Г.** Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных кавернозно-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы (по данным глубокого бурения, испытания скважин и полевой геофизики): Монография. Иркутск: Изд-во ИрНИТУ, 2015. 248 с.

2. **Вахромеев А.Г., Мамаков Д.О., Демидова Е.В., Мисюркеева Н.В., Корнилова Т.А., Пуляевский М.С.** Геологическое строение природных резервуаров венда и венд-кембрия юго-восточной части Ангаро-Ленской ступени по результатам нового этапа ГРР на нефть и газ. PROНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2023. Т. 8. № 3. С. 22–37. https://doi.org/10.51890/2587-7399-2023-8-3-22-37

3. **Мисюркеева Н.В., Вахромеев А.Г., Смирнов А.С., Буддо И.В., Горлов И.В., Шемин Г.Г.** Детализация надвиговых структур осадочного чехла в Ковыктинско-Хандинской зоне отраженной складчатости. Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 2. https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-2s-0607.

4. **Сибирский кратон и его складчатые обрамления в истории Земли: палеогеография, палеогеодинамика и полезные ископаемые.** Иркутск: ООО «Восточно-Сибирская типография», 2023. 232 с.

5. **Gladkochub D. P., Motova Z. L., Donskaya T. V., Khubanov V. B., & Sizov A.** Cambrian/Ordovician boundary as a milestone in the sedimentation history of the southern Siberian craton: Evidence from U-Pb dating of detrital zircons. Journal of Asian Earth Sciences: X. 2022. V. 8. N 2. P. 100107. https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2022.100107.

6. **Gorlov I.V., Vahromeev A.G., Smirnov A.S, Ilyin A.I., Misyurkeeva N.V., Buddo I.V., Shemin G.G. and Pozdnyakova I.S..** Detailing The Geological Structure of The Cambrian Deposits of The Kovykta Gas Condensate Field. Conference Proceedings, GeoBaikal, 2020. V. 2020. P.1 – 6. https://doi.org/10.3997/2214-4609.202052051.

ГЕОЛОГО-СТРУКТУРНАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЛОВЫХ ОБРАЗОВАНИЙ КОМСОМОЛЬСКОГО РУДНОГО РАЙОНА И АНАДЖАКАНСКОГО РУДНОГО УЗЛА (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ, РОССИЯ)

А.Н. Митрохин

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: stakhor@yandex.ru

Аннотация. Сопоставление структурных рисунков меловых образований Комсомольского рудного района и Анаджаканского рудного узла показывает, что они контролируются элементами единой ССВ Комсомольской левосдвиговой зоны. При этом ее сквозные (Мяочанский и Холдаминский левые сдвиги-ограничители) и локальные (ССВ, СЗ, ЗСЗ и ВСВ разрывы) элементы наряду с синсдвиговыми СВ–ВСВ складчатыми сооружениями повсеместно определяли особенности миграции, ремобилизации и локализации мелового эндогенного вещества (независимо от его металлогенической специализации) под воздействием ССЗ горизонтального сжатия.

GEOSTRUCTURAL CORRELATION OF THE CRETACEOUS FORMATIONS OF THE KOMSOMOLSK ORE DISTRICT AND THE ANADZHAKAN ORE SUBDISTRICT (KHABAROVSK TERRITORY, RUSSIA)

A.N. Mitrokhin

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: stakhor@yandex.ru

Abstract. Comparison of the structural patterns between the Cretaceous formations of the Komsomolsk ore district and the Anadzhakan ore subdistrict shows them to be under control by elements of the unified NNE-trending Komsomolsk sinistral-fault zone. At the same time, its through (Miaochan and Holdami sinistral fault-limiters) and local (NNE-, NW-, WNW-, and ENE-trending faults) elements, along with strike-slip fault-related NE–ENE-trending fold structures, everywhere predetermined the features of migration, remobilization, and localization of the Cretaceous endogenous substance (regardless of its metallogenic specialization) under the NNW horizontal compression.

Комсомольский рудный район (КРР) расположен на западной окраине северной части Сихотэ-Алинской аккреционно-складчатой системы в зоне сочленения Баджальской и Горинской структурно-формационных зон.

КРР сформировался в период меловой (апт–кампан) тектономагматической активизации. Верхи его разреза слагают апт-кампанские эпиконтинентальные вулканогенные и вулканогенно-осадочные породы кислого (холдаминская свита) и среднего (амутская свита) состава. Эти породы перекрывают с резким угловым и азимутальным несогласием верхнетриасово-валанжинское кремнисто-терригенное основание. Чехол и основание последовательно прорваны апт-кампанскими интрузиями пурильского (гранодиоритового) → силинского (монцонитоидного) → чалбинского (гранитного) комплексов мяочанской серии. Стратифицированные и интрузивные образования рассекаются линейными или (реже) трубообразными телами кварц-турмалиновых метасоматитов, к которым приурочено большинство оловорудных месторождений и проявлений КРР [1–6 и др.].

Магматизм и рудоотложение протекали на фоне левосторонней активизации ССВ разломов Комсомольской сдвиговой зоны (КСЗ) под действием ССЗ (340–350°) горизонтального сжатия. КСЗ в совокупности с синсдвиговыми СВ–ВСВ складчатыми структурами и СЗ, ВСВ и СВ разломами предопределила особенности локализации проявлений указанных вещественных комплексов [1–2, 4–7 и др.].

КРР хорошо известен среди геологов-металлогенистов и в особом представлении не нуждается в силу своей высокой изученности как в геолого-структурном, так и в вещественном отношении с массой публикаций по нему [1, 3–7 и др.].

Анаджаканский же рудный узел (АРУ), хотя и расположен всего лишь в 50 км к югу от КРР, изучен куда более фрагментарно. Тем не менее, имеющиеся данные [2–4 и др.] свидетельствуют, что его геология не сильно отличается от геологии КРР. Стратифицированные образования те же, только имеющие более глубокий эрозионный срез почти до полного исчезновения апт-кампанских вулканитов. Интрузивные породы при известных петрохимических различиях тоже обнаруживают близость к породам мяочанской серии. Так, там выделяется анаджаканский комплекс, который по датировкам и по своему петрологическому и петрохимическому профилю весьма близок к силинскому комплексу. Хотя его породы и имеют изначально более кислый состав с преобладанием гранодиоритовых и гранитных разностей, что некоторые исследователи опять же объясняют более глубокой эродированностью АРУ. Есть также примеры проявления дайковых разностей гранодиорит- и гранит-порфиров, минералогически и петрохимически близких к породам пурильского комплекса. В то же время аналоги пород чалбинского комплекса в интрузивных выходах АРУ не обнаружены. Рудная минерализация здесь того же минералогического профиля, хотя и менее продуктивна, чем в КРР, особенно в отношении олова, и представлена отчасти оловянным оруденением с примесью полиметаллов и меди, отчасти медно-молибденовым (с золотом, вольфрамом, оловом), отчасти золотым (с примесью меди,

серебра и полиметаллов), которое могло служить источником имеющихся в АРУ небольших россыпей золота. Так или иначе, у обеих рассматриваемых площадей некоторые исследователи находят достаточно сходных черт, чтобы считать АРУ составной частью КРР [2–4 и др.].

В любом случае, сказанное, с учетом того, что АРУ фактически является южным продолжением КРР, позволяет ожидать наличия между ними и структурно-геодинамического сходства в отношении апт-кампанских синсдвиговых образований. На это указывает следующее.

1. Уже анализ данных геологической съемки масштаба 1:200 000 [3 и др.] по различным геолого-геофизическим критериям позволяет вполне уверенно говорить о том, что АРУ находится на южном продолжении КСЗ. Действительно, картируемый здесь Эльбанский субмеридиональный разлом явно является южным сегментом Холдаминского левого сдвига, ограничивающего площадь КРР с востока. Этот сегмент прослеживается почти непрерывно на юг от Холдаминского разлома и геоморфологически (по долине р. Эльбан), и геологически (ограничивает по простиранию выступы с триасовыми отложениями и прогибы основания, контролирует Эльбанский сиенитовый массив), и геофизически (фиксируется по узорам гравитационных и магнитных аномалий).

Аналогичным образом фиксируется и южное продолжение зоны Мяочанского левого сдвига, состоящего из серии сместителей и ограничивающего собственно рудоносную площадь КРР с запада. Это продолжение при ширине 10–12 км прослеживается в ЮЮЗ траверсе от Чалбинского массива к долине р. Сюмнюр по ограничениям и разобщениям пермских и триасовых пластин основания, выходов средних-основных разностей пород анаджаканского комплекса, восточному ограничению Харпийской вулканотектонической структуры. Оно фиксируется также субмеридиональными и почти прямолинейными фрагментами рельефа. Очень ярко данный участок Мяочанского сдвига выражен в узоре магнитных аномалий, где один из его сместителей совместно с Эльбанским сегментом Холдаминского сдвига создает картину, геометрия которой очень напоминает классический рисунок леводсвигового дуплекса растяжения с закономерно левоступенчатым расположением названных дизъюнктивов. «Просвечивается» Мяочанский сдвиг и в гравитационных аномалиях.

2. Об апт-капманских повторных синсдвиговых соскладчатых деформациях в силу их фрагментарного проявления за счет глубокой эродированности АРУ можно судить в основном по косвенным признакам. Во-первых, сам характер расположения основных интрузивных массивов АРУ [2–3 и др.] (Анаджаканского, Маглойского, Сюмнюрского, Даухманского и более мелких), взятых воедино, создает впечатление периклинального замыкания для антиклинального выступа с пологим, слегка эродированным замком и погружением шарнира на СВ. Аналогиями тому, что такая структурная ситуация

(когда интрузии приурочены к соскладчатым декомпрессионным камерам в сводах синсдвиговых антиформ [7 и др.]) здесь вполне вероятна, могут служить хорошо известные Чалбинский и Силинский массивы КРР. В этом контексте не составляет исключения и выделяемый геофизически Комсомольский криптоплутон, контролируемый как складчатостью, так и сдвигами КСЗ [7 и др.]. Тем не менее вопрос о том, насколько конкордантны интрузии АРУ апт-капманским син- и антиформам, пока еще остается открытым. Здесь требуется дополнительное привлечение как геолого-геофизического, так и геоморфологического материала и по самому АРУ, и по его периферии, поскольку пример КРР показывает, что повторная складчатость неплохо отражается в рельефе [7 и др.]. Помимо сказанного, можно отметить также отбиваемое тут преимущественно СВ простирание многочисленных даек диоритовых порфиритов и гранит-порфиров, фиксирующее контроль магматизма со стороны соскладчатых взбросов и надвигов в условиях СЗ синсдвигового сжатия.

3. Пример Солнечного рудоносного сдвига показывает, что частные сдвиги КСЗ могут картироваться точно так же, как и главные (кстати, он очень хорошо выражен и геоморфологически, см. ГИС-систему Google Earth). Все зависит от степени детализации геолого-структурных и иных данных по АРУ. Во всяком случае, даже известные сейчас структурно-текстурные и вещественные особенности рудной минерализации, а также характер ее локализации (сходные с КРР, пространственно: СЗ и ССВ ее тренды) [1–7 и др.] указывают на такое же широкое развитие сдвиговых дислокаций здесь, как и в КРР.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дубровский В.Н., Малиновский Е.П., Родионов С.М.** Структура и зональность оловорудных месторождений Комсомольского района. М.: Наука, 1979. 135 с.

2. **Гоневчук Г.А., Гоневчук В.Г.** Магматические породы Маглойского ареала как вероятный аналог мяо-чанской магматической серии Комсомольского рудного района // Тихоокеанская геология. 1993. № 5. С. 87–97.

3. **Забродин В.Ю., Григорьев В.Б., Кременецкая Н.А.** Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:200 000. Серия Комсомольская Лист M-53-XVII: Объяснит. зап. Изд. 2-е. СПб.: ВСЕГЕИ, 2001. 202 с.

4. **Огнянов Н.В.** Геология оловорудных районов Хингано-Охотской оловоносной области. Комсомольский оловоносный район // Геология оловорудных месторождений СССР. Т. 2. Кн. 1. М.: Недра, 1986. С. 350–378.

5. **Семеняк Б.И., Митрохин А.Н., Сорокин Б.К. и др.** Геохимия Комсомольского рудного района: терригенные и магматические породы // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 181–201.

6. **Сорокин Б.К., Митрохин А.Н., Касаткин С.А.** Сравнительный анализ дислокаций апт-кампанского вулканогенного и доаптского терригенного комплексов

Комсомольского района (на примере Фестивального месторождения) // Тихоокеанская геология. 1995. Т. 14. № 5. С. 46–56.

7. **Mitrokhin A.N.** Cretaceous volcanogenic sedimentary basins and folding in the Komsomolsky tin-ore region, Khabarovsk Territory, Russia // Geoscience Journal. 1998. V. 2. N 3. P. 124–133.

ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЛИТОСФЕРЫ ЮЖНОЙ ЧАСТИ СИХОТЭ-АЛИНСКОГО ОРОГЕННОГО ПОЯСА

М.Ю. Носырев[1], А.К. Бронников[1], А.Н. Диденко[1,2]

[1]Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск,
e-mail: ns041@yandex.ru

[2]Геологический институт РАН, г. Москва

Аннотация. На основании данных магнитотеллурических зондирований, выполненных по профилям меридиональной (3) и широтной (4) ориентировок, для южной части Сихотэ-Алинского орогенного пояса рассчитана трёхмерная модель электрического сопротивления до глубины 150 км и площадью около 100000 км^2. Выполнена геологическая интерпретация полученных геоэлектрических неоднородностей, показано их соответствие основным тектоническим единицам региона.

GEOELECTRICAL FEATURES OF LITHOSPHERE OF SOUTH PART OF SIKHOTE-ALIN OROGENIC BELT

M.Yu. Nosyrev[1], A.K. Bronnikov[1], A.N. Didenko[1,2]

[1]Institute of tectonic and geophysics FEB RAS, Khabarovsk,
e-mail: ns041@yandex.ru

[2]Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Abstract. Based on magnetotelluric sounding data obtained along meridional (3) and latitudinal (4) profiles, a three-dimensional electrical resistivity model down to a depth of 150 km covering an area of about 100,000 km^2 was constructed for the southern part of the Sikhote-Alin orogenic belt. A geological interpretation of the obtained geoelectric inhomogenuities was carried out, their correlation with the main tectonic units of the region is demonstrated.

На протяжении нескольких лет сотрудниками ИТиГ ДВО РАН В.Б. Каплуном и А.К. Бронниковым проводились магнитотеллурические зондирования (МТЗ) на территории Южного Приморья. К настоящему времени выполнено 377 точек зондирований по 7-ми профилям. Средний шаг между пунктами наблюдений для субширотных профилей составил 5 км, для субмеридиональных — 8-10 км. Расстояние между профилями варьировалось от 50 до 75 км для широтных и от 50 до 87 км для меридиональных. Результаты исследований по отдельным профилям опубликованы в [2, 3, 5]. В настоящей работе представлена 3D-модель электрического сопротивления (ЭС) южной

части Сихотэ-Алинского орогенного пояса (САОП) до глубины 150 км. Географически с севера изученная площадь ограничивается широтой г. Лесозаводска, на юге — побережьем Японского моря.

Для регистрации электромагнитного поля в каждой точке использовалась цифровая 24-разрядная электроразведочная станция MTU-5A и два типа индукционных датчиков МТС-30 и МТС-50, произведённые фирмой Phoenix Geophysics Ltd (Канада). Время регистрации поля в диапазоне от 1 Гц до 10 кГц составляло 30 минут, в диапазоне от 400 Гц до 0.0001 Гц в среднем 18 часов. Для создания трёхмерной модели использовалась программа 3D инверсии ModEM [6]. Базовая модель — полупространство с сопротивлением 500 Ом·м. Сопротивление выбрано исходя из более ранних работ [3]. Для учёта влияния моря на магнитотеллурические зондирования был добавлен слой сопротивлением 0.3 Ом·м с учётом батиметрии Японского моря.

Основной целью работы являлось изучение региональных геоэлектрических особенностей земной коры и литосферной мантии южной части САОП. При этом мы концентрировали внимание прежде всего на геологической интерпретации имеющихся геоэлектрических неоднородностей модели, установлении их связи с региональными тектоническими подразделениями САОП. Также представляется актуальным рассмотрение полученных геоэлектрических особенностей с учетом новых геологических и геодинамических данных по региону.

Область исследований охватывает восточную часть Ханкайского массива (ХМ), являющегося частью Бурея-Сонгнен-Цзямусы-Ханкайского супертеррейна [4], который состоит из серии террейнов (блоков), различающихся составом слагающих пород, возрастом, палеогеодинамикой. Основная часть изученной территории относится к САОП и также состоит из ряда террейнов разного типа (аккреционные призмы, турбидитовый бассейн) (рис.1). Площадь насыщена меловыми и палеогеновыми интрузиями кислого-среднего состава и перекрыта вулканитами этого же возраста, относящимися к Восточно-Сихотэ-Алинскому вулкано-плутоническому поясу (ВСВПП). В западной части площади развиты кайнозойские осадочные впадины и неогеновые базальты, которые образуют обширные плато.

Результаты анализа показали определенную корреляцию геоэлектрических неоднородностей литосферы с крупными тектоническими единицами юга Дальнего Востока, такими как ХМ и САОП. Выявлена протяженная коро-мантийная зона проводимости вдоль восточной границы ХМ, захватывающая как породы массива, так и Самаркинского террейна, и связанная с серией разломов, их флюидонасыщенностью, графитизацией нижних горизонтов. Выявлено различие электрического сопротивления верхней мантии под ХМ и САОП. Пониженное ЭС в мантии под массивом может быть связано с появлением графитистых плёнок на гранях кристаллов при поступлении графита в осадках субдуцировавшей пластины океанической коры.

В пределах САОП ЭС в земной коре зависит от насыщенности отдельных блоков меловыми гранитоидными интрузиями. Крупные интрузии повышают ЭС в верхней части земной коры до тысяч и первых десятков тысяч Ом·м в сравнении с ЭС блоков, выполненных преимущественно осадочными образованиями. На основании этого и с учетом отрицательных аномалий гравитационного поля выделены области, насыщенные гранитоидными интрузиями, в том числе и в случае, когда они слабо проявлены на поверхности.

Выделено несколько крупных зон пониженного ЭС, захватывающих различные уровни земной коры и в ряде случаев уходящих в мантию. Часть из них связана с известными крупными разломами (Центрально-Сихотэ-Алинский, Фурмановский, Арсеньевский), другие не находят подтверждения в геологических данных, но, тем не менее, должны приниматься во внимание при анализе разрывной тектоники региона как возможные разломные зоны. В частности, выделена средне-нижнекоровая Дальнегорская зона пониженного ЭС, имеющая в целом субмеридональную ориентировку и протягивающаяся более чем на 250 км при ширине 30-50 км. В верхней части коры над ней отмечаются локальные зоны повышенной проводимости, часть которых пространственно ассоциирует с известными рудными районами. Полагаем, что данная глубинная зона проводимости может иметь важное металлогеническое значение.

Для геоэлектрических неоднородностей в южной части площади характерна смена их простирания с северо-восточного на субширотное. Здесь выделяется вертикальная протяженная широтная коро-мантийная зона повышения ЭС до 10000 Ом·м и более в земной коре и 500-750 Ом·м в верхней мантии на фоне 300-400 Ом·м. Зона пространственно совпадает с минимумом гравитационного поля, который определяется, вероятно, наличием гранитоидных масс в земной коре. Полагаем, что мантийная зона повышенного сопротивления может быть связана с преобразованием мантии магматическими процессами мела-палеогена. Южное ограничение этой зоны выражено как сквозная коро-мантийная контрастная граница по ЭС и может соответствовать крупному разлому. Она подтверждается зоной повышенного горизонтального градиента в поле силы тяжести (повышение к югу уровня поля на 20-30 мГл) и в магнитном поле (южнее зоны уровень магнитного поля повышен на первые сотни нТл). К югу от нее ЭС в земной коре и верхней мантии понижено, в земной коре значения достигают менее 50 Ом·м, в мантии — 100-300 Ом·м.

В работе показано, что полученная модель распределения электрического сопротивления в литосфере южной части Сихотэ-Алинского орогена во многом имеет соответствие с тектоническим районированием и геологическими особенностями территории. Вместе с тем, имеется ряд геоэлектрических неоднородностей, которые нуждаются в более углубленной геологической и петрофизической интерпретации. В целом, по нашему мнению, полученные

данные являются определенным шагом вперед в изучении глубинной структуры Сихотэ-Алиня методами геоэлектрики и могут иметь важное значение как для геодинамических построений, так и металлогенического анализа.

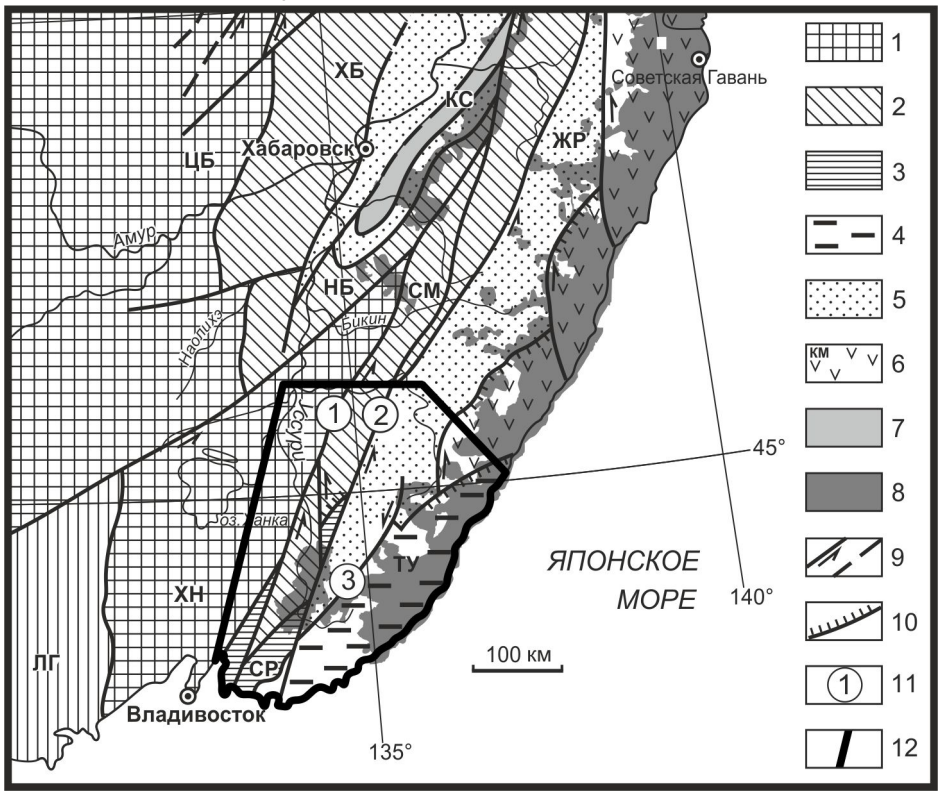


Рисунок 1. Тектоническая схема южной части Сихотэ-Алиньского орогенного пояса по [1] и положение изученной площади.

1 – раннепалеозойские супертеррейны: ЦБ – Цзямусы-Буреинский,ХН – Ханкайский; юрские террейны: 2 – фрагменты аккреционных призм (СМ – Самаркинский, НБ – Наданьхада-Бикинский, ХБ – Хабаровский); 3 – ордовикский габбро-гранитный клипп на мезозойских аккреционных призмах; раннемеловые террейны – фрагменты: 4 – неокомской аккреционной призмы (ТУ – Таухинский), 5 – приконтинентального синсдвигового турбидитового бассейна (ЖР – Журавлевско-Амурский) 6 – баррем-альбской островодужной системы (КМ – Кемский), 7 – альбской аккреционной призмы (КС – Киселевско-Маноминский); 8 - Восточно-Сихотэ Алиньский вулкано-плутонический пояс; 9 – левые сдвиги; 10 – надвиги; 11 – основные разломы: 1 – Арсеньевский, 2 – Центрально-Сихотэ-Алинский, 3 – Фурмановский; 12 – площадь исследований, для которой построена трёхмерная модель ЭС.

Figure 1. Tectonic map of south part of Sikhote-Alin orogenic belt according to [1] and study area location.

1 - Early Paleozoic superterranes (BR – Jiamusi-Bureya, KH - Khanka); 2 - Jurassic accretionary prism terranes (SM - Samarka, NB - Nadanhada-Bikin, HB – Khabarovsk); 3 – Ordovician gabbro-granite klippe on Mesozoic accretionary prisms; Early Cretaceous terranes: 4 - neocom accretionary prism terrane (TU - Taukha) 5 - turbidite basin terrane (ZH-Zhuravlevka-Amur); 6 – Burremian-Albian island arc terranes (KM – Kema); 7 - Early Cretaceous accretionary prism terrane (KS - Kiselevka-Manoma); 8 – Eastern Sikhote-Alin volcano-plutonic belt; 9 – left shifts; 10 – thrusts; 11 – main faults: 1 – Arseniev, 2 – Central Sikhote-Alin, 3 – Furmanov; 12 – study area where three-dimensional model of electrical resistivity was constracted

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00023-П (https://rscf.ru/project/22-17-00023/). Базовое финансирование за счет субсидий на выполнение государственных заданий ИТиГ ДВО РАН (темы НИР № 121021000095-1, № 121021000094-4) и ГИН РАН (тема № FMMG-2023-0010).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: в 2 кн.** / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.

2. **Каплун В.Б., Бронников А.К.** Геоэлектрический разрез литосферы центральной части юга Сихотэ-Алинской складчатой системы по профилю г. Дальнереченск – зал. Находка по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеанская геология. 2022. № 4. С. 60-74.

3. **Каплун В.Б., Бронников А.К.** Строение земной коры и верхней мантии южного Сихотэ-Алиня по профилю г. Дальнереченск – с. Рощино – п. Пластун по данным магнитотеллурических зондирований // Тихоокеанская геология. 2019. Т. 38. № 5. С. 3–13.

4. **Ханчук А.И., Аленичева А.А., Голозубов В.В., Кандауров А.Т., Юрченко Ю.Ю., Сергеев С.А.** Ханкайский массив: гетерогенность фундамента и региональные корреляции // Тихоокеанская геология. 2022. Т. 41. № 4. С. 3-22.

5. **Kaplun V.B., Bronnikov A.K.** The Lithosphere Structure in the Northern Part of the Southern Sikhote-Alin Region According to the Magnetotelluric Sounding Data // Russian Journal of Pacific Geology. 2023. V. 17. Suppl. 1. P. S1–S10.

6. **Kelbert A., Meqbel N., Egbert G., Tandon K.** ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data // Computers & Geosciences. 2014. V. 66. P. 40–53.

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ВЗАИМОСВЯЗИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ И СЕЙСМИЧНОСТИ БАЙКАЛЬСКОГО РЕГИОНА

А.А. Светлаков[1], А.А. Добрынина[1], С.В. Алексеев[1], Л.П. Алексеева[1], А.А. Балобаненко[2]

[1]Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск,
e-mail: svetlakov@crust.irk.ru

[2]Сибирский региональный центр ГМСН
филиал ФГБУ «Гидроспецгеология», г.Томск

Аннотация. Проведен анализ фондовых материалов динамики уровня подземных вод в наблюдательных скважинах Байкальского региона на предмет выявления гидрогеологических предвестников землетрясений. По результатам исследования выделены четыре аномалии в уровенном режиме подземных вод, которые связаны с тектоническим сжатием и повышением пластового давления.

NEW DATA ON THE CORRELATION BETWEEN HYDROGEOLOGICAL PARAMETERS AND SEISMIC ACTIVITY IN BAIKAL AREA

A.A. Svetlakov[1], A.A. Dobrynina[1], S.V. Alexeev[1], L.P. Alexeeva[1], A.A. Balobaneko[2]

[1]Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk,
e-mail: svetlakov@crust.irk.ru

[2]Siberian regional center of the State Marine Scientific Research
Institute branch of the Federal State Budgetary Institution
"Gidrospetsgeologiya", Tomsk

Abstract. An analysis of hydrogeological data on the groundwater levels in monitoring wells in the Baikal region has been conducted to identify hydrogeological precursors of earthquakes. The study identified four anomalies of groundwater level rise associated with tectonic compression and increased formation pressure.

Определение взаимосвязи сейсмичности и подземных вод остается актуальной задачей для научного сообщества. Влияние землетрясений на подземные воды связано с гидродинамическими, гидрохимическими и гидротермическими изменениями воды, которые при совокупности факторов могут указать на готовящееся землетрясение. Важным остается вопрос об установлении взаимосвязи между энергией готовящегося землетрясения

(магнитудой и классом) и максимальным размером зоны проявления предвестников. Поэтому основной целью работы является анализ параметров подземных вод в наблюдательных скважинах Байкальского региона на предмет выявления гидрогеологических предвестников землетрясений.

Гидрогеологические пункты наблюдения в сейсмоактивных зонах организованы в конце 2015 г. на территории Култука, Листвянки, Байкальска и Истока. К 2020 г. на территории Байкальского региона ФГБУ «Гидроспецгеология» организовала дополнительные гидрогеологические пункты наблюдения в Хужире, Селенгинске, Сотниково, Усть-Баргузине, Большом Голоустном, Еланцах, Бабушкино, Слюдянке и Солзане, охватывая по периметру всю акваторию оз. Байкал.

В период 2016–2020 гг. на территории Байкальского региона было зафиксировано более 150 землетрясений с энергетическим классом от 9 до 14.6. В большинстве энергетический класс не превышал K=11, но можно отметить землетрясения, произошедшие в Северо-Байкальском, Курумканском, Усть-Баргузинском, Ольхонском, Кабанском районах, которые имели K=12 и магнитуду M>4. Сильное землетрясение с энергетическим классом K>13 и с магнитудой M>5 произошло 29.03.2019 г. в районе с. Туран (Тункинская долина). Самым сильным землетрясением в период 2016–2020 гг. стало Быстринское землетрясение, которое достигало 7 баллов вблизи от эпицентра, в областном центре, находящемся в 80 км от эпицентра, землетрясение составило 5 баллов, также отмечался сильный афтершок, достигающий 4 баллов [1]. Магнитуда составила M=5.4–5.6; энергетический класс K=14.6, магнитуда афтершока составила M=4 [2].

На водопунктах Байкальской природной территории зафиксировано аномальное повышение уровня подземных вод, которое нельзя связать с сезонным колебанием и которое отмечается в гидрогеологических скважинах Листвянки, Байкальского ЦБК, Култука и Истока в августе и октябре 2016 г. Уровень подземных вод в отдельных скважинах повысился на 0.4 м в течение двух суток. Землетрясение произошло 29.08.2016 г. с энергетическим классом K=11.

Вторая аномалия зафиксирована в скважинах Листвянки, Байкальского ЦБК, Култука, Истока и Сотниково. Землетрясение произошло 24.09.2017 г., энергетический класс землетрясения K=10, магнитуда M=3.3. Выделяется один характерный пик с резким поднятием уровня подземных вод на величину до 0.2 м за несколько суток.

Третья аномалия прослеживается в сентябре-октябре 2019 г. в скважинах Листвянки, Байкальского ЦБК, Култука, Селенгинска, Сотниково, Большого Голоустного, Еланцов, Бабушкина, Слюдянки и Солзана. Землетрясение произошло 10.10.2019 г., энергетический класс K=12. Уровень подземных вод в среднем повышался на 0.3 – 0.5 м, период роста составил 2-4 суток.

Четвертую аномалию можно связать с Быстринским землетрясением, произошедшем 21.09.2020 г. Повышение уровня подземных вод отмечено в скважинах Листвянки, Байкальского ЦБК, Култука, Селенгинска, Сотниково, Еланцов, Бабушкина, Слюдянки, Солзана и Хужира. Помимо увеличения уровня подземных вод в пунктах мониторинга, сотрудниками Института земной коры СО РАН фиксировались очаги разгрузки подземных вод на обширной территории задолго до землетрясения [1]. При магнитуде M=5.6 и энергетическом классе K=14.6 землетрясения уровень подземных вод повысился на 0.4 – 0.5 м, а период роста составил трое суток.

Во всех четырех событиях тип деформаций направлен на сжатие, рост пластового давления и повышение уровня подземных вод. Все это связано с упругим сжатием среды, уменьшением емкости пор и трещин, что привело к возрастанию пластового давления и к резкому повышению уровня подземных вод [3]. Форма аномалий уровня подземных вод несимметрична — каждая аномалия начинается с резкого скачка, а затем уровень медленно понижается, достигая фонового значения.

Стоит отметить, что повышение уровня подземных вод наблюдается за достаточно значительный промежуток времени до землетрясения, что свидетельствует о сложном поведении геологической среды в процессе подготовки землетрясения: процесс консолидации среды и закрытия разломов происходит очень быстро (этот момент согласуется с резким увеличением уровня воды), затем наблюдается снижение уровня подземных вод, что может быть связано с активизацией вторичных разломов в очаговой области и разгрузкой напряжений в районе пункта мониторинга.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Байкальский филиал геофизической службы** Интернет ресурс – http://www.gsras.ru (Дата обращения 01.11.24).

2. **Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А. Быстринское землетрясение в южном Прибайкалье (21.09. 2020г., MW= 5.4)** // Геология и геофизика. СО РАН. Ин-т геологии и минералогии им. В.С. Соболева. Новосибирск. 2021. С. 727-743.

3. **Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Шварцев С.Л., Ясько В.Г., Дзюба А.А., Киссин И.Г., Зверьев В.П., Ломоносов И.С., Толстихин О.Н., Журавель Н.А., Назаров А.Д., Герасимова Ж.А.** Основы гидрогеологии. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах. Новосибирск: Наука, 1982. 240 с.

СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ОЧАГОВОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, МОМЕНТНОЙ МАГНИТУДОЙ И ТЕКТОНИЧЕСКИМ ТИПОМ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Ю.А. Степнова, А.В. Коновалов

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: stepnova@fegi.ru

Аннотация. Очаговый спектр ускорения и его высокочастотный уровень является основным параметром, сопоставимым с высокочастотными излучателями. Выявлена связь высокочастотного уровня очагового спектра ускорений со скалярным сейсмическим моментом, тектоническим типом, механизмом, глубиной очага на базе данных в различных сейсмоактивных районах Земли.

RELATIONSHIP BETWEEN SOURCE RELATED HIGH FREQUENCY ACCELERATION SPECTRAL LEVEL, MOMENT MAGNITUDE AND TECTONIC TYPE OF EARTHQUAKE

Yu.A. Stepnova, A.V. Konovalov

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: stepnova@fegi.ru

Abstract. Source acceleration spectrum, along with its high-frequency range, is the key parameter that correlates with high-frequency radiators. We have uncovered the connection between the high-frequency range of source acceleration spectrum and scalar seismic moment, tectonic type, mechanism, and depth of the earthquake source using the data from different seismically active areas throughout the Earth.

Землетрясения — сложный нелинейный геодинамический процесс, оказывающий влияние на безопасность и хозяйственную деятельность человека. Совершенствование параметрических моделей, описывающих вероятностные характеристики и разрушительный потенциал землетрясений, остается актуальной задачей по мере накопления эмпирических данных и развития теоретической базы.

Плавные (когерентные) компоненты процесса разрушения влияют на генерацию длиннопериодных волн, тогда как случайные локальные (некогерентные) компоненты контролируют преимущественно высокочастотный уровень сейсмических колебаний. Локальные неровности/неоднородности (англ. — asperity) в очаге землетрясения играют важную роль в определении характеристик генерируемого высокочастотного излучения, представляющих

собой участки повышенной прочности или повышенного сцепления по разлому (рис. 1), на которых скорость распространения разрыва и высвобождение сейсмической энергии многократно возрастает по сравнению с фоновой частью разлома. Сила наиболее разрушительных для зданий и сооружений высокочастотных колебаний, которые связаны с присутствием в очаге землетрясения локальных неровностей, может существенно различаться среди землетрясений с одинаковой магнитудой.

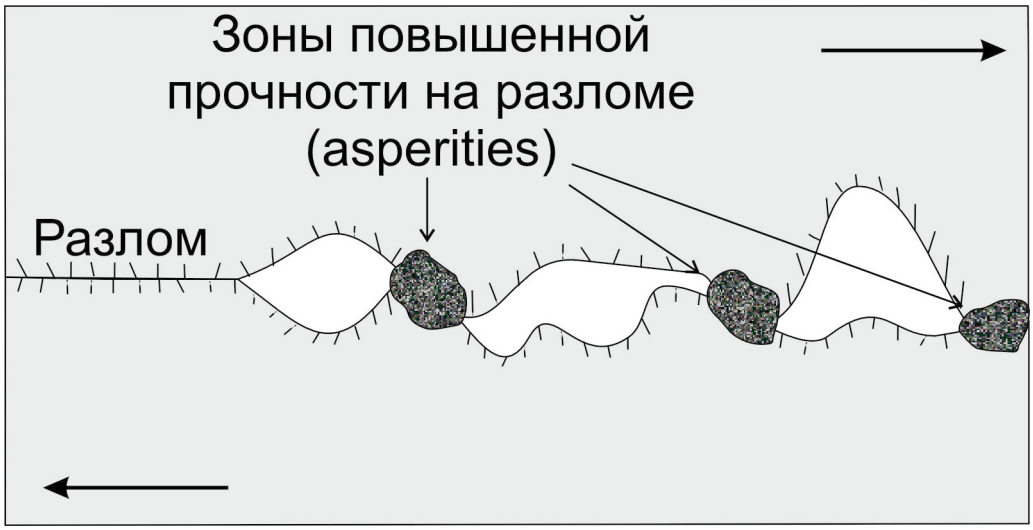


Рисунок 1. Модель разрыва с локальными субочагами в виде asperity.

Figure 1. Model of the rupture and local subsources associated with asperity failure.

Реконструкция очагового спектра подразумевает оценку низкочастотного спектра смещений в виде скалярного сейсмического момента очага землетрясения. Особый интерес представляет оценка спектра ускорений высокочастотного уровня [1].

Нами проанализированы очаговые параметры землетрясений по всему миру, происходивших в различных тектонических условиях, для которых определена характеристика высокочастотного спектра ускорений.

Тектонический режим является важным фактором, влияющим на параметры землетрясений. Соответственно, для наших целей мы придерживаемся общепринятых в сейсмологии тектонических типов: межплитовые и внутрислэбовые субдукционные землетрясения, коровые землетрясения и особый тип «преджелобовых» землетрясений.

В общей сложности проанализировано 210 значений спектрального параметра. Исследовались очаговые спектры землетрясений на территорий Японии, США, Мексики, Турции, Канады, Китая, Тайваня и Ирана. База данных имеет обширный магнитудный диапазон Mw=4.0-9.1, глубина очага варьирует от 1 до 124 км.

Рассмотрев события по типу механизма, стоит отметить преобладание взбросов для межплитовых землетрясений и сбросов для преджёлобовых событий. Коровые землетрясения реализуются как в виде взброса/сброса,

так и сдвига, не отождествляясь с одним доминирующим типом фокального механизма.

Общепринятым в сейсмологии является так называемый эргодический подход, согласно которому характер затухания сейсмических воздействий определяется тектоническим типом землетрясения, а также характеристиками очага и среды, а значит региональная специфика определяется исключительно физическими (измеряемыми) параметрами. В нашем же случае, при одинаковых входных данных амплитуды колебаний претерпевают разброс от региона к региону, соответственно, в рамках нашей концепции (модели) был использован неэргодичный подход.

Поиск устойчивых эмпирических связей между уровнем высокочастотного спектра ускорений и моментной магнитудой с привлечением дополнительных предикторов (глубина очага, сейсмотектонический тип, тип фокального механизма) в виде числовых и категориальных переменных показывает вполне ожидаемую корреляцию ($|\rho|=0.83$) между зависимой переменной (логарифм амплитудного спектра) и моментной магнитудой. Вместе с тем, относительно высоким абсолютным значением коэффициента корреляции ($|\rho| =0.43$) характеризуется пара предикторов «сейсмотектонический тип» – «тип механизма». Корреляция данных переменных обусловлена, по всей видимости, приуроченностью определенных механизмов к некоторым тектоническим типам землетрясений. В частности, взброс почти всегда реализуется в случае межплитового типа подвижки, а сброс — в океанической коре.

Для диагностики предложенных предикторов и оценки их влияния на спектральные измерения произведены оценка коэффициентов с помощью обычной регрессии и анализ невязок (остаточная разность между измеренным и расчетным значениями) в рамках нашей модели.

Среднее значение невязки довольно близко к нулевой линии, что говорит о корректности модели в части магнитудной зависимости. Однако те же самые невязки, зависящие от глубины очага, имеют явный тренд, что говорит о влиянии фокальной глубины на прогнозные значения.

Также отчетливо наблюдаются систематические различия усредненных невязок, отнесенных к разным тектоническим типам землетрясений. Это лишний раз свидетельствует о зависимости уровня очагового спектра ускорений от сейсмотектонической обстановки в области сейсмогенерирующих разломных зон.

Амплитудные характеристики сейсмических колебаний зависят не только от сейсмотектонического типа [2], но и типа фокального механизма землетрясения. В нашем случае наблюдается слабое влияние фокального механизма на высокочастотный спектр и немного обратная картина: сбросы в среднем характеризуются чуть более высокими амплитудами высокочастотного излучения относительно взбросовых подвижек. Соответственно, тип напряженного состояния (сжатие, растяжение или смешанное состояние)

выступает значительным фактором, влияющим на амплитуду высокочастотного излучения, но это не работает в эпиконтинентальных зонах субдукции. В погружающемся океаническом слэбе на некоторых участках реализуются напряжения сжатия, а на других — растяжения, но так как рассматриваемые участки находятся под углом к поверхности, то типичные надвиги (в системе координат слэба) в привычной для сейсмолога проекции на нижнюю или верхнюю фокальные полусферы будут интерпретироваться как сбросы, и наоборот. Поэтому тип фокального механизма не является объективным параметром для корректной параметризации амплитуды высокочастотного излучения. Для коровых землетрясений тип механизма остается по прежнему приемлемой характеристикой, отождествляемой с напряженным состоянием. По этой причине предлагается следующая параметризация событий по тектоническому типу с учетом механизма очага: «межплитовые», «внутрислэбовые», «преджелобовые», «коровые взброс», «коровые сдвиг» и «коровые сброс». Такое ранжирование позволяет избежать взаимодействия между предикторами, отмеченного раннее.

По результатам исследований сделаны выводы: 1) о непосредственной связи высокочастотного уровня очагового спектра ускорений со скалярным сейсмическим моментом, тектоническим типом, механизмом и глубиной очага землетрясения; 2) уровень высокочастотных колебаний, генерируемый сильными землетрясениями внутри слэба, отличается от аналогичной характеристики других тектонических типов землетрясений; 3) с ростом глубины очага увеличивается уровень высокочастотного излучения, а подвижки, происходящие в условиях сжатия, характеризуются более высоким уровнем высокочастотного излучения относительно режима растяжения.

Исследование выполнено по Госзаданию ДВГИ ДВО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гусев А.А., Сорокина А.А., Чебров Д.В.** Очаговые спектральные параметры землетрясений Восточной Камчатки диапазона Mw=3–6 по данным поперечных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2017. № 3. С. 36–49.

2. **González J., Irikura K.** Source Characterization of Mexican Subduction Earthquakes from Acceleration Source Spectra for the Prediction of Strong Ground Motions // Bulletin of The Seismological Society of America. 2007. V. 97. https://doi.org/10.1785/0120050156

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ ГАЙОТОВ МАГЕЛЛАНОВЫХ ГОР (ТИХИЙ ОКЕАН)

В.Т. Съедин[1], С.П. Плетнев[1], Т.Е. Седышева[2]

[1]Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: sedin@ poi.dvo.ru

[2]ФГБУ ВНИИ Океангеология, г. Санкт-Петербург

Аннотация. На гайотах Магеллановых гор выделены 5 крупных возрастных вулканических комплекса: 1 – позднеюрско-раннемеловой (самый ранний мел – ~160-140 (?) млн лет); 2 – раннемеловой (поздний баррем (?)-апт-альбский – ~127-96 млн лет); 3 – позднемеловой (позднесеноман (?)-турон-раннекампанский – ~95-76 млн лет); 4 – позднемеловой (позднекампан-маастрихский – ~74.5-66.0 млн лет); 5 – кайнозойский – 66-0 млн лет. Каждый из них соответствует определенному тектоно-магматическому этапу эволюции Магеллановых гор. В основу этого разделения положены многочисленные (122 датировки по 12 гайотам) определения изотопного возраста, полученные K-Ar и Ar-Ar методом.

FEATURES OF THE GEOLOGICAL STRUCTURE AND EVOLUTION OF THE GUYOTS OF THE MAGELLAN SEAMOUNTS (PACIFIC OCEAN)

V.T. S'edin[1], S.P. Pletnev[1], T.E. Sedysheva[2]

[1]V. I. Ilichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok, e-mail: sedin@ poi.dvo.ru

[2]VNII Okeagenologia, St. Petersburg

Abstract. On the guyots of the Magellan Seamounts, we have been identified five age volcanic units: 1 – Late Jurassic-Early Cretaceous (earliest Cretaceous - ~160-140 (?) Ma); 2 – Early Cretaceous (Late Barremian (?)-Aptian-Albian – ~127-96 Ma); 3 – Late Cretaceous (Late Cenomanian (?)-Turonian-Early Campanian - ~95-76 Ma); 4 – Late Cretaceous (Late Campanian-Maastrichtian - ~74.5-66.0 Ma); 5 - Cenozoic – 66-0 Ma. Each of them corresponds to a certain temporal tectonic-magmatic stage in the evolution of the Magellan Seamounts. Numerous (122 dates by K-Ar and Ar-Ar for 12 guyots) determinations of isotopic age are taken as the basis.

Магеллановы горы расположены в южной части северо-западного сектора Тихого океана. Это один из наиболее изученных объектов Мирового

океана в геолого-геофизическом отношении. Магеллановы горы как объект изучения давно интересуют геологов. С практической точки зрения они привлекают к себе внимание, прежде всего, как место крупных скоплений кобальтосодержащих Fe-Mn образований в рудных корках (средняя мощность корок 9–12 см, максимальная — достигает 45 см). В научном плане гайоты Магеллановых гор представляют собой интерес как типичные структуры вулканического происхождения Тихого океана. В марте 2015 г. Международный орган по морскому дну при ООН (МОМД ООН) закрепила за нашей страной 4 гайота (Говорова, Вулканолог, Альба и Коцебу) для проведения на них средне- и крупно масштабных поисково-разведочных работ. Этот факт имеет большое значение для повышенного внимания к изучению гайотов Магеллановых гор.

Цель настоящей работы — определить особенности эволюции гайотов Магеллановых гор на основании изучения вулканических и осадочных пород.

Несмотря на активные геологические исследования района гайотов Магеллановых гор, среди ученых до сих пор нет единого понимания о том, что они собой представляют. Мы придерживаемся понятия Магеллановых гор, предложенного в работе [8]. Это представление базируется на понимании Магеллановых гор Р.С. Дитцем, который и предложил ввести это название для большой группы подводных гор, расположенных восточнее Марианского желоба [9]. Согласно этим представлениям, в целом система Магеллановых гор имеет форму полукруга (или подковы), южные концы которого открыты в сторону поднятия Каролинских островов. В ее пределах выделяются Западное, Северное и Восточное звенья.

На самом раннем этапе изучения Магеллановых гор исследователи обратили внимание, что эти структуры сложены разновозрастными магматическими и осадочными породами. Разными авторами выделялись 2 (нижний или ранний; верхний или поздний) или 3 (ранний, средний, поздний) возрастных вулканических комплекса как для отдельных гайотов, так и для всех Магеллановых гор [1, 3-5]. Однако, четкие морфологические привязки и возрастные параметры для выделенных комплексов чаще всего отсутствуют.

В настоящее время на основе имеющихся определений изотопного возраста магматических пород, биостратиграфических данных, а также материалов глубоководного бурения на гайотах Магеллановых гор нами выделены 5 крупных возрастных вулканических комплекса: 1 - позднеюрско-раннемеловой (самый ранний мел - ~160-140 (?) млн лет); 2 - раннемеловой (поздний баррем (?)-апт-альбский – ~127-96 млн лет); 3 – позднемеловой (позднесеноман (?)-турон-раннекампанский - ~95-76 млн лет); 4 – позднемеловой (позднекампан-маастрихский - ~74.5-66.0 млн лет); 5 – кайнозойский – 66-0 млн лет. Каждый из них соответствует определенному тектоно-магматическому этапу эволюции Магеллановых гор, а также характеризует конкретное морфологическое пространство гайотов (основание или пьедестал, основное

тело, небольшие осложняющие наложенные структуры 2-го порядка) и геохимические особенности слагающих их вулканических пород [2, 7, 8]. В основу этого разделения положены многочисленные (71 датировка) определения изотопного возраста, полученные нами K-Ar методом в одной лаборатории (аналитик В.А. Лебедев, ИГЕМ РАН). Эти опубликованные данные (всего 122 датировки по 12 гайотам — K-Ar (78 определений) и ^{39}Ar-^{40}Ar (44 определения) и методы использованы в настоящей работе. Они располагаются в возрастном диапазоне 15 – 129 млн лет (средний миоцен – баррем).

Изучение осадочных пород позволило определить их возраст, фациальные особенности формирования, а также установить роль и значение этих образований в понимании эволюции гайотов Магеллановых гор. Основные результаты изучения осадочных пород приведены в многочисленных работах и суммированы в монографии [2]. В целом, результаты изучения осадочных пород сводятся к следующему:

1 — осадочные породы представлены грубозернистыми образованиями (эдафогенные брекчии, конгломераты, гравелиты), песчаниками разной размерности, а также известняками мелководных и глубоководных фаций.

2 — судя по имеющимся к настоящему времени данным, осадочные образования на гайотах стали формироваться с аптского времени. К этому времени вулканические основания гайотов успели оформиться как самостоятельные морфоструктуры, и на них возникли нормальные морские условия для роста и образования рифовых биогермов.

3 — на основе соотношения остатков мелководной и глубоководной фауны выделены «регрессивные» и «трансгрессивные» фазы развития гайотов. Для «регрессивных» фаз осадконакопления характерны грубозернистые осадочные породы и наличие в них мелководной бентосной фауны, а для «трансгрессивных» — тонкозернистые осадочные образования с остатками планктонных организмов.

Изучение вулканических и осадочных пород гайотов Магеллановых гор позволяет сделать следующие выводы:

1. Определяющим процессом в формировании гайотов Магеллановых гор является вулканизм, который длительное время проявлялся на этих структурах.

2. Вулканическая активность на гайотах Магеллановых гор имела длительный и пульсирующий (дискретный) характер. Скорее всего, активный магматизм начался здесь в позднеюрское время и проявлялся в виде отдельных эпизодов вплоть до позднего миоцена (плиоцен-плейстоцена?).

3. На гайотах Магеллановых гор выделены 5 крупных тектоно-магматических этапов их эволюции: 1) позднеюрско-раннемеловой (самый ранний мел — ~160–140 (?) млн лет); 2) раннемеловой (поздний баррем (?)-апт-альбский — ~ 127–96 млн лет); 3) позднемеловой (позднесеноман (?)-турон-раннекампанский — ~ 95–76 млн лет); 4) позднемеловой (позднекампан-

маастрихтский — ~ 74.5–66.0 млн лет); 5) кайнозойский — ~ 66–0 млн лет.

4. Каждый из тектоно-магматических этапов характеризует конкретное геоморфологическое пространство гайотов Магеллановых гор (основание или пьедестал, основная часть постройки, небольшие осложняющие наложенные структуры второго порядка). В результате 1-го тектоно-магматического этапа эволюции этих структур сформированы их основания (пьедесталы, или цоколи) до глубин 4500-3500 м; в результате 2-го и 3-го этапов эволюции была сформирована основная часть постройки каждого из гайотов; во время 4-го и 5-го этапов формировались локальные (наложенные) структуры вулканического происхождения, которые характеризуют процесс позднемеловой и кайнозойской тектонической активизации основной части постройки гайотов. Наиболее значимыми для формирования гайотов Магеллановых гор были 1-й, 2-й и 3-й тектоно-магматические этапы, в течение которых были сформированы пьедестал и основная часть постройки каждого из гайотов.

5. Тектоно-магматические этапы гайотов Магеллановых гор имеют различную продолжительность, и каждый из них, естественно, внес разный вклад в формирование общего тела этих структур. Наиболее длительными были 1-й и 5-й этапы, длительность которых составляет ~ 40–60 млн лет.

6. В истории развития гайотов Магеллановых гор выделяется пять палеогеографических этапов осадконакопления. Среди них два «регрессивных» цикла осадконакопления: апт-среднеальбский и турон-раннекампанский; а также — три «трансгрессивных» цикла эволюции: позднеальб-сеноманский, среднекампан-маастрихтский и кайнозойский.

7. Тектоно-магматические этапы эволюции гайотов Магеллановых гор, выделенные при изучении вулканических пород, хорошо согласуются с палеогеографическими этапами осадконакопления. Периоды активного магматизма совпадают по времени с этапами «регрессивного» осадконакопления, а время затухания или полного прекращения вулканизма – с этапами «трансгрессивного» осадконакопления. Тектоно-магматические и палеогеографические этапы хорошо дополняют друг друга, что позволяет более обоснованно и корректно интерпретировать особенности формирования и эволюции гайотов Магеллановых гор.

8. Продолжительная вулканическая деятельность и, прежде всего, поствулканические процессы сыграли определяющую роль в поставке в океанскую воду флюидов, обогащенных рудными компонентами. Это, в результате различных процессов, могло привести к формированию различных типов ЖМО на гайотах Магеллановых гор. Периодичность (дискретность) вулканических процессов в течение длительного периода времени обеспечила стадийность в образовании Fe-Mn корок. Судя по стратиграфии ЖМО, наиболее значимыми для поставки и накопления рудного вещества были 4-й

и 5-й тектоно-магматические этапы — то есть, те этапы, в которых магматизм протекал, главным образом, в подводных условиях.

Работа выполнена в рамках Программы госбюджетных тем НИР ТОИ ДВО РАН (№ госрегистрации: 124022100082-4).

Литература

1. **Гайоты Западной Пацифики и их рудоносность.** М.: Наука, 1995. 368 с.

2. **Геология гайотов Магеллановых гор (Тихий океан).** Владивосток: Дальнаука, 2020, 200 с.

3. **Голубева Э.Д.** Эволюция магматизма Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2009. 132 с.

4. **Мельников М.Е.** Месторождения кобальтоносных марганцевых корок. Геленджик: ФГУГП «Южморгеология», 2005. 230 с.

5. **Петрологические провинции Тихого океана.** М.: Наука, 1996. 444 с.

6. **Съедин В.Т., Плетнев С.П., Седышева Т.Е.** Возрастные вулканические комплексы и тектоно-магматические этапы эволюции Магеллановых гор (Тихий океан). Сообщение 1: Вулканические комплексы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. № 4. Вып. 56. С. 90–116.

7. **Съедин В.Т., Плетнев С.П., Седышева Т.Е.** Возрастные вулканические комплексы и тектоно-магматические этапы эволюции Магеллановых гор (Тихий океан). Сообщение 2: Тектоно-магматические этапы // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 3. Вып. 59. С. 67–86.

8. **Углов Б.Д., Мельников М.Е.** Тектоника рудной провинции Магеллановых гор Тихого океана по геофизическим данным // Руды и металлы. 2015. № 4. С. 26–38.

9. **Deitz R.S.** Marine geology of Northwestern Pacific: description of Japanese bathimetric chart 6901 // Bulletin of the Geological Society of America. V. 65. P. 1199–122.

АККРЕЦИЯ УРАЛЬСКИХ ТЕРРЕЙНОВ К ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОМУ КРАТОНУ: НОВЫЕ ИЗОТОПНО-ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИЕ И ПАЛЕОМАГНИТНЫЕ ДАННЫЕ

Н.В. Правикова[1,2], А.В. Тевелев[1], А.Ю. Казанский[3,4], П.А. Шестаков[1], А.А. Дебабова[1], А.В. Чистякова[2], Р.В. Веселовский[1,2], Е.А. Володина[1], А.А. Тихвинская[5], Е.В. Коптев[6], А.Е. Голдырев[3,4]

[1]Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: npravikova@mail.ru

[2]Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

[3]Геологический Институт РАН, г. Москва

[4]Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск

[5]ООО "Рок Энд Милл", г. Москва

[6]Университет МакМастер, г. Гамильтон

Аннотация. В работе приведены изотопно-геохронологические и палеомагнитные данные для раннекаменноугольных вулканических комплексов Магнитогорской и Восточно-Уральской зон Южного Урала. Около 350 млн лет назад Магнитогорская, а 339 млн лет назад Восточно-Уральская зоны были аккретированы к Восточно-Европейскому кратону и вошли в стадию активного растяжения. Интервал между аккрецией и растяжением в Магнитогорской зоне составил около 10 млн лет.

ACCRETION OF THE URAL TERRANES TO THE EAST EUROPEAN CRATON: NEW GEOCHRONOLOGICAL AND PALAEOMAGNETIC DATA

N.V. Pravikova[1,2], A.V. Tevelev[1], A.Yu. Kazansky[3,4], P.A. Shestakov[1], A.A. Debabova[1], A.V. Chistyakova[2], R.V. Veselovskiy[1,2], E.A. Volodina[1], A.A. Tikhvinskaya[5], E.V. Koptev[6], A.E. Goldyrev[3,4]

[1]Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: npravikova@mail.ru

[2]Schmidt Institute of Earth Physics, RAS, Moscow

[3]Geological Institute RAS, Moscow

[4]*Institute of Earth Crust SB RAS, Irkutsk*

[5]*Rock and Mill, Moscow*

[6]*McMaster University, Hamilton*

Abstract. The paper presents new geochronological and palaeomagnetic data for the Early Carboniferous volcanic complexes of the Magnitogorsk and East Ural zones of the Southern Urals. About 350 Ma the Magnitogorsk and 340 Ma the East Ural zones were accreted to the East European craton and entered the stage of active extension. The interval between accretion and extension in the Magnitogorsk zone was about 10 Myr.

Раннекаменноугольные вулканические комплексы развиты на Южном Урале в пределах субмеридиональных зон, они наиболее широко распространены в Магнитогорской и Восточно-Уральской зонах. Эти комплексы сформировались в обстановке постколлизионного растяжения [8, 2, 3]. Мы получили новые палеомагнитные и изотопно-геохронологические данные по этим комплексам. Образцы отбирались в течение полевых сезонов 2021 и 2024 гг. с помощью электрического бура и вручную штуфами ~5x5x5 см. Ориентировка образцов осуществлялась с помощью магнитного и солнечного компасов. Всего отобрано 93 образца в Магнитогорской и 140 образцов в Восточно-Уральской зоне.

U-Pb датирование циркона из пород Магнитогорской зоны осуществлялось на вторично-ионном микрозонде SIMS SHRIMP-II в Центре Изотопных Исследований ФГБУ «Институт Карпинского». Измерения U-Pb отношений проводились по адаптированной в ЦИИ методике [9]. Проведены исследования трех образцов. В результате получены оценки изотопного возраста в интервале 340-350 млн лет.

U-Pb изотопно-геохронологический анализ циркона из раннекаменноугольных вулканитов Восточно-Уральской зоны выполнен методом LA-Q-ICP-MS на масс-спектрометре Agilent 7900, соединенным с приставкой для лазерного пробоотбора ESL NWR-213 в Центре коллективного пользования Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (г. Москва). Проведены исследования двух образцов. В результате получены оценки изотопного возраста около 339 млн лет для обеих проб.

Палеомагнитные исследования образцов выполнялись в профильных лабораториях ГИН РАН (для Магнитогорской зоны) и кафедры динамической геологии МГУ (для Восточно-Уральской зоны). Методика всех исследований была единой, в соответствии с [11]. Величина объемной магнитной восприимчивости и ее анизотропия (AMS) измерялись на приборе MFK-1, величина и направление естественной остаточной намагниченности (NRM) на магнитометре JR-6. Для

выделения стабильной компоненты NRM использовалось ступенчатая термочистка в экранированной печи TD48 до 700 °C с шагом 20–50 °C. Результаты размагничивания анализировались с помощью пакета программ [6] на основе стандартных алгоритмов.

Палеомагнитные исследования позволили выделить в вулканитах Магнитогорской и Восточно-Уральской зон регулярную доскладчатую компоненту намагниченности. Ее геофизическая природа косвенно подтверждается отличиями в скалярных магнитных характеристиках петротипов в составе комплекса, отвечающих различным этапам магматизма; наличием магнитных текстур по AMS, аналогичных типичным первичным текстурам вулканических комплексов [10], и отсутствием текстур, характерных для измененных пород. Палеомагнитные направления, как по точкам отбора, так и средние направления для точек в обеих зонах, имеют существенные разбросы. При этом палеомагнитные полюсы, рассчитанные по средним направлениям, имеют вытянутое распределение и с хорошей точностью аппроксимируются дугой большого круга на сфере (т.н. «банановое» распределение), что говорит о сдвиговых перемещениях блоков.

Палеомагнитные полюсы, рассчитанные по средним направлениям точек обеих зон, образуют две группы, аппроксимируемые дугами больших кругов, несколько отличающихся по ориентировке и проходящих в пределах точности метода вблизи раннекаменноугольного полюса для Восточно-Европейской платформы (ВЕП) [7]. При этом полюсы Магнитогорской зоны располагаются к юго-востоку, а Восточно-Уральской зоны – к северо-западу от полюса ВЕП. Совместный анализ полученных нами полюсов с полюсами по Магнитогорской зоне из [1] показали, что «банановые» распределения характерны для всех раннекаменноугольных полюсов региона и аппроксимируются несколькими, различающимися по ориентировке, большими кругами. При этом, с учетом данных из [1], полюсы Магнитогорской зоны располагаются как к юго-востоку, так и к северо-западу от полюса ВЕП. Траектории всех больших кругов проходят вблизи раннекаменноугольного полюса ВЕП. Это позволяет предполагать, что Магнитогорский и Восточно-Уральский блоки в раннем карбоне уже были аккретированы к ВЕП.

В течение раннекаменноугольного времени к Восточно-Европейскому кратону последовательно аккретировались отдельные террейны на фоне закрытия Палеоуральского океана. Аккреция Магнитогорской зоны предполагается на границе фамена и турне, около 360 млн лет назад [2, 4]. По нашим данным, как минимум 350 млн лет назад Магнитогорский блок вошел в стадию активного растяжения и рифтогенного вулканизма; таким образом, интервал между стадией аккреции и растяжения составил около 10 млн лет, что соответствует числовым моделям (например, [5]). Восточно-Уральский блок вошел в стадию растяжения около 340 млн лет. Можно предположить, что он был аккретирован к стабильному блоку на 10 млн лет позже, чем Магнитогорский.

Выводы. Результаты наших исследований показывают, что на границе раннего и позднего турне, около 350 млн лет назад, Магнитогорский блок уже был не только аккретирован к Восточно-Европейскому кратону, но и вошел в стадию постколлизионного растяжения и вулканизма. Восточно-Уральский террейн оказался на этой стадии как минимум на 10 млн лет позже, около 340 млн лет назад. Интервал времени от аккреции до активного растяжения для Магнитогорского блока составил около 10 млн лет.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Данукалов К.Н., Голованова И.В., Сальманова Р.Ю.** Палеомагнитное изучение нижнекаменноугольных вулканитов Магнитогорско-Богдановского грабена // Геологический вестник. 2018. № 2. С. 110–117.

2. **Пучков В. Н.** Палеогеодинамика Южного и Среднего Урала. Уфа: ГИЛЕМ, 2000. 146 с.

3. **Салихов Д.Н., Мосейчук В., Холоднов В.В., Рахимов И.** Каменноугольный вулкано-интрузивный магматизм Магнитогорско-Богдановского грабена в свете новых геолого-геохимических данных // Литосфера. 2014. № 5. С. 33–56.

4. **Тевелев А.В., Соболев И.Д., Борисенко А.А. и др.** Начальный этап раннекаменноугольного рифтинга на Южном Урале: первые результаты u-pb датирования циркона из гранитоидов неплюевского комплекса // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2021. № 6. С. 40–4.

5. **Beaumont C., Jamieson R.A., Nguyen M.H. et al.** Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation // Nature. 2002. V. 414. 738-42. https://doi.org/10.1038/414738a

6. **Enkin R.J.** A computer program package for analysis and presentation of paleomagnetic data. Pacific Geoscience Centre, Geological Survey of Canada, Sydney, 1994. 16 p.

7. **Iosifidi A.G., Mikhailova V.A., Popov V.V. et al.** Carboniferous of the Russian platform: Paleomagnetic Data. Recent Advances in Rock Magnetism, Environmental Magnetism and Paleomagnetism. 2019. Chapter 4. P. 37–54.

8. **Pravikova, N.V.; Tikhomirov, P.L.; Tevelev et al.** Magma Chemistry and Tectonic Controls of Volcanic Activity in the Southern Ural Area during Early Carboniferous Time // Minerals. 2023. V. 13 N 2. P. 258. https://doi.org/10.3390/min13020258.

9. **Schuth S., Gornyy V.I., Berndt J. et al.** Early Proterozoic U-Pb Zircon Ages from Basement Gneiss at the Solovetsky Archipelago, White Sea, Russia // International Journal of Geosciences. 2012. V. 3. N 2. P. 289–296. http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2012.32030.

10. **Tarling D.H., Hrouda F.,** The magnetic anisotropy of rocks. London: Chapman & Hall. 1993. 217 p.

11. **Tauxe L.** Essentials of paleomagnetism. Berkeley: University of California Press. 2010. 512 p.

СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕКОНСТРУКЦИИ СДВИГОВЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ БАЙКАЛО-ПАТОМСКОГО ПОЯСА НА ФОНЕ КОЛЛИЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В КОНТЕКСТЕ ПРОГНОЗА РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ

С.А. Устинов, И.А. Кочкин, В.А. Петров, А.А. Андреев, А.Д. Свечеревский, В.В. Шухов

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, e-mail: stevesa@mail.ru

Аннотация. На примере территории западной части Байкало-Патомского пояса на основе последовательного занижения пространственного разрешения цифровой модели рельефа (ЦМР) предложен авторский подход к автоматическому выделению линеаментов, отражающих различные масштабные уровни развития каркаса разрывных нарушений. Для реконструкции параметров поля напряжений-деформаций, кинематики предполагаемых разрывных структур и восстановления последовательности этапов тектогенеза, парагенезис выделенных на каждом этапе генерализации ЦМР структур интерпретировался на основе модели сдвига, предложенной П.Л. Хэнкоком. В результате в истории геологического развития территории установлены три последовательных этапа тектогенеза, характеризующихся: I) субширотной – восток-северо-восточной, II) северо-восточной и III) северо-западной ориентировками оси максимального сжатия. Первый этап проявлен на всех масштабных уровнях и отвечает процессам аккреционно-коллизионного взаимодействия окраины Сибирского кратона с микроконтинентами и островодужными террейнами. Второй и третий этапы проявлены исключительно на локальном уровне и коррелируют с формированием субширотных сдвигов и надвигов. На основе расчета коэффициента тенденции к сдвигу для каждого из выявленных этапов тектогенеза визуализированы наиболее гидравлически активные сегменты разрывных структур. Наибольшую роль в локализации металлического оруденения сыграли первый и второй этапы.

STRUCTURAL-GEOMORPHOLOGICAL APPROACH TO RECONSTRUCTION OF SHEAR TECTONIC PROCESSES OF THE WESTERN PART OF THE BAIKAL-PATOM BELT AGAINST THE BACKGROUND OF COLLISION PROCESSES IN THE CONTEXT OF FORECASTING ORE-FORMING SYSTEMS

S.A. Ustinov, I.A. Kochkin, V.A. Petrov, A.A. Andreev, A.D. Svecherevsky, V.V. Shukhov

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, e-mail: stevesa@mail.ru

Abstract. On the example of the western part of the Baikal-Patom belt, based on the successive reduction of the spatial resolution of the digital elevation model (DEM), the author's approach to automatically identifying lineaments that reflect different scale levels of fault framework development is proposed. To reconstruct the stress-strain field parameters, kinematics of the supposed fault structures and to restore the sequence of tectogenesis stages, the paragenesis of the structures identified at each stage of generalization of the DEM was interpreted based on the shear model proposed by P.L. Hancock. As a result, three successive stages of tectogenesis were established in the history of geological development of the territory, characterized by: I) sublatitudinal – east-northeast, II) northeast and III) northwest orientations of the axis of maximum compression. The first stage is manifested at all scale levels and corresponds to the processes of accretionary-collisional interaction of the margin of the Siberian craton with microcontinents and island-arc terranes. The second and third stages are manifested exclusively at the local level and correlate with the formation of sublatitudinal shifts and thrusts. Based on the calculation of the coefficient of the slip tendency for each of the identified stages of tectogenesis, the most hydraulically active segments of the fault structures were visualized. The first and second stages played the greatest role in the localization of metal mineralization.

Для идентификации разрывных структур в пределах обширных площадей часто применяется линеаментный (структурно-геоморфологический) анализ. Термин «линеамент» уже более ста лет назад предложил американский геолог У. Хоббс [7]. В силу отсутствия других методов достоверной массовой идентификации разрывных структур, линеаментный анализ служит как наиболее эффективный дистанционный метод реконструкции каркаса разрывных нарушений и глубинного тектонического строения территорий [2].

При проведении структурно-геоморфологического (СГ) анализа исследователи чаще всего выделяют одноранговые, обычно непротяженные, линеаменты, не учитывая при этом масштабный эффект в развитии интерпретируемых разрывных структур. Данный эффект заключается в изменении каких-либо свойств объектов и материалов при варьировании их геометрических параметров, что справедливо и для разрывных нарушений [4]. Кроме того, главной проблемой является достоверное выделение разноранговых разрывных структур и их методически верная тектонофизическая интерпретация в контексте геологической истории развития исследуемой территории.

Байкало-Патомский пояс (БПП), западная часть которого рассмотрена в качестве объекта исследования, входит в структуру Байкальской складчатой области, являющейся, в свою очередь, элементом Центрально-Азиатского подвижного пояса. В контексте актуальности результатов представляемого

исследования необходимо отметить, что территория западной части БПП характеризуется крайне сложным тектоническим строением. Здесь распространены разрывные нарушения, имеющие северо-западную, северо-восточную, реже близширотную и субмеридиональную ориентировки. Разломы северо-западной ориентировки, несмотря на четкую выраженность в рельефе, изучены слабо и выявляются в основном по геофизическим и дистанционным данным [3]. Большая часть разрывных нарушений неоднократно подновлялась в течение длительной геологической истории развития территории, что привело к формированию мощных зон катаклаза, милонитизации и рассланцевания пород. Во многих случаях современная гидросеть наследует черты и определяется тектоникой, что позволяет использовать СГ анализ для достоверной реконструкции геометрических параметров каркаса разрывных нарушений.

С точки зрения металлогении, территория входит в Саяно-Забайкальскую провинцию и Байкало-Патомскую минерагеническую субпровинцию. Известные рудные объекты включены в Чуйско-Тонодскую золото-редкометалльно-урано-железорудную минерагеническую зону.

Линеаменты в представляемой работе выделялись на основе цифровой модели рельефа (ЦМР), что обеспечивает более точное обнаружение большего количества линейных элементов, в сравнении с космическими снимками. С целью визуализации ЦМР использовались данные FABDEM с исходным пространственным разрешением 30 м на пиксель [6]. Для выделения линеаментов применялось разработанное авторами программное обеспечение (ПО) на основе нейросетевых технологий [1]. Для учета масштабного эффекта пространственное разрешение ЦМР с последовательным шагом занижалось, и процедура выделения линейных элементов повторялась. Это позволило установить тренды ориентировок основных разломных структур на трех масштабных уровнях — локальном, региональном и надрегиональном.

Для реконструкции параметров поля напряжений-деформаций (ПНД), кинематики основных разломов и этапов тектогенеза на основе интерпретации выделенных линеаментов на различных масштабных уровнях использована модель формирования разрывов в зоне сдвига, предложенная П.Л. Хэнкоком [5]. Для автоматизации данной задачи написано ПО Lineament Stress Calculator (автор А.Д. Свечеревский).

На основе реконструкции параметров ПНД с учётом разноранговых линеаментов удалось для каждого масштабного уровня реконструировать этапы тектогенеза, характеризующиеся определенными ориентировками осей сжатия и растяжения. Это позволило рассчитать коэффициент тенденции к сдвигу и визуализировать наиболее гидравлические активные сегменты разрывных структур на конкретном этапе тектогенеза.

Таким образом, установлены три последовательных этапа смены параметров ПНД, характеризующихся: I) субширотной — восток-северо-

восточной, II) северо-восточной и III) северо-западной ориентировками оси максимального сжатия. Первый этап проявлен на всех масштабных уровнях и, наиболее вероятно, отвечает древним процессам аккреционно-коллизионного взаимодействия окраины Сибирского кратона с микроконтинентами и островодужными террейнами. Второй и третий этапы проявлены исключительно на локальном уровне и коррелируют с формированием субширотных сдвигов и надвигов в северо-западном направлении, соответственно.

Примененный подход к визуализации наиболее гидравлически активных областей на основе расчета коэффициента тенденции к сдвигу и построения комплексных прогнозно-поисковых моделей для каждого из выявленных масштабных уровней развития разрывных структур при вариациях параметров ПНД и их различных комбинаций позволил установить пространственные закономерности между размещением известных рудных объектов в пределах площади и структурно-тектонической проницаемостью на определенных этапах тектогенеза, а также их совокупном влиянии. На основе оценки точности каждой модели показано, что совместное действие процессов первого и второго этапов тектогенеза в большей степени оказало влияние на размещение оруденения в пределах изученной площади.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00218, https://rscf.ru/project/24-27-00218/.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гришков Г.А., Нафигин И.О., Устинов С.А., Петров В.А., Минаев В.А.** Разработка методики автоматического выделения линеаментов на основе нейросетевого подхода // Исследование Земли из космоса. 2023. № 6. С. 86–97.

2. **Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф.** Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 144 с.

3. **Митрофанова Н.Н., Болдырев В.И., Коробейников Н.К., Митрофанов Г.Л. и др.** Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист O-49 – Киренск. Объяснительная записка. СПб.: Картфабрика ВСЕГЕИ, 2012. 607 с.

4. **Петров В.А., Леспинас М., Полуэктов В.В., Устинов С.А., Минаев В.А.** Масштабный эффект в сети флюидопроводящих разрывов // Геология рудных месторождений. 2019. Т. 61. № 4. С. 3-14.

5. **Hancock P.L.** Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. V. 7. N 3/4. P. 437–457.

6. **Hawker L., Uhe P., Paulo L., Sosa J., Savage J.T., Sampson C.C., Neal J.C.** A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. 2022. V.17. N 2. P. 24016.

7. **Hobbs W.H.** Lineaments of the Atlantic Border Region // Geological Society. American Bulletin. 1904. V. 15. P. 483-506.

АНАЛИЗ РОЛИ РЕГИОНАЛЬНЫХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СДВИГОВ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ ЧУКОТКИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНО-ГЕОМОРФОЛОГИЧЕСКОГО ПОДХОДА

В.В. Шухов, С.А. Устинов, А.Д. Свечеревский, В.А. Минаев, В.А. Петров

Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, e-mail: vladimirsh3993@gmail.com

Аннотация. Представлена авторская методика комплексного изучения региональных тектонических сдвигов с применением структурно-геоморфологического подхода на примере территории Чукотки. На основе проведения линеаментного анализа выделены разноранговые разрывные структуры и установлены пространственные закономерности их локализации. Определена актуальность применения цифровых моделей рельефа как основного источника пространственной информации в контексте идентификации разрывов. Выделенные в зонах магистральных сдвигов структуры различного ранга классифицированы по кинематическому типу и интерпретированы тектонофизически с использованием теоретических основ модели сдвига П.Л. Хэнкока. По геоморфологическим признакам выделены пять крупнейших однородных в масштабе площади исследования тектонических блоков. Реконструированы хронология и направления их перемещений на допозднемеловых этапах тектонической эволюции, которые визуализированы на авторских схемах.

ANALYSIS OF THE ROLE OF REGIONAL TECTONIC SHIFTS IN THE FORMATION OF CHUKOTKA BASED ON A STRUCTURAL AND GEOMORPHOLOGICAL APPROACH

V.V. Shukhov, S.A. Ustinov, A.D. Svecherevsky, V.A. Minaev, V.A. Petrov

Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, e-mail: vladimirsh3993@gmail.com

Abstract. The author's method for the comprehensive study of regional tectonic shifts using a structural and geomorphological approach is presented using the example of the territory of Chukotka. Based on the lineament analysis, heterogeneous discontinuous structures are identified and spatial patterns of their localization are established. The relevance of using digital elevation models as the main source of spatial information in the context of faults identification is

determined. The structures of various ranks identified in the main shear zones are classified by kinematic type and interpreted tectonophysically using the theoretical foundations of the P.L. Hancock shear model. According to geomorphological features, the five largest homogeneous tectonic blocks in the scale of the study area are identified. The chronology and directions of their movements at the Late Cretaceous stages of tectonic evolution are reconstructed, which are visualized on the author's schemes.

Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ) имеет важнейшее геостратегическое значение для устойчивого развития страны в будущем. Программы по освоению АЗРФ во многом связаны с совершенствованием горно- и нефтедобывающих отраслей, а также определяются созданием устойчивой минерально-сырьевой базы (МСБ), в том числе и твердых полезных ископаемых (ТПИ).

Задача расширения МСБ ТПИ арктических регионов, имеющих не самое выгодное физико-географическое положение и находящихся под влиянием суровых климатических условий, требует комплексного решения. Очевидно, что одним из факторов для повышения инвестиционной привлекательности недр АЗРФ является сокращение доли дорогостоящих полевых работ благодаря всестороннему внедрению дистанционных методов изучения недр.

В контексте обнаружения новых месторождений ТПИ в пределах территории АЗРФ нельзя не отметить Чукотский автономный округ (ЧАО) – один из крупнейших золоторудных регионов страны. Материковая часть ЧАО занимает крайнее северо-восточное положение в пределах Евразии, имеет выход к морской границе РФ с США. Регион характеризуется неоднородностью климатических и иных географических условий, что во многом связано с уникальным рельефом, представленным как складчато-глыбовыми горами и глубокорасчлененными нагорьями, так и обширными низменности. Влияние на формирование рельефа в большей степени оказала структурно-тектоническая эволюция на фоне различных эпох орогенеза [3]. В современном представлении в структурном строении Чукотки выделяются следующие элементы: Эскимосский массив на крайнем востоке с повсеместными выходами на поверхность докембрийских отложений; Верхояно-Чукотская складчатая область на западе, сформированная крупными системами мезозоид; Корякско-Камчатская складчатая область на востоке – континентальная окраина аккреционного типа; Охотско-Чукотский вулкано-плутонический пояс на стыке Верхояно-Чукотской и Корякско-Камчатской складчатых областей – результат многочисленных вулканотектонических активизаций. Геологическая изученность территории ЧАО весьма неравномерна, а позднепалеозойская-мезозойская история в регионе восстанавливается весьма условно [5].

Вышесказанное определило необходимость разработки новых подходов к восстановлению этапов тектонической эволюции Чукотки, в

особенности допозднемеловых, предшествующих формированию систем вулкано-плутонических поясов. Эти этапы, в некоторой степени, определили структурный облик территории, оказав значимое влияние на локализацию и распределение рудного вещества.

Предлагаемая авторская методика проведения реконструкции сдвиговых тектонических перемещений крупных блоков на ранних этапах развития территории Чукотки основывается на реконструкции и тектонофизическом анализе региональных разрывных структур сдвиговой кинематики с применением структурно-геоморфологического подхода и линеаментного анализа [2].

В связи с тем, что в наиболее общем представлении линеаменты определяются как линейные формы рельефа, чаще отрицательные, маркирующие зоны разрывных структур [7], в качестве исходного материала для выделения данных линейных форм использована предобработанная цифровая модель рельефа (ЦМР) FABDEM, наиболее корректно описывающая «чистую земную поверхность». В целях учета масштабного эффекта производилось изменение значения пространственного разрешения модели, при этом данные ЦМР «загрублялись» с определенным шагом, кратным значению пространственного разрешения исходной модели. Благодаря применению подобного подхода выделены элементы линеаментной сети различного ранга, проведен анализ ориентировок их простирания, позволивший выявить три основных тренда простирания предполагаемых региональных разрывных структур. По ЦМР высокой степени детальности уточнены особенности пространственного положения непротяженных, но не менее значимых в контексте изучения зон региональных сдвигов, оперяющих структур – мегатрещин.

Важнейшим результатом представляемого исследования стала реконструкция этапов смены параметров регионального поля напряжений-деформаций (ПНД) в процессе аккреции крупных тектонических блоков на фоне сдвиговых дислокаций. В основу интерпретации предполагаемых структур различных рангов заложена модель, предложенная П.Л. Хэнкоком [6], наиболее полно охватывающая парагенезис структурных элементов (разрывов, трещин), образующихся в сдвиговой разломной зоне при простом скалывании. В качестве магистральных сдвигов определены тренды крупнейших разломных структур региона, повторяющих геометрию относительно прямолинейных участков границ крупных тектонических блоков, выделенных на основе карты тектонического районирования РФ масштаба 1: 5 000 000 [1]. Границы зон разломов определены с учетом их неоднородности на всем простирании сместителя с использованием схем относительной плотности линеаментов низких рангов, во многом отражающих оперяющие магистральный разрыв мегатрещины. В пределах всех выделенных зон крупнейших разломов региона проведена реконструкция параметров ПНД с использованием программного

обеспечения «Lineament Stress Calculator» (автор – А.Д. Свечеревский), позволяющего в виде роз-диаграмм визуализировать ориентировки главных осей сжатия и растяжения, а также кинематический тип структур различного ранга [4].

По материалам карт тектонического районирования, позволивших сегментировать исследуемую площадь на относительно однородные крупнейшие региональные тектонические блоки, и результатам тектонофизической интерпретации предложена авторская концепция тектонической допозднемеловой эволюции Чукотки и сформулированы следующие выводы:

1. Сдвиговые процессы сыграли решающую роль в формировании объекта исследования на ранних, допозднемеловых, этапах тектонической эволюции.

2. В пределах материковой Чукотки выделяются пять крупнейших тектонических доменов регионального уровня: Омолонский, Центрально-Чукотский, Чукотский, Корякско-Камчатский и Канчалано-Крестовский.

3. Аккреция выделенных тектонических блоков к материку происходила на разных этапах развития под воздействием различных параметров регионального ПНД, что должно быть учтено при идентификации и дальнейшем анализе проницаемых структур в процессе рудогенеза.

4. В допозднемеловой тектонической эволюции Чукотки условно выделяются четыре основных этапа. I) Север-северо-западное региональное сжатие с формированием мощной юго-восточной правосдвиговой зоны с развитием первичных антитетических сколов северо-восточного простирания. II) Заложение и развитие вторичных антитетических сколов, а также аккреция Центрально-Чукотского домена к континенту. III) Затухание юго-восточной правосдвиговой системы и развитие левосдвиговых систем вторичных сколов, с перерастанием их в магистральную северо-восточную зону с заложением первичных субмеридиональных и вторичных антитетических сколов. Данный этап связан с аккрецией Корякско-Камчатского и Канчалано-Крестовского доменов к формирующемуся континенту. IV) Синхронное (или с относительно небольшой разницей во времени) действие двух магистральные систем: субмеридиональной правосдвиговой на востоке с формированием субширотных антитетических сколов и юго-восточной левосдвиговой, активизация которой происходила в условиях аккреции Чукотского домена с северо-востока к материку. Данные события объединяют единые параметры ПНД при северо-восточном региональном сжатии.

Исследование выполнено в молодёжной лаборатории ИГЕМ РАН «Лаборатория прогнозно-металлогенических исследований» в рамках темы государственного задания «Применение современных методов оценки, поиска и прогноза месторождений твердых полезных ископаемых, в том числе стратегических, в Арктической зоне Российской Федерации с целью

расширения минерально-сырьевой базы и планирования развития транспортно-коммуникационных сетей».

ЛИТЕРАТУРА

1. **Карта тектонического районирования России, масштаб: 1:5000000.** Сост.: Геокарт. ИМГРЭ. МПР. 2000. Гл. ред.: Морозов А.Ф.

2. **Кац Я.Г., Полетаев А.И., Румянцева Э.Ф.** Основы линеаментной тектоники. М.: Недра, 1986. 144 с.

3. **Коротаев В.Н., Поморцев О.А.** Особенности формирования побережий Чукотки и Корякского нагорья // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Серия: науки о Земле. 2023. Т. 30. № 2. С. 41–55.

4. **Минаев В.А., Устинов С.А., Петров В.А., Свечеревский А.Д., Нафигин И.О.** Региональный дистанционный анализ разломной тектоники Таймыро-Североземельского орогена и ее роли в рудообразовании // Исследование Земли из космоса. 2024. № 6. С. 58–73.

5. **Морозов О.Л.** Геологическое строение и тектоническая эволюция Центральной Чукотки. М.: ГЕОС, 2001. 201 с.

6. **Hancock P.L.** Brittle microtectonics: principles and practice // J. of Struct. Geol. 1985. V. 7. N 3/4. P. 437–457.

7. **Hobbs W.H.** Lineaments of the Atlantic Border Region // Geological Society. American Bulletin. 1904. V. 15. P. 483–506.

МАГМАТИЗМ И МЕТАМОРФИЗМ В ОБСТАНОВКАХ СУБДУКЦИИ, КОЛЛИЗИИ И СКОЛЬЖЕНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

MAGMATISM AND METAMORPHISM IN SUBDUCTION, COLLISION AND SLIP OF LITHOSPHERIC PLATES

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ПЕТРОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МАНТИЙНЫХ КСЕНОЛИТОВ ИЗ ПОЗДНЕКАЙНОЗОЙСКИХ ЩЕЛОЧНО-БАЗАЛЬТОВЫХ ВУЛКАНИТОВ ПРИМОРЬЯ

А.В. Асеева, А.А. Чащин

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: barkar_anna@mail.ru

Аннотация. Оценка эволюции литосферной мантии под влиянием различных геодинамических процессов является одной из ключевых проблем региональной геологии Дальнего Востока. Важный вклад в понимание этих процессов могут внести результаты изучения мантийных ксенолитов. Минералого-петрохимический анализ гипербазитовых нодулей показал, что мантийные ксенолиты Ханкайского блока во многом отличаются от ксенолитов Сихотэ-Алинского орогенного пояса (Шкотовское, Вострецовское и Острогорское базальтовые плато) как по модальному составу включений, так и по содержанию редкоземельных и некоторых литофильных элементов (Ba, Rb, U, Th). Все это может свидетельствовать о преобразовании литосферной мантии под влиянием мезо-кайнозойских тектоно-магматических процессов, таких как разновозрастная субдукция, формирование slab-windows, а также раскрытие окраинного Японского моря.

COMPARATIVE PETROLOGY AND GEOCHEMISTRY OF MANTLE XENOLITHS FROM CENOZOIC ALKALI BASALTS OF PRIMORSKY REGION

A.V. Aseeva, A.A. Chashchin

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: barkar_anna@mail.ru

Abstract. Study of the lithospheric mantle evolution caused by various geodynamic processes is one of the key problems of the Far East regional geology. Analysis of mantle xenoliths may contribute significantly to the understanding of these processes. Mineralogical and petrochemical study of ultrabasic nodules revealed that mantle xenoliths of the Khanka block differ in many respects from xenoliths of the Sikhote-Alin orogenic belt (Shkotovskoye, Vostretsovskoye and Ostrogorskoye basalt plateaus) both in the modal composition of inclusions and in the content of REE and some lithophile elements (Ba, Rb, U, Th). These could indicate the transformation of the lithospheric mantle as a result of Meso-Cenozoic tectono-magmatic processes, such as different-age subduction, the slab-windows formation, and the opening of the Sea of Japan.

В позднем кайнозое базальтовый магматизм проявился на обширной территории Центрально-Азиатского орогенного пояса, включая мезозойский Сихотэ-Алинский орогенный пояс и окраину палеоазиатского континента, блок Ханка-Дзямусы. В завершающую фазу магматической активизации (начиная с ~10 млн лет) здесь сформировались отдельные экструзивные тела и небольшие вулканические постройки щелочных высокомагнезиальных базальтоидов, несущие мегакристы и мантийные нодули /гипербазитовые включения [2, 3, 4]. Последние размещены в тектономагматических блоках, имеющих разную геодинамическую природу: например, в пределах кратонного Ханкайского блока, палеозойского Сергеевского террейна, юрской аккреционной призмы (Самаркинский террейн) и мелового турбидитового бассейна (Кемский террейн).

По мнению большинства исследователей, вынесенные на поверхность кайнозойскими щелочными базальтами гипербазитовые нодули являются образцами субконтинентальной литосферной мантии, хранящими информацию о генезисе, структуре и эволюции этого долгоживущего земного резервуара (например, [1, 7]). Ультрамафитовым ксенолитам Приморья посвящен ряд работ, содержащих данные по петрографии, минералогии ксенолитов и их петрохимическому составу [1-5]. В то же время по ним практически отсутствует петролого-геохимическая информация, что значительно затрудняет возможности реконструкции состава литосферной мантии и оценки интенсивности преобразования мантии под влиянием мезо-кайнозойских тектоно-магматических процессов. Чтобы восполнить этот пробел, нами было проведено минералого-геохимическое изучение базит-гипербазитовых ксенолитов из щелочных базальтов ряда палеовулканических построек Приморья.

Изученные ксенолиты гипербазитов представляют собой обособления (рис. 1А), сложенные равномернозернистыми агрегатами, состоящими из оливина, ортопироксена, хромистой шпинели (редко биотита, керсутита, апатита, по [2, 4]. Среди них можно выделить две группы (рис. 1А).

Первая — гарцбургит-лерцолитовая (существенно оливин-ортопироксеновая) — характерна для всех изученных кайнозойских щелочно-базальтовых построек Приморья и по классификации [6] принадлежит группе BI внекратонных ксенолитов. Вторая — верлитовая субпопуляция, сложенная преимущественно оливином и клинопироксеном — обнаружена только в щелочных базальтах палеовулканов, расположенных в пределах Самаркинского и Сергеевского террейнов. Она классифицируется как группа ксенолитов B IV, подвергшихся модальному метасоматозу [6]. Именно поэтому в анализируемую группу были включены только ксенолиты субпопуляции BI, не испытавшие метасоматоза, предшествующего магматическому событию.

Анализ геохимических особенностей мантийных ксенолитов гарцбургит-лерцолитовой субпопуляции (рис. 1Б) показал, что хотя нодули базальтовых

плато имеют индивидуальные особенности распределения микроэлементов, для них могут быть выделены следующие закономерности. Так, гипербазитам, пространственно приуроченным к Ханкайскому блоку, свойственны высокие содержания Ba и U и MORB-подобное распределение РЗЭ. Для гипербазитовых нодулей Острогорского, Шкотовского и Вострецовского плато характерно обогащение легкими РЗЭ относительно средних/тяжелых РЗЭ и сравнительно невысокие концентрации Rb, Ba Th, U, Nb.

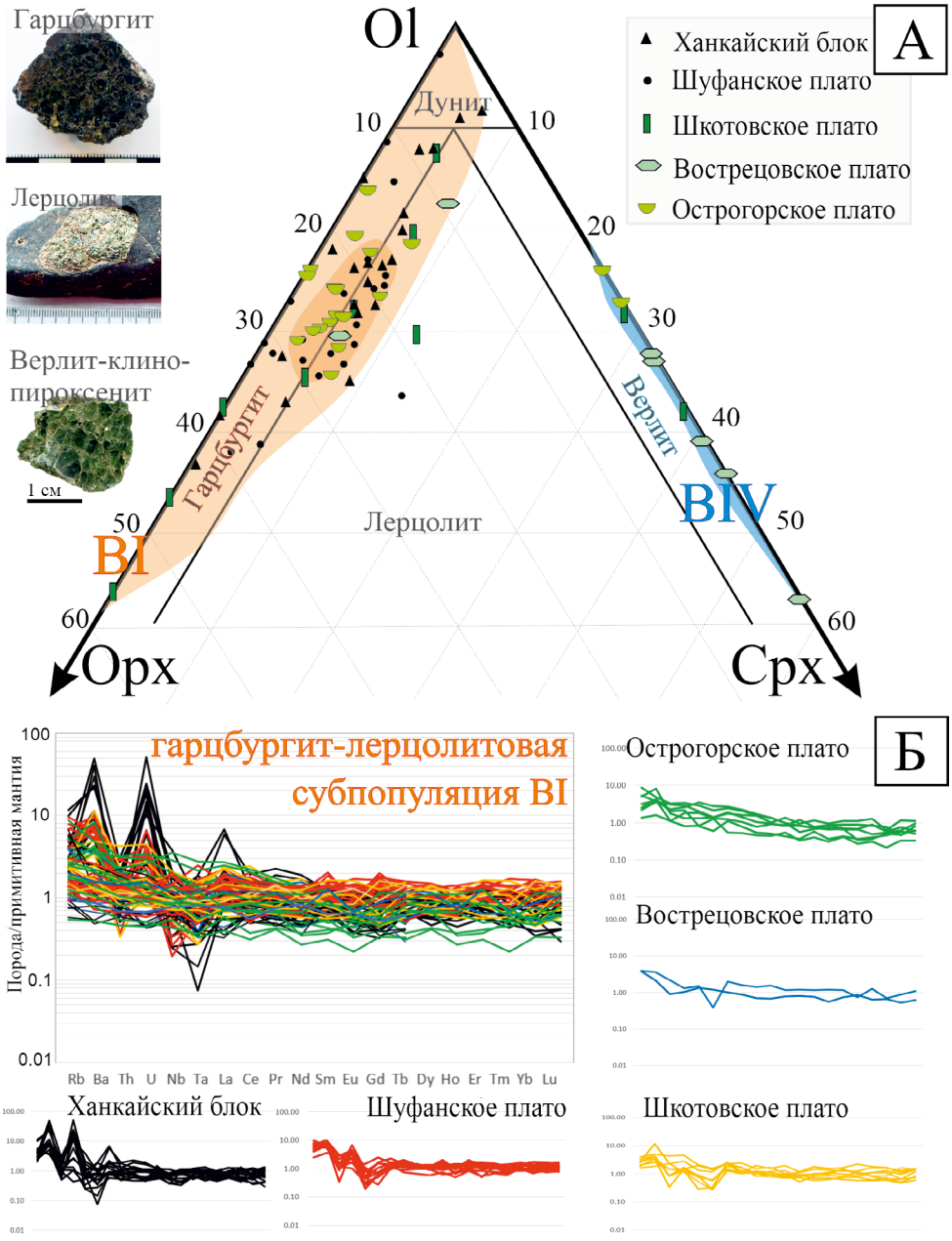


Рисунок 1. Гипербазитовые включения из щелочно-базальтовых палеовулканов Приморья. А-модальный состав, Б – распределение микроэлементов в ксенолитах субпопуляции BI.

Figure 1. Ultrabasic inclusions from alkali basaltic paleovolcanoes of Primorsky krai. A-Modal composition. B-trace elements distribution in the BI subpopulation xenoliths.

Минералого-петрохимический анализ гипербазитовых нодулей показал, что мантийные ксенолиты Шуфанского базальтового поля, как и включения,

обнаруженные в отдельных вулканических постройках в пределах кратонного Ханкайского блока, во многом отличаются от ксенолитов Сихотэ-Алинского орогенного пояса (Шкотовское, Вострецовское и Острогорское базальтовые плато) как по модальному составу включений, так и по содержанию некоторых литофильных и редкоземельных элементов. Таким образом, лерцолит-гарцбургитовые включения, вынесенные на поверхность щелочно-базальтовыми лавами, характеризуют литосферную мантию разнородных тектонических структур региона и могут свидетельствовать о преобразовании литосферной мантии под влиянием мезо-кайнозойских тектоно-магматических процессов, таких как разновозрастная субдукция, формирование slab-windows и раскрытие окраинного Японского моря.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Приходько В.С., Петухова Л.Л.** Состав и строение литосферной мантии Дальнего Востока России по данным изучения глубинных ксенолитов. Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит Материалы конференции. Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 266-267.

2. **Сахно В.Г. Денисов Е.П.** К вопросу о происхождении включений ультраосновных пород в базальтах юга Дальнего Востока // Изв. АН СССР. Сер. Геол. 1963. № 8. С. 43-55.

3. **Чащин А.А., Сахно В.Г., Нечаев В.П., Нечаева Е.В., Блохин М.Г.** Распределение микроэлементов в лерцолитовых включениях из позднекайнозойских щелочных базальтов юга Дальнего Востока России. Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Материалы конференции. Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 316-318.

4. **Щека С.А.** Базит-гипербазитовые интрузии и включения в эффузивах Дальнего Востока. М.: Наука, 1983. 161 с.

5. **Ionov D.A., Guo P., Nelson W.R., Shirey S.B., Willbold M.** Paleoproterozoic melt-depleted lithospheric mantle in the Khanka block, far eastern Russia: Inferences for mobile belts bordering the North China and Siberian cratons // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2020. V. 270. P. 95-111.

6. **Pearson D.G., Canil D., Shirey S.B.** Mantle samples included in volcanic rocks: xenoliths and diamonds. Book Chapter in “Treatise on Geochemistry”. 2014. P. 169–253.

7. **Reisberg L., Aulbach S.** Continental lithospheric mantle. Book Chapter in “Treatise on Geochemistry”, Elsevier Inc., 2025. P. 773-865

ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ГРАНИТО-ГНЕЙСОВЫХ КУПОЛОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ КАМЧАТКИ

З.Г. Бадредино[1], Б.А. Марковский[2]

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: badre9@mail.ru

[2]Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Геодинамический режим континентальной окраины трансформного типа характеризуется интенсивным проявлением сдвиговых дислокаций и синсдвиговым рифтогенезом. Исследование магматических и метаморфических пород Центральной Камчатки показывает, что закономерными типами магматических образований такого геодинамического режима являются ультраосновные вулканиты, приуроченные к зонам глубинных разломов и гранито-гнейсовые купола, трассирующие участки растяжения земной коры.

GEODYNAMIC CONDITIONS OF FORMATION OF GRANITE-GNEISS DOMES OF CENTRAL KAMCHATKA

Z.G. Badredinov[1], B.A. Markovsky[2]

[1]Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, e-mail: Badre9@mail.ru

[2]Karpinsky Russian Geological Research Institute, St. Petersburg

Abstract. The geodynamic regime of the continental margin of the transform type is characterized by intensive manifestation of shear dislocations and syn-shear rifting. The study of igneous and metamorphic rocks of Central Kamchatka shows that the regular types of igneous formations of such a geodynamic regime are ultrabasic volcanics confined to zones of deep faults and granite-gneiss domes tracing areas of crustal extension.

Новый взгляд на историю геологического развития зоны перехода азиатского континента к Тихому океану, устанавливающий периоды трансформного скольжения плит Палеопацифики относительно континентальной окраины [2, 3, 8, 9] в позднем мезозое требует ревизии сложившихся представлений на геологическую историю Камчатского региона. Согласно выше процитированным авторам, в течение мела – раннего палеогена существовали периоды, когда этот регион испытывал интенсивные сдвиговые

дислокации, обусловленные геодинамическим режимом континентальной окраины трансформного типа.

Интервал 110-50 млн лет в геологической истории Центральной Камчатки по данным цирконометрии магматических, метаморфических и осадочных пород [1] ознаменовался следующими событиями: 1 – формированием окраинного осадочного бассейна с нижней возрастной границей терригенных накоплений и переслаивающихся с ними вулканогенных отложений (107-100 млн лет); 2 – формированием крупных массивов гранитоидных пород (83-76 млн лет) – Крутогоровский и Кольский гранитоидные плутоны [6]; 3 – внедрением никеленосных расслоенных интрузий базитов (68-46 млн лет); 4 – становлением мелких массивов гранитоидов (54-52 млн лет); 5 – зональным коллизионным метаморфизмом (52-49 млн лет) с пиковыми значениями (P=6-7 кбар, T=650 °C).

Гранитоидные массивы Кольского и Крутогоровского магматических комплексов и вмещающие их метаморфические породы формируют в структуре Срединного хребта Камчатки цепь гранито-гнейсовых куполов, простирающуюся вдоль его осевой линии в северо-восточном направлении на расстояние более 150 км – от истоков реки Пымта на юге до реки Ича на севере [4, 6]. На указанном отрезке установлены 4 гранито-гнейсовые купольные структуры (с юга на север): Пымтинская, Кольская, Крутогоровская и Ичинская. Особенностью метаморфических пород этих купольных структур является линейность метаморфических минералов (биотита, кварца, плагиоклаза), отличающаяся постоянным склонением (260-270 градусов), независимым от ориентировки сланцеватости и складчатости метапород, что является характерным признаком гранито-гнейсовых куполов кордильерского типа [5].

Минеральная линейность метаморфических пород гнейсовых куполов западного побережья Северной Америки выдерживается на расстоянии 900 км. Еще более протяженной структурой с устойчивой ориентацией минеральной линейности является цепь гнейсовых куполов Забайкалья [5], протягивающаяся на расстояние 1400 км.

На рисунке 1 приведен пример соотношения линейности и сланцеватости Кольского гранито-гнейсового купола Центральной Камчатки.

Угол между склонением минеральной линейности и ориентацией зоны расположения гнейсовых куполов Центральной Камчатки, простирающейся в северо-восточном направлении по азимуту 15-20 градусов, варьирует в пределах 40-45 градусов, что можно объяснить распределением векторов напряжения земной коры в период метаморфизма.

Такой же угол образуют простирание линейности и ориентация зоны гнейсовых куполов Забайкалья. Очевидно, в обоих примерах наблюдаются общие закономерности распределения тектонических сил напряжения земной коры в период сдвиговых дислокаций [8].

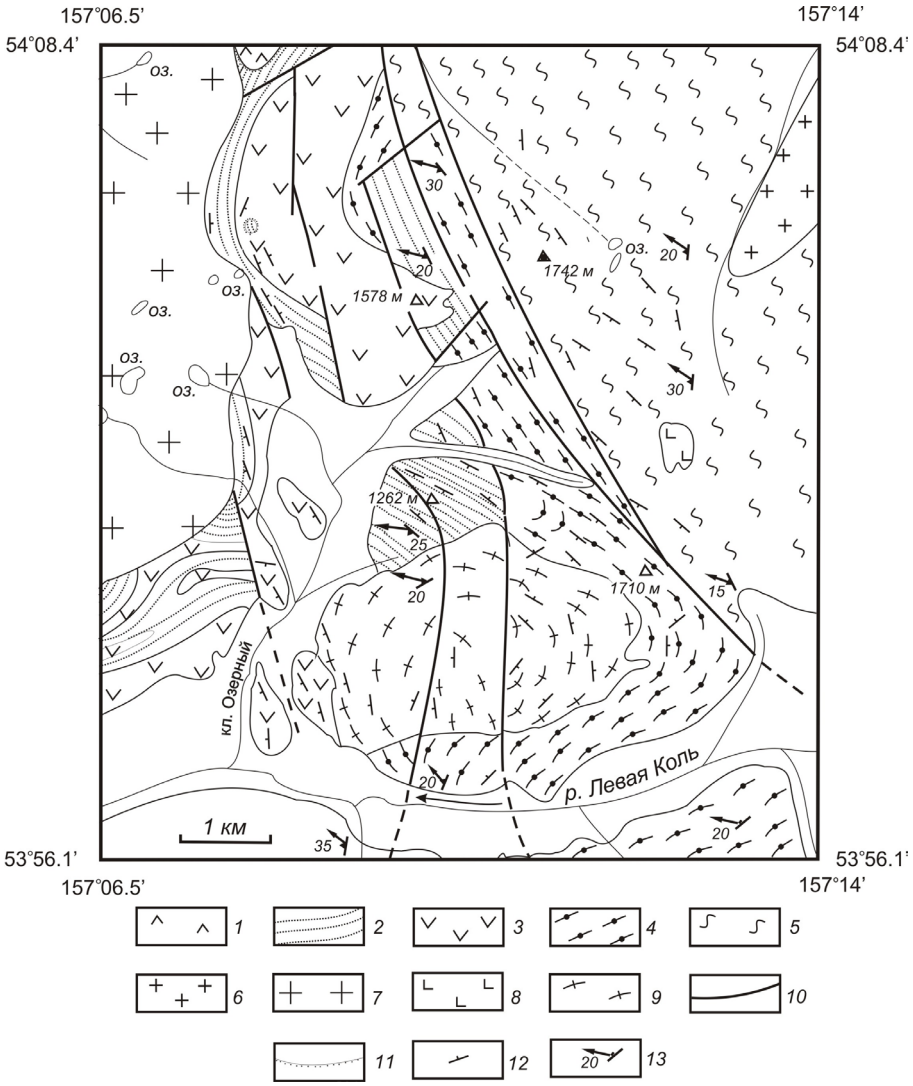


Рисунок 1. Схематическая геологическая карта Кольского гранито-гнейсового купола (верховье р. Левая Коль).

1 – черепановская свита – андезиты, андезитобазальты, туфы (палеоцен); 2 – кихчикская серия (ранний мел) – алевролиты, аргиллиты, полимиктовые песчаники, будины кремнисто-известковистого состава; 3 – алисторская свита (ранний мел) - метапикриты, метапикробазальты, туфы; 4 – хейванская свита (ранний мел) – филлиты, кристаллические сланцы, слюдистые метапесчаники; 5 – колпаковская серия (ранний мел) – плагиогнейсы, мигматиты, будинированные прослои амфиболитов, гранатовых амфиболитов и основных кристаллических сланцев; 6 – синметаморфические лейкократовые гранат-слюдистые граниты и пегматиты (эоцен); 7 – третичные граниты и гранодиориты лавкинского интрузивного комплекса; 8 – метаморфизованные габброиды (ранний палеоген); 9 – гнейсированные граниты, гранодиориты и кварцевые диориты Кольского интрузива (поздний мел); 10 – тектонические нарушения; 11 – контактовые ореолы; 12 – элементы залегания слоистости, полосчатости и гнейсовидности; 13 – ориентировка сланцеватости пород и минеральной линейности (длинная стрелка).

Figure 1. Schematic geological map of the Kola granite-gneiss dome (Levaya Kol River).

1 - Cherepanovskaya suite - andesites, andesite-basalts, tuffs (Paleocene); 2 - Kikhchik series (Early Cretaceous) - siltstones, argillites, polymictic sandstones, boudins of siliceous-calcareous composition; 3 - Alistor suite (Early Cretaceous) - metapicrites, metapicrobasalts, tuffs; 4 - Heyvan suite (Early Cretaceous) - phyllites, crystalline schists, micaceous metasandstones; 5 - Kolpakovka series (Early Cretaceous) - plagiogneisses, migmatites, boudinage interlayers of amphibolites, garnet amphibolites and basic crystalline schists; 6 – synmetamorphic leucocratic garnet-mica granites and pegmatites (Eocene); 7 – Tertiary granites and granodiorites of the Lavkinsk intrusive complex; 8 – metamorphosed gabbroids (Early Paleogene); 9 – gneissic granites, granodiorites and quartz diorites of the Kola intrusion (Late Cretaceous); 10 – tectonic faults; 11 – contact aureoles; 12 – bedding elements of layering, banding and gneissosity; 13 – orientation of rock foliation and mineral lineation (long arrow).

Гнейсовые купола Камчатки трассируют зону синсдвигового растяжения коры. Начальный этап рифтогенеза проявился в заложении окраинного осадочного бассейна (110 млн лет) и глубинными разрывными нарушениями, служившими магмоводами для подъема к поверхности мантийных ультраосновных расплавов (100 млн лет), сформировавших толщи ультраосновных вулканитов (химкинская и олисторская толщи). Подток глубинных флюидов в коровый субстрат инициировал процесс гранитообразования (83-76 млн лет), на фоне которого происходило затухание глубинного мантийного магматизма с внедрением пластовых расслоенных интрузий роговообманковых габброидов (68-46 млн лет). Последовавший за этим надвиг фрагментов вулканических пород со стороны океана (ирунейская, кирганикская толщи) на континентальную окраину (коллизия) привел к погружению и зональному метаморфизму осадочно-вулканогенных отложений Центральной Камчатки (52-49 млн лет), интрудированных гранитоидными и габброидными массивами. Минеральная линейность указывает на стрессовый (направленный) характер давления, сопровождавшего метаморфизм. В этот же период (54-52 млн лет) происходит формирование мелких интрузий гранитоидов, отличительной особенностью которых является отсутствие в них минеральной линейности.

Процесс становления гранито-гнейсовых куполов Камчатки завершился эрозией верхних горизонтов обдуцированных вулканогенных отложений и изостатическим всплыванием гранитоидных массивов (Кольский и Крутогоровский гранитоидные комплексы) и вмещающих их метапород с формированием купольного свода Центральной Камчатки. Куполообразование сопровождалось дислокационным метаморфизмом с рассланцеванием метапород без перикристаллизации метаморфических минералов. Этим объясняется независимость минеральной линейности от наложенных на метаморфизованные породы сланцеватости и складчатости. Главным фактором, который привел к течению пород в твердом состоянии являлась их флюидонасыщенность (эффект Ребиндера [7]), о чем свидетельствует наличие в метапородах большого количества послойных и секущих жил кварцевого и кварц-полевошпатового составов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бадрединов З.Г., Марковский Б.А.** Возрастные диапазоны цирконов камчатско-Корякского региона (по данным цирконовой геохронологии) // Тихоокеанская геология, 2024. Т. 43. № 6. С. 72-83.

2. **Голозубов В.В., Ханчук А.И., Симаненко В.П.** Геодинамика восточной окраины Азии в мел-палеогеновое время // Материалы XLIII Тектонического совещания «Тектоника и геодинамика складчатых поясов и платформ фанерозоя». Москва: ГЕОС, 2010. С. 172-174.

3. **Диденко А.Н., Ханчук А.И.** Смена геодинамических обстановок в зоне перехода Тихий океан–Евразия в конце раннего мела // Докл. АН. 2019. Т. 487. № 4. С. 405–408.

4. **Синица С.М., Шашкин К.С.** Плагиограниты Срединного хребта, их возраст, фациальные черты и место в структурной эволюции камчатских метаморфид // Корреляция эндогенных процессов Тихоокеанского пояса. Владивосток: ДВГИ ДВНЦ АН СССР, 1979. С. 102–110.

5. **Скляров Е.В., Мазукабзов А.М., Мельников А.И.** Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа. Новосибирск: СО РАН НИЦ ОИГГМ, 1997. 182 с.

6. **Тарарин И.А., Бадрединов З.Г., Чубаров В.М.** Петрология и рудоносность метаморфических и магматических комплексов Центральной и Восточной Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2015. 302 с.

7. **Траскин В.Ю.** Эффект Ребиндера в тектонофизике // Физика Земли. 2009. № 11. С. 22-33.

8. **Уткин В.П.** Сдвиговый структурный парагенез и его роль в континентальном рифтогенезе Восточной окраины Азии // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 3. С. 21-43.

9. **Филатова Н.И.** Окраинно-континентальный синсдвиговый маастрихт-палеогеновый магматизм Востока Азии (к проблеме "поясов" Корякско-Западнокамчатского региона) // Петрология. 2015. Т. 23. № 4. С. 363-385.

МАГМАТИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ ИТМУРУНДИНСКОЙ И ТЕКТУРМАССКОЙ СКЛАДЧАТЫХ ЗОН ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА: ВОЗРАСТ, ПЕТРОГЕНЕЗИС И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ

А.В. Гурова[1,2], И.Ю. Сафонова[1,2,3], А.А. Перфилова[2], П.Д. Котлер[1], И.А. Савинский[2]

[1]Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: sushka386@gmail.com

[2]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

[3]Юго-западный университет Цзяотун, Чэнду, Китай

Аннотация. Итмурундинская (ИСЗ) и Тектурмасская (ТСЗ) складчатые зоны являются важными структурами Казахстанского ороклина в западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса. Обе зоны включают аккретированные океанические магматические и осадочные комплексы с возрастом от позднего кембрия до раннего силура и надсубдукционные офиолиты. В работе представлены новые геохронологические и геохимические данные, а также первые изотопные данные по магматическим породам этих зон. Диорит из меланжа ИСЗ дал U-Pb возраст по циркону на уровне 502 млн лет, а гранит и риолит из ТСЗ – 459 и 452 млн лет соответственно. В обеих зонах выделены три основные группы магматических пород: (1) высокотитанистые, (2) среднетитанистые и (3) низкотитанистые. Высоко-Ti базальты обогащены высокозарядными элементами и ЛРЗЭ; они образовались при плавлении 2-4% обогащенного редкими элементами гранатового перидотита и излились в обстановке океанического острова/симаунта. Средне-Ti базальты и габбро близки к N-MORB типу и образовались из деплетированного шпинелевого лерцолита при степенях плавления до 10%. Низко-Ti группа пород обеднена высокозарядными элементами, а их образование связано с высокими степенями плавления (15-30%) умеренно деплетированного мантийного источника, что предполагает их формирование в обстановке внутриокеанической островной дуги. Магматические породы всех типов были тектонически совмещены в ИСЗ и ТСЗ в процессе процессов субдукции Палеоазиатского океана и его последующего закрытия.

MAGMATIC COMPLEXES OF THE ITMURUNDY AND TEKTURMAS FOLDED ZONES, CENTRAL KAZAKHSTAN: AGE, PETROGENESIS AND GEODYNAMIC SETTINGS

A.V. Gurova[1], I.Yu. Safonova[1,2], A.A. Perfilova[2], P.D. Kotler[1], I.A. Savinsky[2]

[1]*V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, e-mail: sushka386@gmail.com*

[2]*Novosibirsk State University, Novosibirsk*

[3]*Southwest Jiaotong University, Chengdu, China*

Abstract. The Itmurundy (IFZ) and Tekturmas (TFZ) folded zones are important structures of the Kazakhstan Orocline in the western Central Asian Orogenic Belt. Both zones include Cambrian to Silurian accreted oceanic magmatic and sedimentary rocks and supra-subduction ophiolites. We present new geological, geochronological and geochemical data, first isotope data from magmatic rocks. The diorite from IFZ mélange yielded a U-Pb age of 502 Ma and granite and rhyolite from TFZ yielded 459 and 452 Ma, respectively. There are three main groups of magmatic rocks from both zones: (1) high-Ti, (2) mid-Ti, and (3) low-Ti. The high-Ti basalts are enriched in HFSE and LREE; they were derived at 2-4% melting of a rare elements enriched and isotopic depleted garnet-bearing peridotite and erupted on an oceanic island/seamount. The mid-Ti basalts and gabbro is N-MORB-type formed from a 10% melted depleted spinel lherzolite. The low-Ti group is depleted in HFSE, but not LREE, and formed at high degrees of melting (15-30%) of rare elements moderately depleted and isotopic ultra-depleted mantle sources suggesting their emplacement in an island arc setting. Magmatic rocks of all types were tectonically juxtaposed in the IFZ and TFZ during the early Paleozoic subduction of the Paleo-Asian Ocean and its subsequent closure.

Палеозойские складчатые пояса Центрального Казахстана, являющиеся частью Казахского ороклина, образовались на активных окраинах Палеоазиатского океана. Итмурундинская (ИСЗ) и Тектурмасская (ТСЗ) складчатые зоны относятся к Джунгаро-Балхашской складчатой области, а их структуры продолжаются на территорию СЗ Китая [6]. Обе зоны состоят из тектонических пластин, разделенных разломами и сложенных раннепалеозойскими офиолитами и фрагментами океанической коры и серпентинитового меланжа с блоками осадочных и магматических пород. В ИСЗ нами были изучены магматические породы из аккреционного комплекса и офиолитового массива Архарсу. Магматические породы аккреционного комплекса находятся в ассоциации с осадочными породами итмурундинской (O_2), казыкской (O_{2-3}), тюретайской (O_{2-3}) и обалинской (O_3) свит, возраст которых определен по микрофауне [1] и возрасту детритовых цирконов из песчаников [5]. В ТСЗ выделяются четыре структурно-формационные подзоны, разделенные разломами: центральные — Тектурмасская и Базарбайская, состоящие из серпентинитового меланжа и отложений свит аккреционного комплекса ордовикского возраста, и обрамляющие — Нуринская и Успенская,

сложенные силурийско-среднедевонскими флишевыми толщами. В ТСЗ были изучены магматические породы Тортаульских, Сарытаусских и Базарбайских офиолитов, а также в составе карамурунской (O_{1-2}) и кузекской свит (O_2) Тектурмасской и Базарбайской подзон. Возраст магматизма ИСЗ и ТСЗ оценивается по данным U-Pb датирования цирконов из пород серпентинитовых меланжей. U-Pb возрасты плагиогранитов ИСЗ составляют 530-498 [2], а роговообманкового диорита – 502 млн лет [5]. Для плагиогранитов ТСЗ возрасты плагиогранитов – 453-473 [2, 4], а риолита Базарбайской подзоны 452 млн лет [4].

Магматические породы ИСЗ и ТСЗ представлены в основном базальтами, андезибазальтами, долеритами и габбро и относятся преимущественно к толеитовой серии. По содержанию TiO_2 породы обеих зон разделены на три группы: высоко-Ti, средне-Ti и низко-Ti. Для высоко-Ti базальтов обеих зон отмечается обогащение в области легких редкоземельных элементов (ЛРЗЭ) и дифференциация в области тяжелых редкоземельных элементов (ТРЗЭ; La/Yb_N=2.7-13.9, Gd/Yb_N=1.9-3.7 для ИСЗ; La/Yb_N=4.3-5.6, Gd/Yb_N=2.2-2.8 для ТСЗ) при низких отношениях Zr/Nb (3.3-8.7 для ИСЗ, 2.4-6.3 для ТСЗ). На спайдер-диаграммах для них характерен максимум по Nb. Отдельная подгруппа щелочных андезитов по геохимическим характеристикам близка к высоко-Ti базальтам: обогащение ЛРЗЭ (La/Yb_N =2.6-10.9 для ИСЗ; La/Yb_N = 6.8-10.9 для ТСЗ), дифференциация ТРЗЭ (Gd/Yb_N=1.4-3.1 для ИСЗ; Gd/Yb_N=1.6-2.5 для ТСЗ) низкие отношения Zr/Nb (5.7-12.2 для ИСЗ; 5.7-5.9 для ТСЗ), положительная аномалия по Nb, но отрицательная аномалия по Ti на спайдер-диаграммах. Средне-Ti базальты и габбро имеют от плоских до обедненных ЛРЗЭ спектры (La/Yb_N = 0.2-0.4 для ИСЗ; La/Yb_N = 0.3-0.7 для ТСЗ), средние отношения Zr/Nb (26 для ИСЗ; 10-22 для ТСЗ) и максимумы Nb по отношению к Th, но не к La. Образцы из низко-Ti группы ИСЗ показывают как обогащение, так и обеднение ЛРЗЭ, а породы этой же группы ТСЗ – слабое обогащение ЛРЗЭ (La/Yb_N=0.3-9.6 для ИСЗ; La/Yb_N = 1.7-2.2 для ТСЗ). Для них характерно наличие на спайдер-диаграммах отрицательной аномалии по Nb при высоких отношениях Zr/Nb (11-40 для ИСЗ; 20-36 для ТСЗ).

Для высоко-Ti пород установлены средние до высоких положительные значения εNd(t) (+4.7 для ИСЗ; +3.5...+6.7 для ТСЗ) и повышенные отношения $^{206}Pb/^{204}Pb$ (19.0 для ИСЗ и 19.8 для ТСЗ), что указывает на компоненты DM и HIMU в исходных магмах. На диаграмме Пирса Nb/Yb – Th/Yb [3] точки составов высоко-Ti пород лежат на мантийном тренде вблизи точки OIB. Изотопные характеристики щелочных андезитов (εNd(t) = +6.2 (ИСЗ); +2.0...+4.7 (ТСЗ), $^{206}Pb/^{204}Pb$ = 22.8 (ТСЗ)) указывают на такой же смешанный источник, что и для OIB базальтов: на диаграмме Пирса они располагаются в пределах мантийного тренда близко к точке OIB. Средне-Ti базальты (ИСЗ) и габбро (ТСЗ) по составу близки к N-MORB. Для них характерны самые высокие значения εNd(t) (+4.6...+7.7 для ИСЗ и +8.1 для ТСЗ) и самые низкие $^{206}Pb/^{204}Pb$ (18.5

для ИСЗ и 18.9 для ТСЗ), что указывает на истощенный источник типа DM. На диаграмме Пирса они попадают в поле мантийного тренда возле точек N-MORB и PM. Значения εNd(t) низко-Ti группы положительные (+5.0…+7.1 для ИСЗ, +6.0…+10.8 для ТСЗ), а продатированный риолит ТСЗ дал и экстремально высокие положительные значения εHf(t) – +17.6…+19.3, что характерно для современных пород островодужной системы Идзу-Бонин. На диаграмме Пирса породы этой группы ложатся выше от линии мантийного тренда в область вулканической дуги.

Моделирование в системе Nb – Nb/Yb показало, что высоко-Ti базальты образовались при 2-4% плавлении гранатового перидотита. Средне-Ti базальты образовались из шпинелевого лерцолита при степенях плавления до 10%. Образование низко-Ti базальтов связано с высокими степенями плавления (15-30%) умеренно деплетированного мантийного источника.

Представленные данные по магматическим породам ИСЗ и ТСЗ предполагают их пространственное совмещение, близкий возраст, но образование в разных геодинамических обстановках. Высоко-Ti базальты и щелочные и субщелочные андезиты могли образоваться в обстановке океанического острова. Средне-Ti базальты образовались в обстановках срединно-океанического хребта. Низко-Ti базальты, андезиты, дациты и риолиты изливались в обстановке внутриокеанической островной дуги. Сходство характера ассоциаций магматических и осадочных пород, возрастных рубежей магматизма и изотопно-геохимических характеристик магматических пород ИСЗ и ТСЗ свидетельствуют об их формировании в результате эволюции единой раннепалеозойской конвергентной окраины тихоокеанского типа.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (государственные задания № 122041400044-2, FSUS-2025-0008).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Degtyarev K.E., Luchitskaya M.V., Tretyakov A.A., Pilitsyna A.V., Yakubchuk A.S.** Early Paleozoic suprasubduction complexes of the North Balkhash ophiolite zone (Central Kazakhstan): Geochronology, geochemistry and implications for tectonic evolution of the Junggar-Balkhash Ocean // Lithos. 2021. V. 380-381. P. 105818.

2. **Degtyarev K., Yakubchuk A. S., Luchitskaya M. V., Tolmachevaa T. Yu., Skoblenko (Pilitsyna) A. V., Tretyakov A. A.** Ordovician supra-subduction, oceanic and within-plate ocean island complexes in the Tekturmas ophiolite zone (Central Kazakhstan): age, geochemistry and tectonic implications // International geology review. 2021. V. 15. P. 2108–2150.

3. **Pearce J.A.** Geochemical fingerprinting of oceanic Basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust // Lithos. 2008. V. 100. P. 14-48.

4. **Safonova I., Gurova A., Perfilova A., Xiao W., Kotler P., Seltmann R., Soloshenko N., Dolgopolova A.** Magmatic complexes of the Tekturmas Fold-and-Thrust Belt, Central Kazakhstan: An overview and new implications for the early Paleozoic evolution of the Paleo-Asian Ocean // Earth-Science Reviews. 2025. V. 265. P. 105120.

5. **Safonova I., Savinskiy I., Perfilova A., Obut O., Gurova A., Krivonogov S.** A new tectonic model for the Itmurundy zone, Central Kazakhstan: linking ocean plate stratigraphy, timing of accretion and subduction polarity // Geoscience Frontiers. 2024. V. 15. P. 101814.

6. **Windley B.F., Alexeiev D., Xiao W., Kröner A., Badarch G.** Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt // Journal of the Geological Society. London. 2007. V. 164. P. 31–47.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЗДНЕМЕЛОВЫХ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ УЛЬБАНСКОГО ТЕРРЕЙНА (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

М.В. Киселёв, И.А. Александров, А.Ю. Лебедев

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: miron.kiselew@yandex.ru

Аннотация. Исследованы позднемеловые магматические породы савоякского вулканического и ульбанского интрузивного комплексов, распространённые на северо-востоке Ульбанского террейна – фрагмента юрской аккреционной призмы. Породы относятся к нормальному и умеренно-щелочному ряду в диапазоне от основных до кислых разностей. Преобладают магнезиальные умеренно глиноземистые и слабо высокоглиноземистые породы, относящиеся к высококалиевой известково-щелочной серии. Геохимические особенности пород отражают процесс их формирования в надсубдукционных условиях.

GEOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF LATE CRETACEOUS MAGMATIC ROCKS IN THE NORTHEASTERN PART OF THE ULBAN TERRANE (KHABAROVSK KRAI)

M.V. Kiselev, I.A. Alexandrov, A.Y. Lebedev

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: miron.kiselew@yandex.ru

Abstract. Late Cretaceous magmatic rocks from the Savoyak volcanic and Ulban intrusive complexes, widespread in the northeast of the Ulban terrain — a Jurassic accretionary complex — were studied. The rocks belong to the normal and moderately alkaline series ranging from basic to acidic varieties. Magnesian metaluminous and weakly peraluminous rocks belonging to the high-K calc-alkaline series predominate. Geochemical features of rocks reflect the process of their formation in supra-subduction settings.

Ульбанский террейн представляет собой юрскую аккреционную призму, преимущественно сложенную осадочными породами турбидитового происхождения — алевролитами, песчаниками и грубообломочными разностями с незначительным распространением маломощных прослоев кремнистых пород и базальтов на всем протяжении разреза [3]. Породы интенсивно смяты в складки с крутопадающими шарнирами и разбиты разломами северо-восточного и северо-западного, реже близширотного простираний [2]. Позднемеловые магматические тела занимают значительную

площадь террейна и выполняют ряд вулканических полей и отдельных плутонов.

В северной части Ульбанского террейна расположены магматические образования Ульбанского вулкано-плутонического ареала (ВПА). В него включают вулканические и субвулканические тела, сложенные породами савоякского вулканического комплекса (K_2sv) и наращивающие их по разрезу тела маймагунского вулканического комплекса (K_2mm). Их прорывают средние и кислые интрузии многофазного ульбанского интрузивного комплекса (K_2u) [2]. Возраст гранитоидов ульбанского комплекса K-Ar методом определен как сантон-кампанский [2], но позднее U-Pb датированием циркона для пород Бираңджинского массива было получено значение 90.7±1.7 млн лет [1], что отодвигает нижнюю границу возраста до сеноман-туронского времени. В экзо- и эндоконтактах Бираңджинского массива, расположенного в восточной части Тугурского полуострова, размещается золоторудное месторождение Кутын [1].

С целью определения геохимических характеристик пород, слагающих Ульбанскую вулкано-плутоническую ассоциацию (УВПА), были проанализированы образцы пород савоякского вулканического и ульбанского интрузивного комплексов. Состав магматических пород УВПА определяется типичной для известково-щелочной серии последовательностью от основных до кислых разностей пород нормального и умеренно-щелочного рядов. Исследованные образцы интрузивных отвечают по составу гранодиоритам и гранитам, а вулканические породы — ряду от андезибазальтов до риодацитов (рис. 1 а-б).

Изученные образцы гранитоидов ульбанского комплекса обладают гипидиоморфнозернистыми, порфировидными структурами, в гранитах в основной массе отмечаются графические срастания щелочных полевых шпатов и кварца. Гранодиориты сложены плагиоклазом (40-45%), кварцем (15-20%), щелочным полевым шпатом (10-15%), амфиболом и биотитом (15%). В гранитах резко возрастает роль кварца (25%) и щелочного полевого шпата (40%), а плагиоклаз (15%), биотиты и амфиболы (10%) формируют крупные вкрапленники. Среди акцессориев присутствует циркон, монацит, сфен, апатит; рудный минерал, представленный как магнетитом, так и ильменитом.

Среди вулканических пород наиболее распространены андезиты, которые обладают порфировой структурой с гиалопилитовыми и пилотакситовыми структурами основной массы. Среди вкрапленииков отмечается плагиоклаз, пироксен, редко — оливин. Дациты характеризуются интерсертальными структурами основной массы и вкрапленниками плагиоклаза, щелочного полевого шпата, биотита, амфибола.

Петрохимические характеристики изученных образцов проиллюстрированы на диаграммах (рис. 1). Породы преимущественно магнезиальные и по индексу MALI принадлежат в основном к известково-

щелочной и щелочно-известковой сериям, единичные образцы попадают в поле щелочной серии (рис. 1 в-г). Преобладают умеренно глиноземистые и слабо высокоглиноземистые разности (рис. 1 д), что в целом соответствует характеристикам гранитоидов I-типа. По содержанию K_2O большая часть изученных образцов относится к высококалиевой известково-щелочной серии. Отмечается увеличение значения K_2O/Na_2O и содержаний крупноионных литофильных элементов (LILE: Ba, Rb, Cs, U, Th) с увеличением содержаний SiO_2.

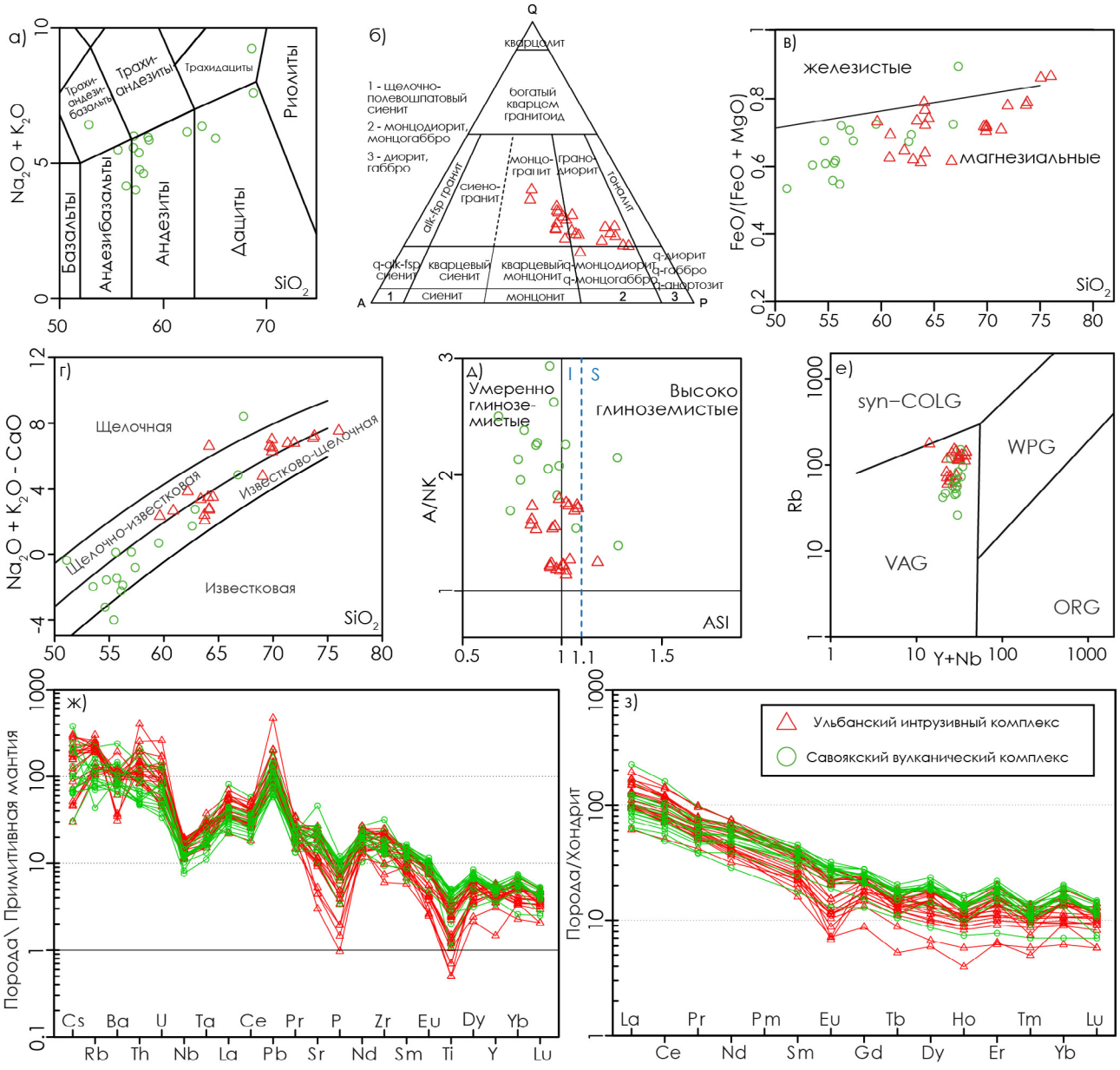


Рисунок 1. Составы исследованных пород на геохимических диаграммах.

Figure 1. Compositions of the studied rocks on geochemical diagrams.

На нормированных к примитивной мантии спайдер-диаграммах (рис. 1 ж) для всех изученных пород характерны отрицательные аномалии Ta, Nb, Ti, P и положительные — Pb. Для некоторых образцов характерны

слабые положительные и отрицательные аномалии Sr, Zr, Y. Наиболее кислые разности демонстрируют очень низкие значения некоторых высокозарядных элементов (HFSE: Zr, Hf, Ti и др.).

На спайдер-диаграммах РЗЭ, нормированных к хондриту (рис. 1 з), отмечается отрицательный наклон графика, и низкие до умеренных степени фракционирования РЗЭ LaN/YbN = 4-18, при сумме в 71-211 г/т. Обращает на себя внимание присутствие у большинства образцов отрицательной аномалии Eu, причем «глубина» аномалии увеличивается с ростом содержаний SiO_2.

На диаграммах по [6] (рис. 1 е) образцы соответствуют гранитоидам вулканических дуг, что соотносится и с их другими характеристиками. На диаграммах по [5] также отмечается приуроченность к надсубдукционным условиям, при этом наиболее кислые разности (SiO_2>70%) по содержаниям Al_2O_3 попадают в поле посторогенных гранитоидов, что, вероятно, является следствием высокой степени фракционной кристаллизации.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках гранта № 22-17-00198 (https://rscf.ru/project/22-17-00198/).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Азарян А.М.** Минералого-геохимическая характеристика и проблемы генезиса золоторудного месторождения Кутын, Хабаровский край // Дисс. канд. геол.-мин. наук, 2023. 134 с.

2. **Государственная** геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-53 – Шантарские острова (объяснительная записка) / Под ред. Г. В. Роганова // Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2007 г.

3. **Ханчук А.И., Кемкин И.В., Кириллов В.Е., Иванов В.В., Кирьянов М.Ф., Трушин С.И.** Ульбанский террейн (зона) как часть юрского аккреционного комплекса Сихотэ-Алинского орогенного пояса // Тихоокеанская геология. 2024. Т. 43. № 3. С. 3–18.

4. **Frost B.R., Barnes C.G., Collins W.J., Arculus R.J., Ellis D.J., Frost C.D.** A geochemical classification for granitic rocks // Journal of Petrology. 2001. V. 42. P. 2033–2048.

5. **Maniar P.D., Piccoli P.M.** Tectonic Discrimination of Granitoids // Geological Society of America Bulletin. 1989. V. 101. P. 635-643.

6. **Pearce J.A., Harris N.B., Tindle A.G.** Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks // Journal of Petrology. 1984. V. 25. P. 956-983

МЕЗОПРОТЕРОЗОЙСКИЙ ПИКРИТ-ПИКРОБАЗАЛЬТОВЫЙ ВУЛКАНИЗМ ЕНИСЕЙСКОГО КРЯЖА: ПЕТРОГЕОХИМИЯ, МЕТАМОРФИЗМ, RB-SR И ^{147}SM-^{143}ND СИСТЕМАТИКА

И.И. Лиханов[1], П.С. Козлов[2], А.Д. Ножкин[1], Ю.Л. Ронкин[2]

[1]Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: likh@igm.nsc.ru

[2]Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, e-mail: kozlov@igg.uran.ru

Аннотация. Получены первые Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd результаты о раннемезопротерозойском (~1370 млн лет) рифтогенном пикрит-пикробазальтовом вулканизме и метаморфизме Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса. Установленный возраст рифтогенного пикрит-пикробазальтового вулканизма и связанных с ним процессов метаморфизма в докембрии центральной части Енисейского кряжа коррелируется со временем формирования плагиогранитов немтихинского комплекса Енисейского кряжа и с Машакским плюмовым магматизмом на Урале, проявленными в геодинамической обстановке растяжения в период распада суперконтинента Нуна.

MESOPROTEROZOIC PICRATE-PICROBASALT VOLCANISM OF THE YENISEI RIDGE: PETROGEOCHEMISTRY, METAMORPHISM, RB-SR AND ^{147}SM-^{143}ND SYSTEMATICS

I.I. Likhanov[1], P.S. Kozlov[2], A.D. Nozhkin[1], Yu.L. Ronkin[2]

[1]Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, e-mail: likh@igm.nsc.ru

[2]Institute of Geology and Geochemistry UB RAS, Ekaterinburg, e-mail: e-mail: kozlov@igg.uran.ru

Abstract. The first Rb-Sr and ^{147}Sm-^{143}Nd results on Early Mesoproterozoic (c.1370 Ma) picrite-picrobasalt volcanism were obtained in the northern part of the Rybinsk-Panimbinsk volcanic belt. The established age of picrite-picrobasalt volcanism in the Precambrian of the central part of the Yenisei Ridge correlates with the time of occurrence of plagiogranites of the Nemtikhinsky complex and with the reference Mashak plume magmatism in the South Urals, manifested in the geodynamic environment of stretching during the collapse of the supercontinent Nuna.

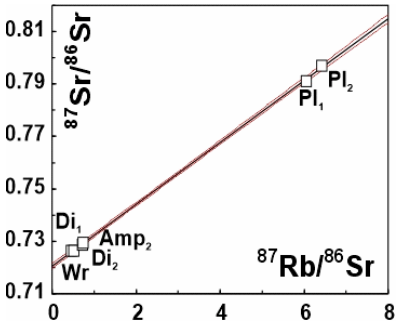
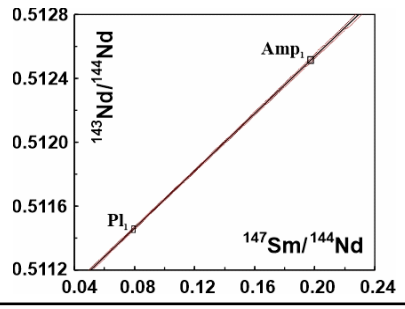
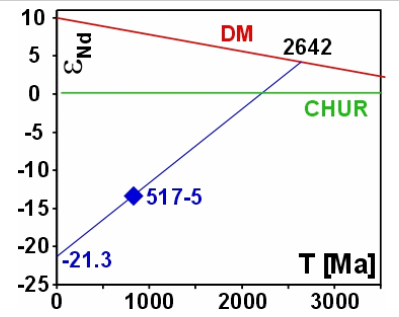
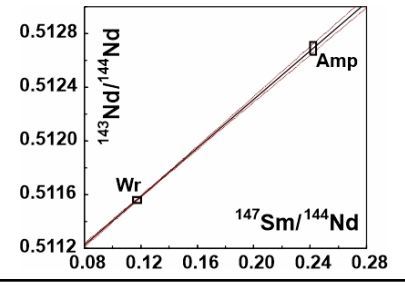
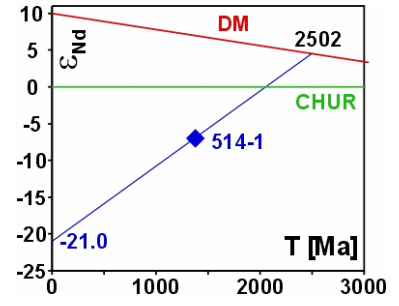
Реконструкция геологической истории Енисейского кряжа, представляющего собой коллизионно-аккреционный ороген на западной окраине Сибирского кратона, важна не только для понимания тектонической эволюции подвижных поясов, но и для верификации данных палеомагнитного моделирования о конфигурации древнего суперконтинента Нуны [8]. Детальный обзор мировых возрастных аналогов рифтогенных и внутриплитных магматических событий в интервалах времени 1380-1350 млн лет, установленных в структурах ряда крупных кратонов суперконтинента Нуны, приведен в работе [5]. Тем не менее, проблемы оценки геохронологических рубежей в истории этого суперконтинента во многом остаются дискуссионными и далеки от окончательного решения. Это связано с дефицитом геохимических данных и возрастных датировок, включающих периоды его становления и распада, что ограничивает возможности временных корреляций глобальных геологических процессов в истории Земли. Попытка восполнения этого пробела предпринята в настоящем докладе, где обсуждаются особенности происхождения, возрастной рубеж и стратиграфический уровень пикрит-пикробазальтового вулканизма Рыбинско-Панимбинского вулканического пояса на юго-западе Сибирского кратона. Повышенный металлогенический интерес к древней рифтогенной структуре вызван локализацией в районе исследования Панимбинского золоторудного и Татарского P-Ta-Nb месторождений [1].

Объект исследования — Ишимбинско-Татарская шовная зона, включающая Рыбинско-Панимбинский вулканический пояс (РПВП). Здесь изучены Панимбинский и Михайловский опорные участки, расположенные на севере РПВП Ишимбинско-Татарской шовной зоны. На Панимбинском участке интерес представляет панимбинская толща, сложенная метаморфизованными туффитами и туфами пикробазальтов и метаосадочными породами [1]. Толща метапород Михайловского участка имеет неоднородное строение, в её составе преобладают актинолитовые, хлорит-актинолитовые амфиболиты и двуполевошпатовые амфибол-диопсидовые метавулканиты. Перекрываются метавулканиты чёрными глинозёмистыми слюдисто-графитистыми сланцами с кордиеритом и андалузитом. Метаморфические породы района исследований слагают юго-восточную периферию Тейского метаморфического комплекса [2].

Результаты термобарометрии показали видимые различия в пределах погрешностей методов [6] по *P-T* параметрам формирования толщ разного химического состава: 4.8-4.9 кбар/527-549 °С — метатуффиты пикробазальтов; 5.0-5.8 кбар/543-612 °С – метабазиты; 3.5-4.6 кбар/522-636 °С — метапелиты.

Результаты изучения Rb-Sr и ^{147}Sm-^{143}Nd ID-TIMS изотопной систематики выполнены для образцов пород в целом и выделенных из них минералов (диопсиды, амфибол, плагиоклазы), представляющих кординскую свиту и панимбинскую толщу Ишимбинско-Татарской шовной зоны в северной части РПВП, соответственно (табл. 1).

Таблица 1.
Table 1.

Образец	Порода, минерал	Свита/ толща	Изотопная система	Возраст (млн лет), IR, ε_{Nd} (t)	Графическое представление
П-517-5	Метавулканит (Wr), диопсид (Di), амфибол (Amp), плагиоклаз (Pl)	Кординская свита, R_1	Rb-Sr	827±17, 0.72051 ±0.00089	
			^{147}Sm-^{143}Nd	1363±21, $\varepsilon_{Nd}(1363)$= -2.6	
				T_{DM}=2642, $\varepsilon_{Nd}(827)$ -13.4	
П-514-1	Метаморфизированный туф (туфолава?) пикробазальта (Wr), амфибол (Amp)	Панимбинская толща, R_3	^{47}Sm-^{143}Nd	1377±40, $\varepsilon_{Nd}(1377)$ -7.0	
				T_{DM}=2502, $\varepsilon_{Nd}(1377)$= -7.0	

Примечания: R1 – Нижнерифейская система, 1350–1650 млн лет. IR - Initial Ratio. Wr - порода в целом. T_{DM-1st}, T_{DM-2st} – одностадийный и двухстадийный Nd модельный возраст. CHUR, DM – линии эволюции хондритового и деплетированного модельных резервуаров.

ID-TIMS данные характеризующие изотопный состав Rb-Sr вулканита из основания нижней пачки метавулканогенно-осадочных пород кординской свиты (образец П-517-5) и выделенных из нее минералов двух диопсидов и плагиоклазов, на графике Николайсена удовлетворяет линии регрессии, наклон которой в указанных координатах определяет возраст метаморфической дифференциации регионально-метаморфизованных толщ 827±17 млн лет и величину первичного отношения изотопов стронция 0.72051±0.00089. Параметры референсной линии на графике $^{147}Sm/^{144}Nd$ *vs.* $^{143}Nd/^{144}Nd$ для плагиоклаза Pl_1 и амфибола Amp_1, соответствуют возрасту 1363±21 млн лет, $\varepsilon_{Nd}(1363) = -2,6$. Наконец, ^{147}Sm-^{143}Nd модельный возраст, соответствующий точке пересечения линий эволюции изотопного состава неодима и деплетированного резервуара (DM) на графике T *vs.* $\varepsilon_{Nd}(t)$, имеет величину 2642 млн лет.

На графике в координатах $^{147}Sm/^{144}Nd$ *vs.* $^{143}Nd/^{144}Nd$ фигуративные точки породы в целом метаморфизованного туфа (образец П-514-1) и выделенного из нее амфибола, удовлетворяют линии согласования, параметры которой диагносцируют среднерифейский возраст 1377±40 млн лет, а также наличие определенного вклада корового материала, что подтверждается величиной $\varepsilon_{Nd}(1377)=-7,0$. Вычисленный, в рамках модельных представлений об эволюции деплетированной мантии, неодимовый возраст T_{DM} 2502 млн лет согласуется с рубежом неоархей — палеопротерозой.

Полученные значения возраста внутриплитного вулканизма и связанного с ним рифтогенного метаморфизма в Ишимбинско-Татарской шовной зоне подтверждены Rb-Sr, ^{147}Sm-^{144}Nd, U-Pb TIMS и SHRIMP-II (циркон) изотопией для границы бурзяния (R_1) и юрматиния на Южном Урале (R_2) [9]. Установленный возраст рифтогенного пикрит-пикробазальтового вулканизма и метаморфизма коррелирует со временем формирования плагиогранитов немтихинского комплекса [4] и с Машакским субглобальным плюмовым магматизмом, проявленными в геодинамической обстановке растяжения в период распада суперконтинента Нуна [7].

Работа выполнена за счет средств РНФ (проект № 21-77-20018-П).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Козлов П.С., Лиханов И.И.** Геология докембрийских комплексов Северо-Енисейского кряжа. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2024. 328 с.

2. **Лиханов И.И., Ревердатто В.В., Козлов П.С., Вершинин А.Е.** Тейский полиметаморфический комплекс в Заангарье Енисейского кряжа – пример совмещенной зональности фациальных серий низких и умеренных давлений // Докл. АН, 2011. Т. 436. № 4. С. 509-514.

3. **Kontorovich A.E., Khomenko A.V., Burshtein L.M., Likhanov I.I., Pavlov A.L., Staroseltsev V.S., Ten A.A.** Intense basic magmatism in the Tunguska petroleum basin, eastern Siberia, Russia // Petroleum Geoscience. 1997. V. 3. P. 359-369.

4. **Likhanov I.I.** Provenance, Age and Tectonic Settings of Rock Complexes (Transangarian Yenisei Ridge, East Siberia): Geochemical and Geochronological Evidence // Geosciences. 2022. V. 12. N 11. P. 402.

5. **Likhanov I.I., Santosh M.** A-type granites in the western margin of the Siberian Craton: implications for breakup of the Precambrian supercontinents Columbia/Nuna and Rodinia // Precambrian Research. 2019. V. 328. P. 128-145.

6. **Likhanov I.I., Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Memmi I.** Evidence from Fe- and Al-rich metapelites for thrust loading in the Transangarian Region of the Yenisey Ridge, eastern Siberia // Journal of Metamorphic Geology. 2004. V. 22. N 8. P. 743-762.

7. **Puchkov V.N., Ernst R.E., Ivanov K.S.** The importance and difficulties of identifying mantle plumes in orogenic belts: An example based on the fragmented large igneous province (LIP) record in the Ural fold belt // Precambrian Research. 2021. V. 361. P. 1-24.

8. **Reverdatto V.V., Likhanov I.I., Polyansky O.P., Sheplev V.S., Kolobov V.Y.** The Nature and Models of Metamorphism. Cham: Springer, 2019. 330 p.

9. **Ronkin Yu.L., Tichomirowa M., Maslov A.V.** The Southern Urals Large Igneous Province with an age of approximately 1380 Ma: Precision U-Pb ID-TIMS constraints // Doklady Earth Sciences. 2016. V. 468. P. 587-592.

ИЗОТОПНЫЕ (PB) СВИДЕТЕЛЬСТВА РАННЕДОКЕМБРИЙСКОЙ ЛИТОСФЕРЫ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПРИМОРЬЯ. ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ СЛЕДСТВИЯ

С.О. Максимов

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: hangar7@mail.ru

Аннотация. Установлена идентичность индикаторных изотопных свинцовых меток в базальтах Юго-Западного Приморья с базальтами на раннедокембрийском, кратонном основании: NCKC, вулканический ареал WEK на севере Китая и другие мировые провинции. Это согласуется с AR-PR_1 датировками (TRD Re-Os) континентальной литосферы Юго-Западного Приморья и непосредственными находками архейских коровых пород на Ханкайском массиве близ северной границы Шуфанского базальтового плато. Признаком континентальной компоненты литосферы Северо-Восточного Китая и Юго-Западного Приморья служат низкие значения U/Pb, что отразилось в низких изотопных отношениях ураногенных свинцов в базальтах. Углекислотный флюидный режим Земли на ранних этапах формирования коры в архее определял избирательный вынос U в составе карбонатных комплексов из верхней мантии с уменьшением μ, что обусловило изотопную специфику древней литосферы. Выдержанность изотопных характеристик Pb для пространственно разобщённых базальтовых ареалов свидетельствует о присутствии протяжённого (AR-PR_1) литосферного фундамента под восточной частью Ханкайского массива

ISOTOPIC (PB) EVIDENCE OF THE EARLY PRECAMBRIAN LITHOSPHERE OF SOUTH-WEST PRIMORYE. GEODYNAMIC CONSEQUENCES

S.O. Maksimov

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: hangar7@mail.ru

Abstract. The identity of the indicator isotope lead marks in the basalts of Southwest Primorye with basalts on the Early Precambrian, cratonic basement was established: NCKC, the WEK volcanic area in northern China and other world provinces. This is consistent with the AR-PR_1 dating (TRD Re-Os) of the continental lithosphere of Southwest Primorye and direct finds of Archean crustal rocks on the Khanka massif near the northern boundary of the Shufan basalt plateau. Low U/Pb values, which is reflected in low isotope ratios of uranogenic

leads in basalts, serve as a sign of the continental component of the lithosphere of Northeast China and Southwest Primorye. The carbon dioxide fluid regime of the Earth at the early stages of crust formation in the Archean determined the removal of U in the composition of carbonate complexes from the upper mantle with a decrease in μ, which determined the isotopic specificity of the ancient lithosphere. The consistency of Pb isotope characteristics for spatially isolated basalt areas indicates the presence of an extended (AR-PR_1) lithospheric basement beneath the eastern part of the Khanka massif

Идентификация различных изотопных компонентов и их происхождение в данной магматической ассоциации важны для понимания эволюции мантии и генезиса выплавляющихся магм. Восточная окраина Азии с позднего мезозоя является ареной активного рифтогенеза с деструкцией континентальной литосферы, утонением кратоногенного основания, замещением его молодой фанерозойской литосферой, эрозией и базификацией её континентального слоя. Определяющую (триггерную) роль в этих процессах играют геодинамические факторы, однако базальтовый вулканизм служит отчётливым показателем динамики раскрытия и глубины областей магмогенерации. Позднекайнозойская вулканическая активность на территории Северо-Восточного Китая и Приморья выразилась извержениями лав преимущественно базальтового состава с преобладанием щелочных разностей в китайских провинциях и толеитовых в Южном Приморье. Базальтовые ареалы рассредоточены в пространстве и тесно связаны с рифтогенными структурами, либо со структурами присдвигового растяжения [2]. Тектонические особенности территории Северо-Восточного Китая и Приморья отражают характерные структуры северо-восточного простирания [1], фиксируемые и в более древних породах фундамента, что свидетельствует о длительном существовании ведущего сдвигового режима деформаций в этом регионе как результате взаимодействия Евроазийской и западной части Тихоокеанской плит. Область проявления этого дисперсного базальтового вулканизма включает две основные тектонические структуры: Северо-Китайско-Корейский кратон (NCKC) и Центрально-Азиатский орогенный пояс (CAOB) и рассматривается как типичный пример реакции на рифтогенез, континентальное растяжение. NCKC имеет архей-раннепротерозойский возраст, а CAOB интерпретируется как складчатый пояс, занимающий область между Сибирским кратоном, NCKC и более мелкими Монголо-Охотскими блоками. Существует очевидная проблема глубинных источников этих базальтов как отражение динамики раскрытия.

Автором изучалась эволюция базальтового вулканизма Юго-Западного Приморья в составе крупных базальтовых построек: Шуфанского и Шкотовского плато. Обсуждаются изотопные особенности этих базальтов, среди которых для региональных корреляций наиболее важными представляются изотопные

составы свинца. Изотопный состав свинца нижней коры и литосферной мантии является функцией тектонотермального возраста коры [10]: нерадиогенный Pb может развиваться только в регионах, которые оставались стабильными в течение длительных периодов времени (например, кратоны), тогда как в областях, где орогенез произошел после формирования коры, изотопный состав Pb нижней коры «омолаживается» посредством смешивания с радиогенным Pb из верхней коры и магм, полученных из мантии. Наиболее характерным признаком континентальной компоненты литосферы Северо-Восточного Китая [9] и Юго-Западного Приморья является пониженное значение U/Pb, что отразилось в изотопном составе свинца базальтов по сравнению с источниками MORB, вулканических пород океанических островов, островодужных вулканитов и слэбовых выплавок. Наряду с некоторыми соотношениями микроэлементов в шуфанских базальтах (высокие значения Ba/Nb (15-57) и La/Nb (0.7-2.0)), они определяют субконтинентальный тип литосферного источника. Несколько пониженное значение Sm/Nd и повышенное Rb/Sr по сравнению с деплетированной астеносферной мантией также проявляется в изотопных отношениях Nd и Sr шуфанских базальтов. Согласно [11], источником характерных для базальтов Северо-Восточного Китая низких изотопных отношений ураногенных свинцов с появлением компоненты EMI служила древняя (архейская) метасоматизированная более 1 млрд лет назад субконтинентальная литосфера. Вместе с тем, изотопный состав калиевых лав ареала УЭК на севере Китая указывает, что подобная сигнатура EMI (LOMU) может быть распространена и на раннепротерозойскую субконтинентальную литосферную мантию [5]. Так как уран и торий легче, чем свинец вовлекаются в циклические процессы, будучи относительно подвижными элементами в геохимических циклах, на ранней стадии формирования первичной коры они в разных пропорциях выносились из мантийного субстрата, образующего литосферный киль кратонов со специфическим изотопным составом свинца. Уран, как известно, легко транспортируется в форме карбонатного комплекса $[UO(CO_3)_3]^{2-}$, который стабилен при высоких парциальных давлениях CO_2. Существенно углекислотный флюидный режим Земли на ранних этапах формирования коры в архее определял вынос U из верхней мантии с уменьшением μ. Была сформирована литосфера с низкими изотопными отношениями ураногенных свинцов при относительно повышенных значениях ториевогенного свинца, с чем связывается, вероятно, и проявление аномалии DUPAL. Подобные изотопные метки SCLM Шуфана требуют изоляции мантийного источника с относительно низкими значениями $^{238}U/^{204}Pb$ (μ) в течение первых млрд лет и не предполагают влияния океанических источников. Интервал значений $^{206}Pb/^{204}Pb$ для щелочных и толеитовых базальтов Шуфана составляет (17.294-17.987) и подобен базальтам из соседних ареалов на раннедокембрийском, кратонном литосферном основании: Ханнулоба (17.294-17.987); Куандян (17.294-

17,987), Чанбайшань (17.294-17.987), Удалиньчи (17.294-17.987), а также Хангай (Ц. Монголия) (17.294-17.987). Извержение лав с такими изотопными характеристиками в позднем кайнозое имеет важные следствия в отношении уникальности их изотопного мантийного состава, не коррелируемого с Тихоокеанской океанической мантией. Эта геохимическая особенность характерна для комплексов архейской и раннепротерозойской континентальной коры и их мантийного литосферного киля. Контаминацией древним (AR-PR_1) нижнекоровым веществом можно объяснить подобные свинцовые изотопные метки. Такой вывод сделан, например, для базитовых пород Британской провинции, где фундамент слагается архейскими гранулитами [12]. Однако если признаки контаминации отчётливо фиксируются в шуфанских толеитовых лавах, то для щелочных базальтов, содержащих лерцолитовые, глиммеритовые и уникальные апатит-биотит-санидиновые глубинные включения при отсутствии следов коровой контаминации, низкие концентрации ураногенных свинцов могут свидетельствовать о плавлении мантийного литосферного источника подобного изотопного состава. Изотопный состав обогащённых ксенолитов показал аналогичные базальтам значения Nd, Sr, Pb. Это предполагает древнюю природу обеднения ураном литосферной мантии под Юго-Западным Приморьем, определившую низкие значения Pb^{206} /Pb^{204} в базальтах.

В Юго-Западном Приморье распространены малые субинтрузивные массивы умерено кислых адакитов (P-K_2) [3], по своим геохимическим характеристикам подобные позднеюрским адакитам Северо-Восточного Китая, генезис которых рассматривается как плавление архейских эклогитов [6]. Синтез возрастов TRD (Os-Re) для мантийных пород и сульфидов в ксенолитах из базальтов Ханкайского массива в пределах территории Западного Приморья показал существование общего (PR1) (≥ 2,0 млрд лет) SCLM под этим восточным флангом CAOB [8]. Древний киль SCLM Ханкайского массива, вероятно, синхронен с SCLM в вулканическом ареале Ханнулоба на кратоне и сохранялся в течение фанерозойских орогенезов [8]. Эти результаты впервые показали, что SCLM Ханкайского блока, т. е. ближайшего сегмента CAOB к азиатско-тихоокеанской окраине, фактически не проявляет метасоматические эффекты, связанные с мезозойской субдукцией, сохраняя химические и изотопные признаки (включая Re/Os) своего формирования за 2Ga. По наклону Pb–Pb изохроны с использованием программы Isoplot рассчитан возраст предполагаемого источника шуфанских щелочных базальтов (рис. 1). Аналогично базальтам Чанбайшаня, Куандяна, Ханнулобы (кратонных ареалов), а также Удаляньчи, шуфанские лавы по изотопному составу Pb лежат в области LOMU выше линии NHRL, следовательно, они характеризуются сходными магматическими источниками, отвечающими архейскому возрасту. Архейский возраст амфиболитов установлен и непосредственно в юго-западной части Ханкайского массива [7], близ северной границы Шуфанского плато. Предполагается, что субконтинентальная мантия, подстилающая

раннедокембрийские континентальные блоки под Восточным Китаем и Приморьем, служила главным источником компоненты EMI (LOMU) в изученных базальтах, а компонента DM, близкая MORB, определялась апвеллингом субконтинентальной астеносферы в областях локальных декомпрессий, вызванных присдвиговым растяжением. Выдержанность изотопных свинцовых характеристик для пространственно разобщённых вулканических ареалов может свидетельствовать о существовании обширной области древнего (AR-PR$_1$) литосферного фундамента под восточной частью Ханкайского массива.

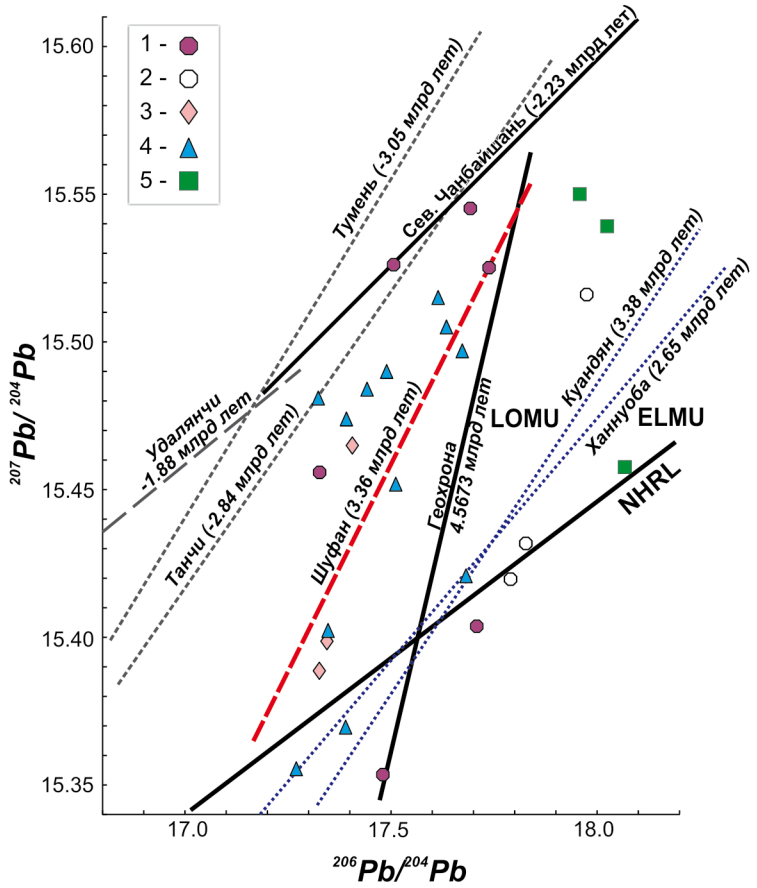


Рисунок1. Изотопные отношения ураногенного свинца ($^{207}Pb/^{204}Pb$ – $^{206}Pb/^{204}Pb$) позднекайнозойских базальтов на ранне-докембрийском основании: вулканические поля Чанбайшань и раннего этапа вулканизма поля Удаляньчи, вулканических ареалов Куандян и Ханнулоба в сравнении с базальтами Шуфанского плато и тренды с оценками возрастов источников магм (по данным [4, 11 и авторским неопубликованным материалам]).

Условные обозначения: 1 – шуфанские базальты основного лавового покрова; 2 – контаминированные базальты (андезитоиды); 3 - базальты Шкотовского плато; 4 – щелочные базальты; 5 – олигоценовые базальты амбинского комплекса (вероятного астеносферного происхождения).

Figure 1. Isotopic ratios of uranogenic lead ($^{207}Pb/^{204}Pb$ – $^{206}Pb/^{204}Pb$) of late Cenozoic basalts on the Early Precambrian basement: Changbaishan volcanic fields and early stages of volcanism of the Wudalianchi field, Kuandyang and Hannuloba volcanic areas depending on the basalts of the Shufan plateau and trends in determining the age of magma sources (based on data from [4, 11 and the author's unpublished materials]).

Legend: 1 – Shufan basalts of the main lava cover; 2 – contaminated basalts (andesitoids); 3 – basalts of the Shkotovsky plateau; 4 – alkaline basalts; 5 – Oligocene basalts of the Ambina complex (probably of asthenospheric origin).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Уткин В.П.** Сдвиговый структурный парагенез и его роль в континентальном рифтогенезе восточной окраины Азии // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 3. С. 21-43.

2. **Филатова Н.И.** Специфика магматизма окраинно - континентальных и окраинно - морских бассейнов синсдвиговой природы, западная периферия Тихого океана // Петрология. 2008. Т. 16. № 5. С. 480–500.

3. **Чащин А.А, Нечаев В.П., Нечаева Е.В., Блохин М.Г.** Находка эоценовых адакитов в Приморье. // Докл. АН. 2011. Т. 438. № 5. С. 649-654.

4. **Ясныгина Т.А., Рассказов С.В.** Pb-изотопная оценка возраста модельных источников позднекайнозойских базальтов вулканического поля Чанбайшань (Пектусан) и её значение в общей Pb-изотопной систематике Центральной Азии // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3. № 2. С. 75-89. doi.org/10.26516/2541-9641.2023.2.75

5. **Chen Y., Zhang Y., Graham D., Su S., Den J.** Geochemistry of Cenozoic basalts and mantle xenoliths in Northeast China // Lithos. 2007. V. 96. P. 108 -126.

6. **Gao S., Rudnick R.L., Yuan H.L., et al.** Recycling lower continental crust in the North China craton // Nature. 2004. V. 432. P. 892–897.

7. **Han S.J., Yang Y.C., Bo J.W., Zhang G.B. et al.** Late Neoarchean magmatic record of the Jiamusi–Khanka Block, Northeast China new clues from amphibolite zircon U-Pb geochronology and Lu-Hf Isotopes // Geological Journal. 2019. V. 55. P. 3401–3415.

8. **Ionov D.A, Guo P., Nelson W.R., Steven B. Shirey S.B., Matthias Willbold M.** Paleoproterozoic melt-depleted lithospheric mantle in the Khanka block, far eastern Russia: mobile belts bordering the North China and Siberian cratons // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2020. V. 270. P. 95-111.

9. **Peng Z.C., Zartman R.E., Futa K. and Chen D.G.** Pb, Sr and Nd isotopic systematics and chemical characteristics of Cenozoic basalts, eastern China // Chem. Geol. 1986. V. 59. P. 3-33.

10. **Rudnick R.L., Fountain D.M.** Nature and composition of the continental crust: A lower crustal perspective // Reviews of Geophysics. 1995. V. 33. N 3. P. 267.https://doi.org/10.1029/95rg01302

11. **Tatsumoto M., Basu A.R., Wanrkang H., Junwen W., Guanghong X.** Sr, Nd, and Pb isotopes of ultramafic xenoliths in volcanic rocks of Eastern China: enriched components EMI and EMU in subcontinental lithosphere // Earth and Planetary Science Letters. 1992. V. 113. P. 107-128.

12. **Thompson R.N., Dickin A.P., Gibson I.L. and Morrison M.A.** Elemental Fingerprints of Isotopic Contamination of Hebridean Palaeocene Mantle-Derived Magmas by Archaean Sial // Contrib Mineral Petrol. 1982. V. 79. P. 159-168.

МЕЛАНОКРАТОВЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В МОНЦОНИТАХ АРАРАТСКОГО МАССИВА (КАВАЛЕРОВСКИЙ РУДНЫЙ РАЙОН, ПРИМОРЬЕ).

А.А. Орехов[1], О.А. Гаврюшкина[2]

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: aa.orekhov@gmail.com

[2]Институт геологии и минералогии имени В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск

Аннотация: Проведено изучение состава и происхождения меланократовых включений, обнаруженных в монцонитах Араратского массива на участке Падь Васильева (Кавалеровский рудный район, Приморье). Показаны начальные результаты изучения этих геологических образований, а также выводы в отношении их вероятного происхождения. По минеральному составу порода включения отнесена к актинолитизированному горнблендиту. В ней обнаружены вкрапленники ильменита и магнетита, а также мелкие выделения сульфидов. Результаты анализа петрогенных элементов показали близость к габбро ранней интрузивной фазы Араратского массива. На данном этапе исследования предполагается, что включения — это ксенолиты (обломки пород ранней кристаллизации), захваченные и измененные в процессе внедрения кварцевых монцонитов поздней интрузивной фазы.

MELANOCRATIC INCLUSIONS IN THE MONZONITES OF THE ARARAT MASSIF (KAVALEROVO ORE DISTRICT, PRIMORYE, RUSSIA).

A.A. Orekhov[1], O.A. Gavryushkina[2]

[1]Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, e-mail: aa.orekhov@gmail.com

[2]Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk

Abstract: The composition of melanocratic inclusions, found in the monzonites of the Ararat massif at the Vasilyev Pad site (Kavalerovsky Rudny district, Primorye) have been studied. This abstract presents the initial results of the study of these geological formations. According to the mineral composition, the melanocratic inclusion is classified as actinolytic hornblendite. It contains ilmenite and magnetite inclusions, and small sulfide secretions. The petrogenic elements analysis showed the proximity to the gabbro of the early intrusive phase of the Ararat massif. At this stage of the study, it is assumed that the inclusions are xenoliths – fragments

of rocks of early crystallization, captured and modified during the introduction of quartz monzonites of the late intrusive phase.

Меланократовые включения часто встречаются в породах гранитного состава, но в каждом отдельно взятом случае их происхождение различно. Чаще такие включения рассматриваются в качестве ксенолитов вмещающих пород, захваченных магмой на уровне формирования магматической камеры или на пути движения магмы к поверхности. Вместе с тем, они могут быть и фрагментами субстрата, из которого выплавлялись кислые магмы, или продуктами ранней кристаллизации того же самого расплава. Исследование природы происхождения меланократовых включений имеет важное значение, так как несет в себе важную петрогенетическую информацию о магматических процессах.

Араратский массив площадью более 100 км^2 располагается в юго-западной части Кавалеровского рудного района и сложен субщелочными габбро-диоритами (ранняя интрузивная фаза — 105 ± 2 млн лет), кварцевыми монцонитами (поздняя фаза — 98,3 ± 2 млн лет), а также редко встречающихся измененными гранитами (апогранитами), имеющими возраст 78 ± 3 млн лет [2]. Породы массива относятся к габбро-монцонит-граносиенитовой ассоциации Березовского (или Березовско-Араратского) вулкано-плутонического комплекса, который, по данным изотопно-геохронологических исследований [1], наиболее близок к шошонит-латитовым (монцонит-сиенитовым) ассоциациям островных дуг. Ассоциация магматических пород, входящих в комплекс, также близка к интрузивной фации шошонитовой ассоциации [3].

Меланократовые включения встречены в монцонитах поздней фазы на участке Падь Васильева протяженностью около 10 км в южной части массива. Размер включений от 15 до 60 см, форма в основном округлая, реже удлиненная. Зона контакта включения с вмещающей породой однородная, переход четкий – без зоны закалки. Результаты изучения одного из включений приводятся далее (рис.1).

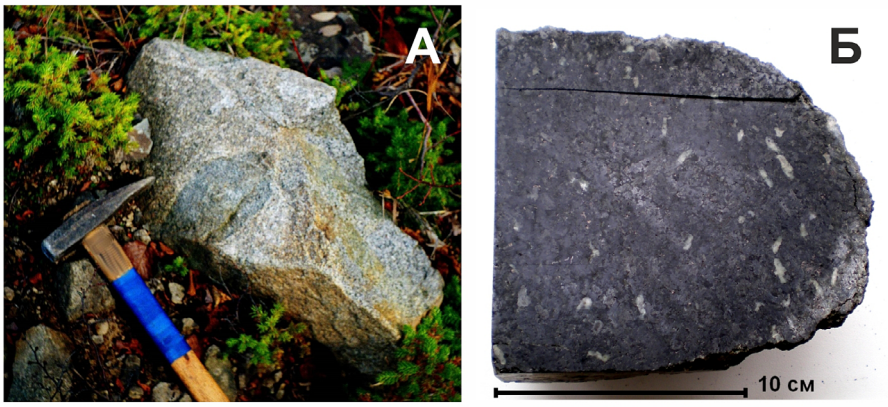


Рисунок 1. А - меланократовое включение в крупнозернистых монцонитах Араратского массива. Б – спил образца включения (размер 60 см в длину и 20 см в поперечнике).

Figure1. A - melanocratic inclusion in coarse-grained monzonites of the Ararat massif. B – cross-cut inclusion sample (60 cm long and 20 cm across).

Визуально включение представляет собой образование округлой, вытянутой (около 60 см) формы, текстура массивная. Основные породообразующие минералы — обыкновенная роговая обманка, содержащая реликты пироксена, актинолит и биотит (рис. 2). Также в качестве реликтов встречаются авгит и гиперстен, редки андезин и кварц. Актинолит в общей массе замещает все цветные минералы. По биотиту и актинолиту развиваются вторичные минералы — хлорит и серицит. По минеральному составу породу можно отнести к актинолитизированному горнблендиту. Акцессорные минералы представлены ильменитом, магнетитом и апатитом. Ильменит и магнетит присутствуют в виде вкрапленников, микровкрапленников и зернистых скоплений, вероятно образовавшихся в процессе изменения железосодержащих силикатов. Очень редки сфен и лейкоксен. Также обнаружены очень мелкие (менее 0,5 мм) выделения сульфидов – халькопирита, пирита, арсенопирита, сфалерита и кобальтина.

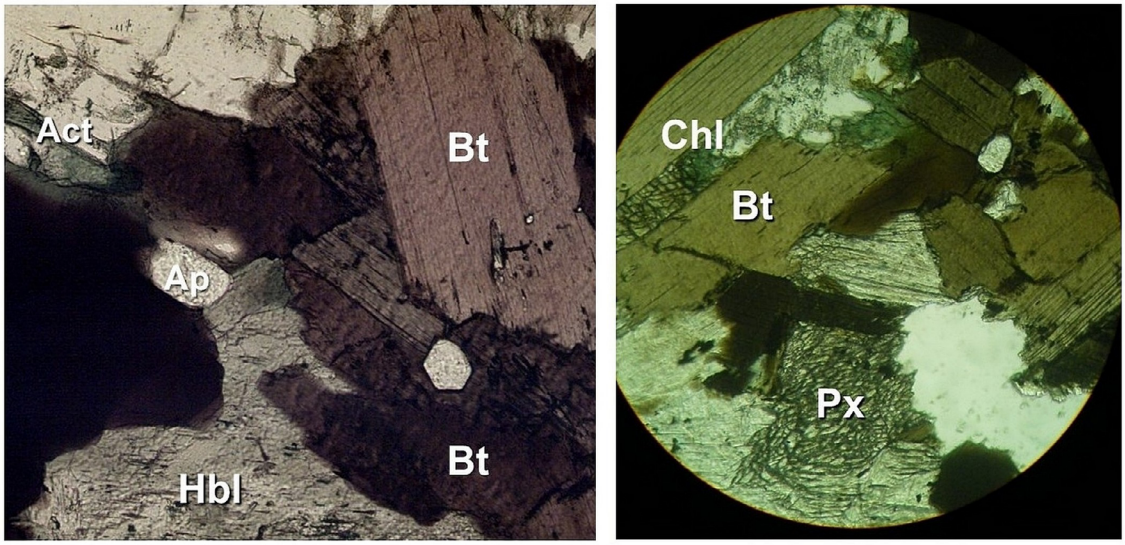


Рисунок 2. Микрофотографии шлифов меланократового включения Араратского массива, порода актинолитизированный горнблендит. Увеличение X10, без анализатора. Bt – биотит, Act - актинолит, Ap – апатит, Px – пироксен, Hbl – роговая обманка, Chl – хлорит.

Figure 2. Micrographs of the melanocratic inclusion of the Ararat massif, actinolytic hornblendite rock. Magnification X10, without analyzer. Bt – biotite, Act - actinolite, Ap – apatite, Px – pyroxene, Hbl – hornblende, Chl – chlorite.

По результатам анализа петрогенных элементов (РФА, ан. центр ДВГИ ДВО РАН), порода близка к габбро ранней интрузивной фазы Араратского массива. Спектральный анализ показал повышенные содержания хрома (210 г/т), кобальта (55 г/т) и цинка (250 г/т). Также отмечаются пониженные содержания рубидия (84 г/т – РФА) и стронция (88 г/т) относительно вмещающей породы. По результатам изучения образца на рентгеноспектральном микроанализаторе установлено содержание ванадия (до 0.7 мас. %) в отдельных зернах магнетита. В пирите содержания кобальта достигают значений до 18 мас. %. Отмечаются повышенные содержания фтора (до

4 мас. %) в апатитах (фторапатит), также в них обнаружены микровключения (~1-2 мкм) монацита (содержание церия до 15 мас. %).

Исходя из результатов начальной стадии исследования минерального и химического состава, а также морфологических особенностей, можно сделать вывод, что меланократовые включения в монцонитах Араратского массива, вероятнее всего, являются ксенолитами — обломками пород ранней кристаллизации, которые были захвачены и изменены в процессе внедрения кварцевых монцонитов поздней интрузивной фазы. Установленная специфика изученных образований: нормальная, слабая щелочность, высокая калиевость, высокие содержания фтора и хлора — характеризуют магматическую ассоциацию как изначально потенциально оловоносную.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гоневчук В.Г.** Оловоносные системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. Владивосток: Дальнаука, 2002. 297 с.

2. **Гоневчук В.Г., Гоневчук Г.А., Лебедев В.А., Орехов А.А.** Монцонитоидная ассоциация Кавалеровского рудного района (Приморье): геохронология и некоторые вопросы генезиса // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30. С. 20-31.

3. **Таусон Л.В., Антипин В.С., Захаров М.Н., Зубков В.С.** Геохимия мезозойских латитов Забайкалья. Новосибирск: Наука, 1984. 215 с.

ФРАГМЕНТЫ МАНТИЙНЫХ ПОРОД МЕТАСОМАТИЗИРОВАННОЙ ОКЕАНИЧЕСКОЙ ЛИТОСФЕРЫ В БАЗАЛЬТАХ ГАЙОТА ГОВОРОВА

И.С. Перетяжко, Е.А. Савина

Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск,
e-mail: pgmigor@mail.ru

Аннотация. Мелкие фрагменты (ксенолиты и ксенокристы) мантийных пород редко встречаются в вулканических породах гайотов Говорова, Альба и Коцебу. В базальтах гайота Говорова обнаружены ксенолиты паргасит-шпинелевого верлита, паргасит-клинопироксеновые жилы, ксенокристы паргасита и Cr-диопсида с включениями паргасита. По данным амфиболовой термобарометрии мантийные породы гайота Говорова формировались в P-T условиях шпинелевой фации перидотитов. Обсуждается схема метасоматических изменений лерцолитов океанической литосферы, подстилающей гайот Говорова.

FRAGMENTS OF MANTLE ROCKS OF METASOMATIZED OCEANIC LITHOSPHERE IN BASALTS OF GOVOROV GUYOT

I.S. Peretyazhko, E.A. Savina

A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk

Abstract. Small fragments (xenoliths, xenocrysts) of mantle rocks are rare in the volcanic rocks of the Govorov, Alba and Kocebu Guyots. Xenoliths of pargasite-spinel wehrlite, pargasite-clinopyroxene veins, xenocrysts of pargasite and Cr-diopside with pargasite inclusions were found in the basalts of the Govorov Guyot. According to amphibole thermobarometry, the mantle rocks of the Govorov Guyot were formed in P-T conditions of the spinel facies of peridotite. The scheme of metasomatic changes of lherzolite of the oceanic lithosphere underlying the Govorov Guyot is discussed.

До настоящего времени нет достоверной информации о строении океанической литосферы в районе Магеллановых гор Тихого океана. Данные о составе литосферы могут быть получены только при изучении мантийных ксенолитов в вулканических породах, слагающих массивы гайотов и подводных гор. Ксенолиты лерцолита, мантийные ксенокристы оливина, клинопироксена (Cpx) и ортопироксена (Opx) были найдены в миоценовом (15–20 млн лет) базаните и туфе на гайоте Альба [1, 6]. В измененных подводным выветриванием раннемеловых (121.2 ± 2.8 млн лет) базальтах гайота Говорова были впервые в Магеллановых горах обнаружены фрагменты метасоматизованных

мантийных пород: мелкие ксенолиты паргасит-шпинелевого верлита, паргасит-клинопироксеновых жил, ксенокристы паргасита и Cr-диопсида с включениями паргасита [4, 5]. В верлите идиоморфные зерна оливина полностью замещены агрегатом иддингсита и содержат включения шпинели, а Cr-диопсид образует срастания с паргаситом. Для Cr-диопсида характерны многочисленные микроскопические разноориентированные ламели шпинели.

Находки паргасит-содержащих мантийных пород свидетельствуют о метасоматических изменениях (верлитизации, амфиболизации) перидотитов океанической литосферы, подстилающей гайот Говорова. Верлит (Cpx-Ol перидотит) может формироваться при кристаллизации кумулятивных расплавов в условиях экстремально высокого давления либо в результате метасоматоза лерцолита (Cpx-Opx-Ol перидотита) под воздействием мантийных флюидосодержащих силикатных мафических расплавов [3]. Модель образования верлита в высокобарических условиях представляется маловероятной, поскольку мощность океанической литосферы Тихоокеанской плиты в меловой период (около 120 млн лет назад) при формировании базальтов с ксенолитами верлита на гайоте Говорова была менее 80–90 км, а паргасит в ксенолитах верлита, по данным амфиболовой термобарометрии, кристаллизовался в условиях шпинелевой фации при P < 2.5 ГПа (рис. 1). По нашим представлениям [5], вблизи литосферно-астеносферной границы (LAB) процессы мантийного метасоматоза изменили лерцолит под гайотом Говорова.

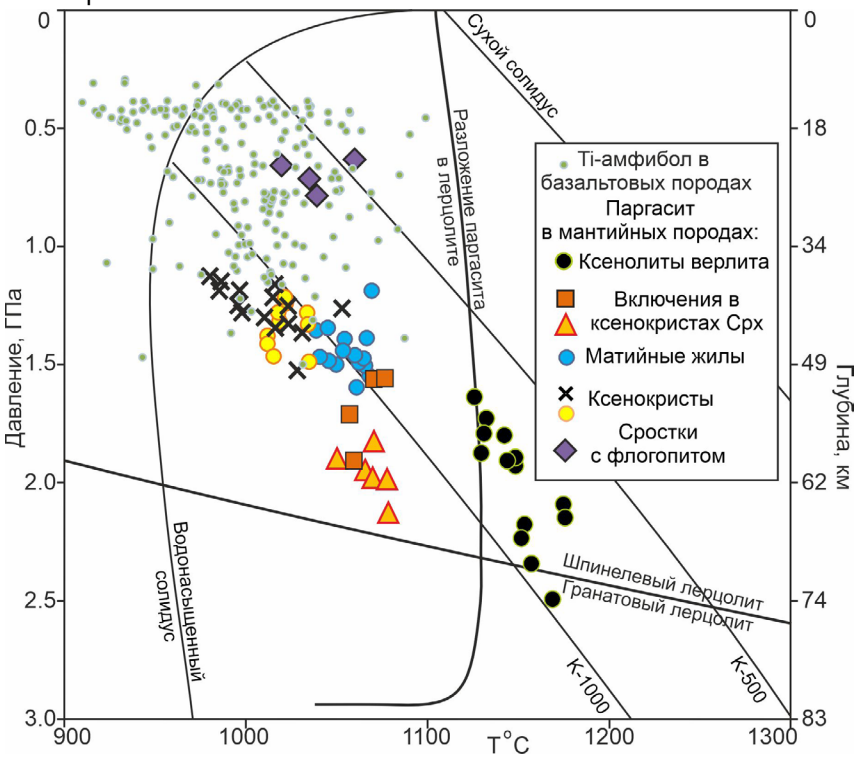


Рисунок 1. T-P условия кристаллизации Ti-амфибола и паргасита в вулканических и мантийных породах гайота Говорова по данным амфиболовой термобарометрии [7]. T-P параметры дегидратации паргасита в лерцолите, солидус перидотита (сухой, водонасыщенный, с примесью 500 ppm (K-500) и 1000 ppm (K-1000) H_2O) по [2], модифицировано из Peretyazhko et al., 2022 [4].

Figure 1. T-P conditions of Ti-amphibole and pargasite crystallization in volcanic and mantle rocks of the Govorov Guyot based on amphibole thermobarometry [7]. T-P parameters of pargasite dehydration in lherzolite, peridotite solidus (dry, water-saturated, with an admixture of 500 ppm (K-500) and 1000 ppm (K-1000) H_2O) according to [2], modified from Peretyazhko et al., 2022 [4].

В результате просачивания через лерцолит флюидосодержащего силикатного мафического расплава ортопироксен был полностью замещен, и последовательно кристаллизовалась минеральная ассоциация паргасит-шпинелевого верлита (рис. 2). На более высоких горизонтах океанической литосферы образовались метасоматические паргасит-клинопироксеновые жилы.

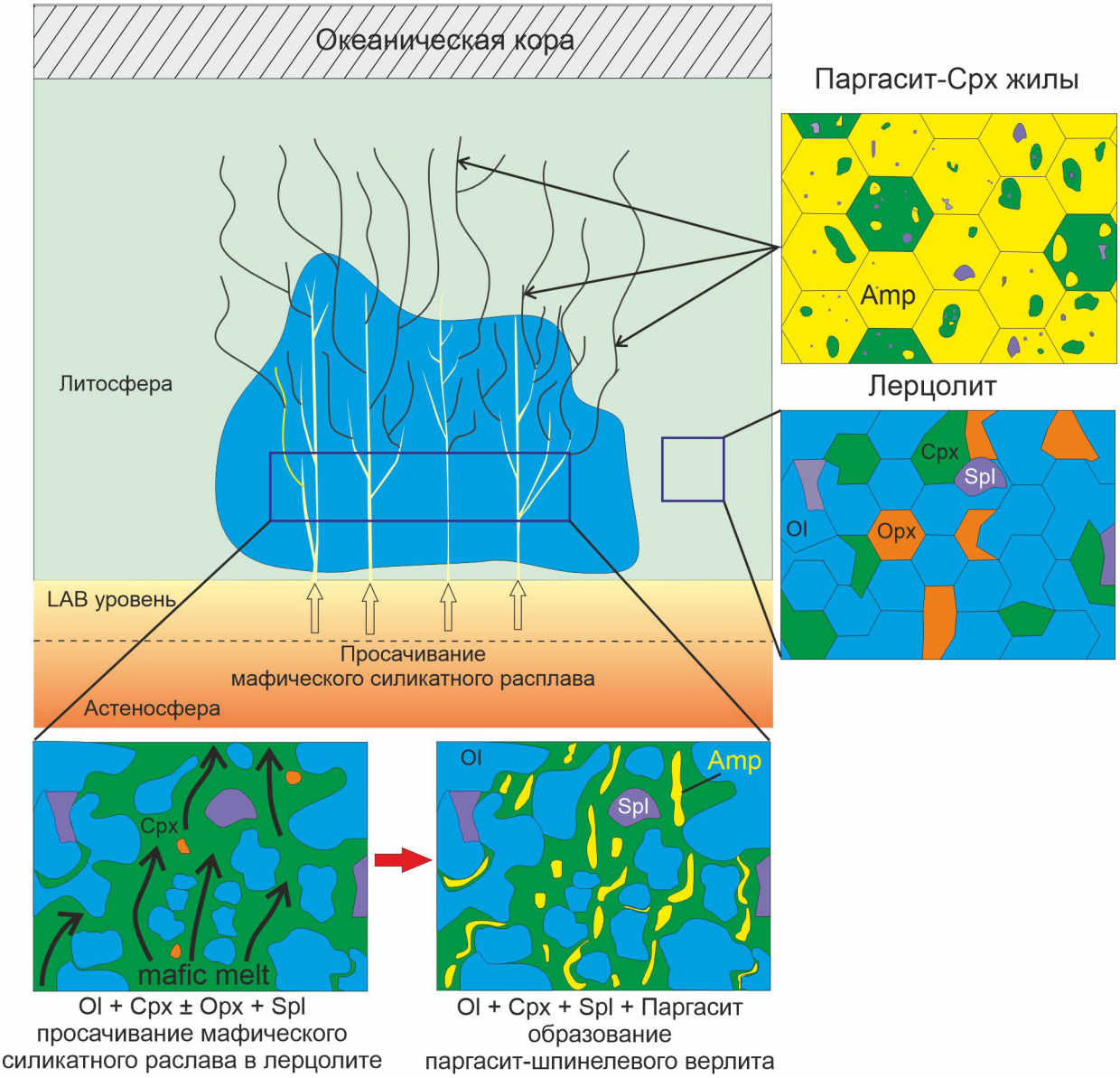


Рисунок 2. Схема метасоматических изменений лерцолита, в результате которых формировались паргасит-шпинелевый верлит и паргасит-клинопироксеновые мантийные жилы, модифицировано из Peretyazhko et al., 2022 [5].

Figure 2. Scheme of metasomatic alteration of lherzolite resulting in the formation of pargasite-spinel wehrlite and pargasite-clinopyroxene mantle veins, modified from Peretyazhko et al., 2022 [5].

Изучение вулканических и мантийных пород продолжается. В настоящее время в нескольких образцах, отобранных на гайотах Говорова, Альба и Коцебу, обнаружены новые фрагменты мантийных пород: из океанической коры, обломки мантийных жил и ксенокристов, ксенолиты перидотитов с

амфиболом (паргаситом, эденитом). Детальное исследование мантийных пород даст новую информацию о составе, строении и процессах метасоматоза литосферы, подстилающей гайоты Магеллановых гор.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 25-17-00128. Выражаем благодарность сотрудникам АО "Южморгеология", принимавшим участие работах НИС "Геленджик" и отборе пород на гайоте Говорова.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Перетяжко И.С., Савина Е.А., Пуляева И.А., Юдин Д.С.** Внутриплитный вулканизм гайота Альба: геодинамические модели формирования Магеллановых гор в Тихом океане на протяжении 100 млн лет // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 1. С. 3–33. https://doi.org/10.15372/GiG2021179

2. **Green D.H., Hibberson W.O., Rosental A., Kovács I., Yaxley G.M., Fallon T.J., Brink F.** Experimental study of the influence of water on melting and phase assemblages in the Upper Mantle // Journal of Petrology. 2014. V. 55. N 10. P. 2067–2096. https://doi.org/10.1093/petrology/egu050

3. **Patkó L., Liptai N., Aradi L.E., Klébesz R., Sendula E., Bodnar R.J., Kovács I.J., Hidas K., Cesare B., Novák A., Trásy B., Szabó C.** Metasomatism-induced wehrlite formation in the upper mantle beneath the Nógród-Gömör Volcanic Field (Northern Pannonian Basin): Evidence from xenoliths // Geoscience Frontiers. 2020. V. 11. N 3. P. 943–964. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2019.09.012

4. **Peretyazhko I.S., Savina E.A.** Mineral chemistry and formation conditions of minerals in metasomatized oceanic lithosphere and basaltic rocks of Govorov Guyot, Magellan Seamounts, Pacific Ocean // Minerals. 2022. V. 12. N 10. P. 1305. https://doi.org/10.3390/min12101305

5. **Peretyazhko I.S., Savina E.A.** Cretaceous intraplate volcanism of Govorov Guyot and formation models of the Magellan seamounts, Pacific Ocean // International Geology Review. 2022. V. 65. N 16. P. 2479–2505. https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2145512

6. **Peretyazhko I.S., Savina E.A., Pulyaeva I.A.** Miocene petit-spot basanitic volcanoes on Cretaceous Alba Guyot (Magellan Seamount Trail, Pacific Ocean) // Geosciences. 2024. V. 14. N 10. P. 252. https://doi.org/10.3390/geosciences14100252

7. **Ridolfi F.** Amp-TB2: An Updated Model for Calcic Amphibole Thermobarometry // Minerals. 2021. V. 11. N 3. P. 324. https://doi.org/10.3390/min11030324

ПЕТРОЛОГИЯ ДАРЬИНСКОГО ФОИДОЛИТ-ФОИДОСИЕНИТОВОГО КОМПЛЕКСА КЕТКАПСКО-ЮНСКОЙ МАГМАТИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ АЛДАНСКОГО ЩИТА (РФ) ПО ДАННЫМ ПЕТРОГЕОХИМИИ

В.Ф. Полин, Н.В. Зарубина, С.Ю. Будницкий

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: vfpolin@mail.ru

Аннотация. Раннемеловой фоидолит-фоидосиенитовый дарьинский комплекс образован «камафугитовой» и «тефрит-лейцитит» — щёлочносалической сериями. Выплавление фоидовых щёлочно-ультрабазитовых, фоидовых и фоид-содержащих щёлочно-базитовых магм происходило при малой доле парциального плавления обогащённой мантии, при непременном участии H_2O и CO_2. Образование мезитовых и салитовых фоидосиенитовых магм обусловлено сочетанием фракционной кристаллизации с избирательным усвоением корового материала флюидизированными мантийными магмами при их подъеме к поверхности.

PETROLOGY OF FOIDOLITE-FOIDOSYENITE DARYA COMPLEX IN KET-KAP-YUNA IGNEOUS PROVINCE OF THE ALDAN SHIELD (RUSSIA) BASED ON PETROGEOCHEMICAL DATA

V.F. Polin, N.V. Zarubina, S.Yu. Budnitsky

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: vfpolin@mail.ru

Abstract. The Early Cretaceous foidolite-foidosyenite Dar′ya complex is composed of “kamafugite” and “tephrite-leucitite” — alkaline-salic series. The foid alkaline-ultrabasic, foid and foid-bearing alkaline-basic magmas were generated by a small-scale partial melting of the enriched mantle with H_2O and CO_2 directly involved. The formation of intermediate and salic foidosyenite magmas was caused by fractional crystallization and selective assimilation of crustal material by fluidized mantle magmas as they ascended to the surface.

Происхождение фоидолитов, фоидовых сиенитов и фоид-содержащих щелочно-салических пород издавна привлекает внимание петрологов. Петрогенезис калиевых и калиево-натриевых щелочных пород представляет не только большой научный, но и значительный практический интерес, обусловленный широкой перспективностью этих образований в качестве глиноземного, калиевого и редкоземельного сырья. Имеющиеся петрогенетические модели пока не в состоянии удовлетворительно разрешить

проблему происхождения фоидовых и щелочных пород, пространственно, зачастую и во времени, тесно связанных с гранитоидами. Отдельным вопросом петрологии является становление щёлочно-ультраосновных и щёлочно-салических образований в составе подобных ассоциаций. С этих позиций, фоидолит–фоидосиенитовый дарьинский комплекс ККЮМП АЩ является несомненно важным объектом научных исследований.

Цель представляемой работы состоит в определении характерных черт петрогенезиса дарьинского комплекса, с использованием петрографических и петрогеохимических данных, в совокупности с ранее опубликованными результатами изотопно-геохимического исследования пород. **Задачи,** которые решались для её достижения: 1) минералогическая и петрогеохимическая типизация пород комплекса; 2) установление возможных источников и путей эволюции его родоначальных расплавов.

Образован дарьинский комплекс двумя типами сиенитов: 1) резко преобладающими фельдшпатоидными ультрабазитами, базитами, мезитами и салитами, среди которых несколько обособляются фоидовые щелочные габброиды (мезо- и меланократовые шонкиниты и тералиты), и 2) значимо подчинёнными по объёмам, щелочными (лаурвикиты, фоид-содержащие пуласкиты и щелочные габброиды). Фельдшпатоидные породы подразделяются на фоид-пироксеновые разности (фоидовые ультрабазиты и базиты) и фоид-полевошпатовые (фоидовые мезиты с переходами к щёлочным салитам), с варьирующими количествами, помимо преобладающего нефелина, ряда других фельдшпатоидов: псевдолейцита, кальсилита, первично-магматических канкринита и анальцима, и вторичных минералов по фоидам. В пределах Лево-Юнского, Дарьинского и Кондёрского массивов распространены также жильные образования: эгиринитты, альбититы и олигоклазиты; здесь же встречаются щелочные, фоид-содержащие и фоидовые пегматиты. Характерной особенностью дарьинского комплекса является широкое распространение в минеральном составе пород меланита — титанистого андрадита.

Обсуждение результатов. Новая петрогеохимическая информация по дарьинскому комплексу использована для получения сведений о генезисе первичных магм, в том числе, об их вероятных источниках. Сведениями по величинам отношений высокозарядных микроэлементов подтверждена показанная ранее [3] изотопией стронция и неодима возможность образования первичных расплавов раннемеловых щелочных базитов из источника, близкого примитивной мантии (PM) или «среднему составу Земли» (BSE). Отношения элементов с высокой напряженностью поля указывают также на значительный вклад континентальной коры и/или субконтинентальной литосферы в образование всех породных ассоциаций дарьинского комплекса. По изотопным и петрохимическим данным установлен обогащённый характер мантийного источника (перидотита).

Моделирование по РЗЭ показало, что материнские расплавы щелочных ультрабазитов и базитов дарьинского комплекса образовались в результате частичного плавления карбонатизированного гранат-содержащего перидотитового источника. Систематика микроэлементов и изотопов согласуется с происхождением ультрабазитовых и базитовых щелочных расплавов в результате декомпрессионного плавления обогащенного источника в астеносферной мантии. Контаминантом, значимо искажающим картину распределения микрокомпонентов в дарьинских магматитах, представляется высокостронциевый и высокобариевый интрателлурический мантийный флюид, привносящий в расплав ряд несовместимых элементов.

Исходя из сведений по распределению микроэлементов и их отношений в магматитах дарьинского комплекса, предложена гипотеза двуэтапности его становления: 1) образование ультрабазитовых и базитовых расплавов (в дальнейшем фракционно-дифференцированных) за счёт разной, в целом невысокой, степени парциального плавления глубинного, неоднородно [3] обогащенного мантийного источника; 2) формирование промежуточных и конечных членов «тефрит-лейцитит» — щёлочносалической ассоциации путём усвоения, в разных пропорциях, корового материала базитовыми магмами. Обоснована возможность принятия петрогенетической модели Н.Л. Добрецова [1] в качестве рабочей для определения условий образования позднемезозойских щёлочно-ультраосновных и щёлочно-базитовых магм под территорией Алданского щита.

Установлено, что некоторые из «камафугитов», судя по петрографическим наблюдениям и особенностям петрогеохимии, являются результатом глубокой степени фенитизации пироксенитов кондёрского мезо-неопротерозойского пироксенит-дунитового комплекса Алданского щита (массивы Кондёр, Дарья, Лево-Юнский ККЮМП) под воздействием глубинного мантийного флюида.

Выводы. Согласно результатам изотопных и петрогеохимических исследований магматитов дарьинского комплекса, исходные расплавы щелочных ультрабазитов и базитов являлись продуктами глубокого мантийного уровня. Образовались они, предположительно, при специфическом флюидном режиме (с непременным участием H_2O и CO_2) из мантийного источника типа BSE (PM), метасоматизированного в разной степени, с приближением к составу EM-I. В эволюции каждой из первичных магм участвовали процессы фракционной кристаллизации и коровой контаминации, что подтверждается изотопными и петрогеохимическими признаками влияния на состав изученного комплекса источников как мантийного (преобладают в ультрабазитах и базитах), так и корового (превалируют в щёлочномезитовых и щёлочносалических образованиях) происхождения. Формирование щёлочных мезитов и салитов увязывается с разномасштабным избирательным усвоением корового материала высокотемпературными флюидизированными базитовыми мантийными магмами в процессе их подъема к поверхности, возможно, при

участии процесса флюидного синтексиса базитовых расплавов и «вторичных» коровых кислых магм. Геологические сведения и данные по вещественному составу [2, 4; эта статья] дарьинских «святоноситов» (меланитовых сиенитов) указывают на значимую роль в их становлении процессов гибридизации расплавов карбонатным веществом «рамы» очагов.

Заключение. В глобальном масштабе породы дарьинского комплекса и его аналогов на территории АЩ представлены группой геологически родственных магматических серий, являющихся дериватами близких по условиям образования магм, но различающихся по степени насыщенности кремнезёмом, уровню и типу щёлочности: преобладающими по объёмам «камафугитовой» и «тефрит-лейцитит» — щёлочносалической и, ограниченно развитой, «сублампроитовой» (близкие к лампроитам разновидности фоидовых сиенитов «тефрит-лейцитит» — щёлочносалической ассоциации). Значимый результат данной работы — выявление в числе магм, родоначальных для дарьинского комплекса, производных нескольких видов источников.

Полученные результаты имеют важное значение для понимания процессов взаимодействия коры и мантии в ККЮМП. Для этой, как и прочих позднемезозойских магматических провинций АЩ, характерен разнообразный по кремнекислотности, щелочности, геохимической и рудно-металлогенической специализации магматизм, проявившийся в обстановке трансформной континентальной окраины, обусловившей тесное взаимодействие мантийных потоков магматитов и флюидов с коровым материалом. Масштабное присутствие известковистых пород в составе фундамента предопределило широкое развитие здесь в меловое время меланитовых сиенитов («святоноситов»). Взаимоотношения последовательно развитых серий пород в массивах со «святоноситами» могут использоваться в качестве индикаторных для выявления механизма и условий взаимодействия корового и мантийного материалов.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ДВГИ ДВО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Добрецов Н.Л.** Введение в глобальную петрологию. Новосибирск: Наука, 1980. 200 с.

2. **Полин В.Ф., Сахно В.Г., Соляник А.Н.** Петрогенезис дарьинского щелочного комплекса Кеткапско-Юнской магматической провинции Алдана // Докл. АН. 2004. Т. 398. № 3. С. 385-389.

3. **Полин В.Ф., Ханчук А.И., Мицук В.В., Сандимиров И.В., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А.** Источники мезозойского полиформационного магматизма Кеткапско-Юнской магматической провинции Алдана: изотопные данные // Докл. АН. 2013. Т. 448. № 2. С. 181-187.

4. **Полин В.Ф., Остапенко Д.С.** Щёлочно-салический курунгский комплекс Кеткапско-Юнской магматической провинции (Алданский щит, Россия): петрогенезис и геодинамические условия формирования // Геология и геофизика. 2023. Т. 65. № 3. С. 325-352. https://doi.org/10.15372/gig2023183

ИЗОТОПЫ КИСЛОРОДА И ПРОИСХОЖДЕНИЕ ЩЕЛОЧНЫХ МАГМАТОГЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ КЕТКАПСКО-ЮНСКОЙ МАГМАТИЧЕСКОЙ ПРОВИНЦИИ (ККЮМП) АЛДАНСКОГО ЩИТА

В.Ф. Полин, В.В. Яковенко

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: vfpolin@mail.ru

Аннотация: Результаты изучения изотопии кислорода в щелочных комплексах ККЮМП позволяют предположить мантийный источник для щёлочно-ультрабазитовых и щелочно-базитовых пород; щелочно-салические образования всех комплексов в своем изотопном составе несут признаки вероятного смешения коровой и мантийной компонент.

OXYGEN ISOTOPES AND THE ORIGIN OF ALKALINE MAGMATOGENIC COMPLEXES OF THE KETKAP-YUNA MAGMATIC PROVINCE (KKYUMP) OF THE ALDAN SHIELD

V.F. Polin, V.V. Yakovenko

Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: vfpolin@mail.ru

Abstract: The results of the study of oxygen isotopy in KKYuMP alkaline complexes suggest a mantle source for alkaline-ultrabasic and alkaline-basic rocks; the alkaline-salic rocks of all complexes in their isotopic composition show signs of probable mixing of the crustal and mantle components.

Изотопный состав кислорода издавна служит индикатором специфики условий минералообразования и становления горных пород в целом. Обусловлено это его практической неизменностью после образования породы, если только впоследствии она не была полностью трансформирована в результате расплавления, химического замещения или других подобных реакций, изменяющих первичную структуру и способствующих изотопному обмену с внешней средой.

С этих позиций нами изучены изотопные характеристики проб представительных пород трёх щелочных магматогенных комплексов Кеткапско-Юнской магматической провинции (ККЮМП) – одной из зон тектономагматической активизации Алданского щита: раннемеловых тефрит-фонолит-щелочнотрахитового с шонкинитами и эссекситами бокурского, фоидолит–фоидо- и щёлочносиенитового дарьинского и позднемелового щёлочно-салического курунгского. Пробы для исследований отобраны в пределах Кондёрского, Улаханского и Усмуно-Дарьинского массивов.

Их геологическая, петрографическая, петролого-геохимическая и геохронологическая характеристики приведены в ранее (2001-2025 гг.) опубликованных работах В.Ф. Полина с соавторами и Материалах геологосъёмочных и поисковых работ (МГСР). Вместе с тем, остался нерешённым ряд вопросов геологии и петрологии полиформационного мезозойского магматизма ККЮМП и всей области ТМА АЩ. Новые материалы по изотопии кислорода, приводимые в данной работе, позволяют более обоснованно подойти к решению вопроса об источниках разноосновных щелочных пород ККЮМП.

Результаты измерений изотопных отношений показывают относительно большие диапазоны значений $\delta^{18}O_{VSMOW}$ для представителей разных фаз каждого из изученных комплексов (рис. 1). Особенно это характерно для бокурского комплекса, где устанавливаются наибольшие их вариации. Наименьший разброс значений $\delta^{18}O$ присущ щелочным плутонитам дарьинского и курунгского комплексов, и ортометаморфитам комплекса основания Алданского щита. Нерезкая прямая зависимость между величиной кремнекислотности и содержанием в породах ^{18}O наблюдается в батомгских метабазитах-метасалитах, бокурских щелочных вулканитах и в дарьинских фоидитах — фоидовых и щелочных сиенитах. В бокурских щелочных плутонитах она выражена крайне слабо.

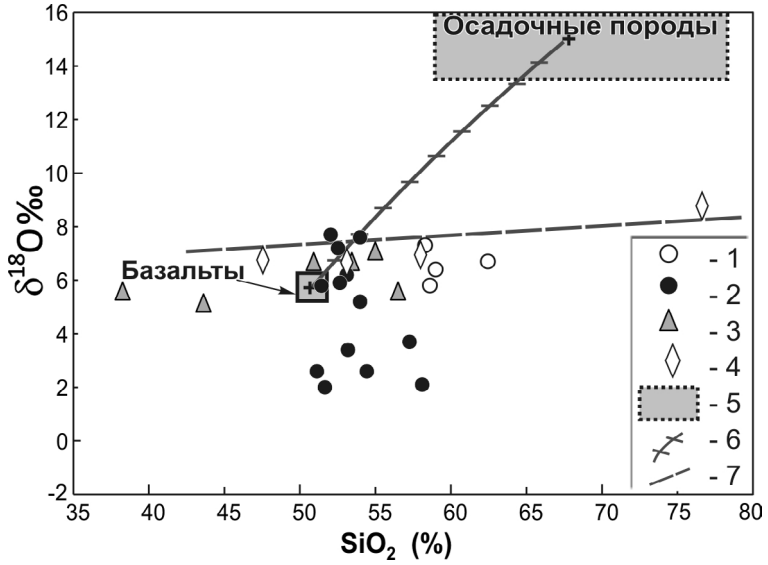


Рисунок 1. График зависимости величин $\delta^{18}O$ от содержания кремнекислоты в щелочных магматитах ККЮМП и метаморфитах комплекса её протерозойского основания.
1-4: здесь и на рис. 2 – фигуративные точки различных комплексов щелочных магматитов (1-3) и метаморфитов комплекса основания (4) магматогенной провинции: 1 – курунгского; 2 – бокурского; 3 – дарьинского и 4 – батомгского. Поле осадочных пород (5), линия пропорций смешения первичных базальтовых расплавов с осадочными образованиями (6) и разграничительная пунктирная линия между полями составов ильменитовой и магнетитовой серий плутонитов Японии (7) приведены по [5].

Figure. 1. $\delta^{18}O$ variation plotted against SiO_2 of the alkaline igneous rocks from KKYuIP and metamorphic rocks from the Proterozoic basement of the Complex.
1-4: here and in fig. 2 – figurative points of different complexes of alkaline igneous rocks (1-3) and metamorphic rocks of the Complex basement (4) of the magmatogenic province: 1 – Kurung; 2 – Bokur; 3 – Dar′ya, and 4 – Batomga. Field of sedimentary rocks (5), mixing line giving the mixing ratios of primary basaltic melts to sedimentary rocks (6) and separation dashed line of the ilmenite-series and magnetite-series of plutonic rocks of Japan (7) after [5].

Минимальные величины $\delta^{18}O$ (от +2.0 до +2.6‰) наблюдаются в бокурских шошонитах, фонотефритах, щелочных трахиандезитах, что в целом согласуется с кларковыми тенденциями, хотя имеется исключение в виде пробы субвулканического кислого щелочного трахита с низким (2.1‰) содержанием $\delta^{18}O$. В то же время, подобные величины аномально низки относительно магматических пород вообще и щелочных, в частности (рис. 1, 2), и более чем вдвое отличаются, в меньшую сторону, от средних значений для подобных типов пород (напр., [4]).

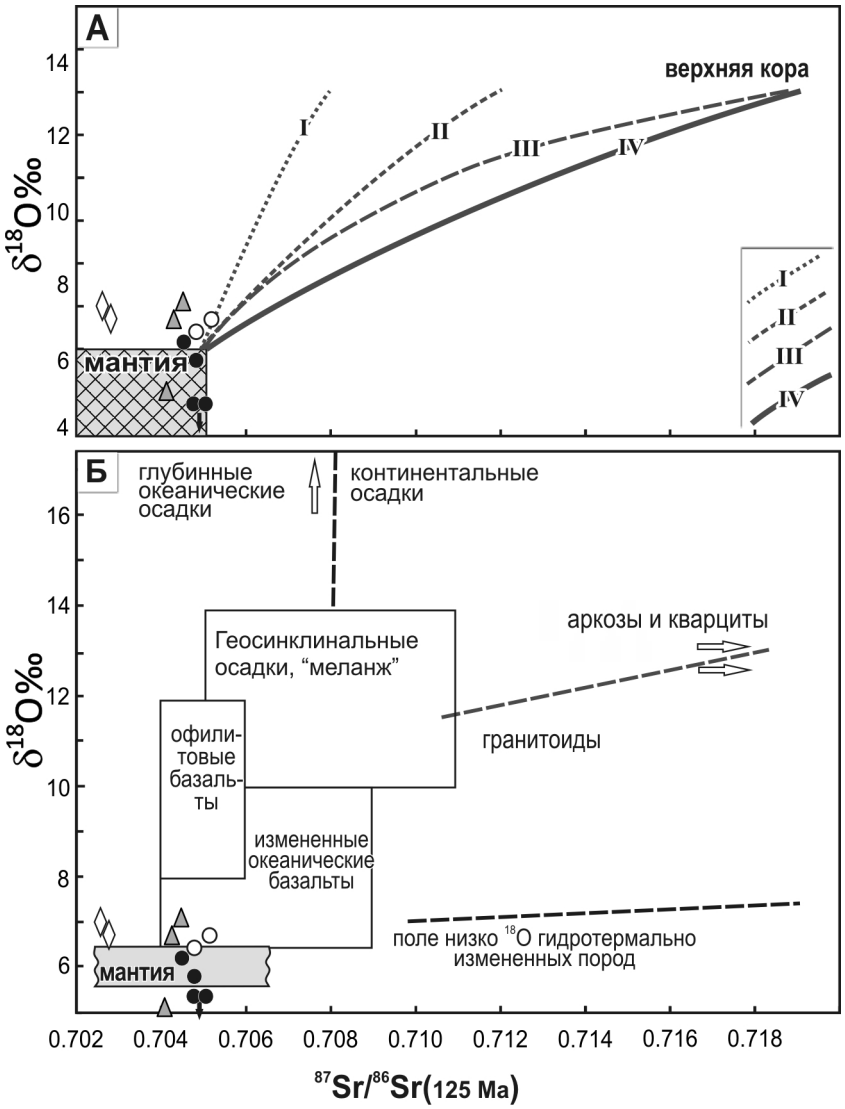


Рисунок 2. Модельные Sr-O изотопные графики смешения мантийного и корового материалов, при разных концентрациях стронция в магме и контаминате, с фигуративными точками щелочных пород ККЮМП.
А: I-IV – модели смешения вещества мантийного и корового источников (по [1]) с параметрами: $^{86}Sr/^{87}Sr(0)=0.705$, Sr=1000 ppm, $\delta^{18}O=6$ и $^{86}Sr/^{87}Sr(0)=0.719$, Sr=350 ppm, $\delta^{18}O=12$ соответственно (IV); с параметрами: $^{86}Sr/^{87}Sr(0)=0.705$, Sr=500 ppm, $\delta^{18}O=6$ и $^{86}Sr/^{87}Sr(0)=0.719$, Sr=350 ppm, $\delta^{18}O=12$ соответственно (III); а также (II) и (I) – модели смешения мантийного компонента (Sr=500 ppm) с гипотетическими коровыми резервуарами с $^{86}Sr/^{87}Sr(0)=0.712$ и 0.708 соответственно. Б: вариации изотопных составов земных пород, по [6, 7; и др.] с точками составов изученных щелочных магматитов. Обозначения фигуративных точек пород изученных комплексов – как на рисунке 1.

Figure 2. Sr-O isotope model of mixing of mantle and crustal components, with different Sr concentrations in magma and contaminant, figurative points denote alkaline rocks from KKYuIP.
A: I-IV – mixing models of sources of crustal and mantle components (after [1]) with the following parameters: $^{86}Sr/^{87}Sr(0)=0.705$, Sr=1000 ppm, $\delta^{18}O=6$ and $^{86}Sr/^{87}Sr(0)=0.719$, Sr=350 ppm, $\delta^{18}O=12$, respectively (IV); with the following parameters: $^{86}Sr/^{87}Sr(0)=0.705$, Sr=500 ppm, $\delta^{18}O=6$ and $^{86}Sr/^{87}Sr(0)=0.719$, Sr=350 ppm, $\delta^{18}O=12$, respectively (III); and also (II) and (I) – mixing models of mantle component (Sr=500 ppm) with hypothetical crustal reservoirs showing $^{86}Sr/^{87}Sr(0)=0.712$ and 0.708, respectively. B: variations of isotopic compositions of Earth rocks, after [6; 7; etc.], with points denoting compositions of the studied alkaline igneous rocks. The figurative points denoting the rocks of the studied complexes correspond to those in figure 1.

Ставшее классическим объяснение таких аномалий влиянием метеорных вод приемлемо и в нашем случае, но требует обсуждения. Противоречием

ему можно считать то, что большинство пород с низкой величиной $\delta^{18}O$ принадлежат разряду вулканитов, застывавших быстро, что затрудняло бы процесс переустановки изотопных равновесий. К тому же, породы эти содержат мало магнетита, но много щелочей, и это наводит на мысль об ответственности за низкие значения в них $\delta^{18}O$ химического состава родоначальных расплавов, обусловленного составом (в том числе, изотопным) плавящегося протолита. Однако, учитывая работу И. Фридмана и Дж. Р. О`Нейла (I. Friedman & J.R. O`Neil, 1977; цит. по: [4]), доказавшую возможность взаимодействия метеорной воды с магмой даже при температурах ликвидуса, исключать возможность снижения значений $\delta^{18}O$ в бокурских вулканитах посредством этого механизма никак нельзя. Веским подтверждением её служит высокий (свыше 64: МГСР) коэффициент эксплозивности вулканогенных толщ бокурского комплекса, обусловленный значительным содержанием воды в магме близповерхностных очагов.

Учитывая приведённые соображения и результаты изотопных определений, мы остановились на предположении, что в первоисточниках магматических расплавов бокурского, дарьинского и курунгского комплексов величина $\delta^{18}O$ составляла 5.0-6.2‰, равняясь показателям, характерным для мантии (напр., [1, 5-7]). Это подтверждается данными о «мантийных» значениях как инициальных изотопных отношений стронция и неодима, так и величин Rb/Sr в щелочных комплексах ККЮМП [2]. Объяснение повышенных (6.4–7.2‰) значений $\delta^{18}O$ в щелочных комплексах провинции (рис. 1, 2) возможно двоякое. Наиболее реальным представляется обогащение пород изотопом ^{18}O на этапах становления изученных массивов посредством изотопного обмена расплавов с вмещающими их высокоизвестковистыми осадочными породами: доломитами, доломитистыми песчаниками и алевролитами. Альтернативный вариант — обогащенный состав плавящегося протолита. Очень низкие значения $\delta^{18}O$ в вулканитах и некоторых субвулканитах свидетельствуют о взаимодействии магмы с метеорными водами в близповерхностных магматических очагах. Ассимиляция метаосадочного материала мантийными щелочными магмами если и имела место, то была невелика (рис. 1). Для происхождения щелочно-салических расплавов не исключена возможность ассимиляции мантийными магмами нижнекорового вещества ([3; и др.] (рис. 2А в этой статье).

Положение фигуративных точек всех изученных щелочных вулканитов и плутонитов в полях магматитов ильменитовой серии Японии (рис. 1) указывает на умеренный и низкий редокс-потенциал в родоначальных для пород ККЮМП расплавах, подтверждая выводы о восстановительных условиях кристаллизации щелочных магматитов, согласно данным минералогии и термобарогеохимии (публикации 2014 и 2017 гг. В.Ф. Полина с коллегами).

Исследование изотопного состава кислорода в щелочных вулканитах и плутонитах ККЮМП выявило значимые по размаху колебания величин $\delta^{18}O$, обусловленные как различиями в генезисе исходных магм, так и вероятным

изотопным обменом в магматических и постмагматических условиях. Низкие значения величин $^{87}Sr/^{86}Sr$ отношения в исследованных породах указывают на происхождение их родоначальных расплавов за счёт протолита мантийного происхождения (для гипербазитов и базитов), либо смешанного, мантийно-корового, источника (для щелочных мезитов и салитов) (напр., [3]). Аномально низкие значения $\delta^{18}O$ в бокурских вулканитах и некоторых субвулканитах свидетельствует о повсеместном взаимодействии магмы с метеорными водами в близповерхностных магматических очагах.

Исследования выполнены в рамках Государственного задания ДВГИ ДВО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Дриль С.И., Сасим С.А., Носкова Ю.В.** Sr-O изотопные системы и источники вещества коллизионных гранитоидов Монголо-Охотского орогенного пояса на примере ундинского комплекса Восточного Забайкалья // Крупные изверженные провинции, мантийные плюмы и металлогения в истории Земли. Материалы конференции. Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б.Сочавы СО РАН, 2015. С. 42-44.

2. **Ельянов А.А., Андреев Г.В.** Магматизм и металлогения платформенных областей многоэтапной активизации. Новосибирск: Наука, 1991. – 168 с.

3. **Полин В.Ф., Ханчук А.И., Мицук В.В., Сандимиров И.В., Игнатьев А.В., Веливецкая Т.А.** Источники мезозойского полиформационного магматизма Кеткапско-Юнской магматической провинции Алдана: изотопные данные // Докл. АН. 2013. Т. 448. № 2. С. 181-187.

4. **Фор Г.** Основы изотопной геологии. М.: Мир, 1989. 590 с.

5. **Ishihara S., Matsuhisa Y.** Oxygen Isotopic Constraints of the Genesis of the Miocene Outer Zone Granitoids in Japan // Lithos. 1999. V. 46. P. 523-534.

6. **Magaritz M., Whitford D.J., James D.E.** Oxygen isotopes and origin of high 87Sr/86Sr andesites // Earth. Planet. Sci. Lett. 1978. V. 40. N 314. P. 220-230.

7. **Taylor H.P.** The effect of Assimilation of Rocks by Magmas: 18O/16O and 87Sr/86Sr Systematics in Igneous Rocks // Earth. Planet. Sci. Lett. 1980. V. 47. N 2. P. 243-254.

РЕЗУЛЬТАТЫ U-PB ID TIMS ГЕОХРОНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТИТАНИТА И РУТИЛА ИЗ РУБИНСОДЕРЖАЩИХ ПОРОД МЕСТОРОЖДЕНИЯ ЛУК ЙЕН (СЕВЕРНЫЙ ВЬЕТНАМ)

Е.Б. Сальникова[1], Ю.В. Плоткина[1], К.А. Кукса[2,3], А.Б. Котов[1], М.В. Стифеева[1], С.В. Петров[2], Ю.М. Бронзова[2], П.Б. Соколов[3]

[1]Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, г. Санкт-Петербург

[2]Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, e-mail: katerina.kuksa@spbu.ru;

[3]ООО СОКОЛОВ, г. Санкт-Петербург

Аннотация. Месторождение Лук Йен в северном Вьетнаме является важным источником рубинов и разноокрашенной благородной шпинели ювелирного качества. U-Pb ID TIMS методом нами был определен возраст титанитов и рутила из двух рубинсодержащих карбонатно-силикатных пород месторождения – силикатных мраморов Тан Линх и кальцифиров Фан Тань. Тесная пространственная и генетическая связь между выделениями рубина и титанита в этих породах позволяет рассматривать возраст последнего в качестве модельного возраста рубиновой минерализации. Для пород Тан Линх он составил ~37 млн лет и близко совпал с результатами предшествующих исследований. В то же время для кальцифиров Фан Тань возраст составляет 244 млн лет, что указывает на существование здесь более раннего этапа рубинообразования.

Рутил из пород Тан Линх характеризуется незначительным содержанием урана (2.2-2.9 мкг/г) и низкорадиогенным изотопным составом свинца, что не позволяет достоверно оценить его возраст. Возраст рутила из кальцифиров Фан Тань составляет 25 млн лет, что отражает, по всей вероятности, процесс охлаждения пород на нисходящей ветви метаморфического процесса.

U-PB ID TIMS DATING OF TITANITE AND RUTILE FROM RUBY-BEARING CALC-SILICATE ROCKS OF THE LUC YEN DEPOSIT (NORTHERN VIETNAM)

E.B. Salnikova[1], Yu.V. Plotkina[1], K.A. Kuksa[2,3], A.B. Kotov[1], M.V. Stifeeva[1], S.V. Petrov[2], Yu.M. Bronzova[2], P.B. Sokolov[3]

[1]Institute of Precambrian geology and geochronology RAS, St. Petersburg

[2]St. Petersburg State University, St. Petersburg,
e-mail: katerina.kuksa@spbu.ru

[3]SOKOLOV Ltd., St. Petersburg

Abstract. The Luc Yen deposit from northern Vietnam represents an important source of high-quality ruby and multicolored gem spinel. Using the U-Pb ID-TIMS method, we have determined ages of titanite and rutile in ruby-bearing calc-silicate rocks from Luc Yen gem deposit – Tan Linh quarry and Phan Thanh occurrence. The close spatial and genetic relationship between ruby and titanite crystals in these rocks allows the age of the latter to be considered as a model age for ruby mineralization. Titanite from calc-silicate marbles of the Tan Linh quarry yields the age ~37 million years, closely matching previous results. However, titanite from Phan Thanh calciphyres crystallized approximately 244 million years ago, indicating the existence of an earlier stage of ruby mineralization within this area.

Rutile from calc-silicate marbles of the Tan Linh quarry has low uranium content (2.2-2.9 μg/g) and a low radiogenic lead isotopic composition, making reliable age determination difficult. The age of rutile from Phan Thanh calciphyres is approximately 25 million years, most likely reflecting the cooling of calc-silicate rocks during the retrograde stage of metamorphism.

Месторождение рубина и благородной шпинели Лук Йен расположено в провинции Йен Бай северного Вьетнама и приурочено к области распространения кальцитовых и кальцит-доломитовых мраморов, переслаивающихся с силлиманит-биотит-гранатовыми сланцами в пределах структурной зоны Ло Гам [2]. Оно широко известно в мире благодаря высококачественным рубинам и разноокрашенной благородной шпинели, которые поступают оттуда на мировой рынок с конца 70-х годов прошлого века [4].

Согласно литературным данным, рубин в пределах месторождения встречается как в виде изолированных кристаллов в мраморах, так и в виде линз и прожилков совместно с флогопитом, дравитом, маргаритом, пиритом, графитом и рутилом [1, 2, 4, 5]. Результаты Ar-Ar исследований сингенетичных рубину флогопита и мусковита позволили установить олигоценовый (30.8 – 33.8 млн лет) возраст рубиновой минерализации [2, 3]. Близкие значения 38 млн лет (U-Pb SHRIMP) были получены и для двух включений цирконов в единичном зерне рубина [2]. Однако определенные ограничения Ar-Ar метода и небольшая представительность результатов U-Pb исследований циркона потребовали проведения исследований других минералов-геохронометров (титанита и рутила).

Для U-Pb ID TIMS геохронологических исследований были отобраны образцы карбонатно-силикатных пород из двух проявлений рубиновой минерализации: мраморного карьера Тан Линх и проявления благородной

шпинели и рубина Фан Тань. В карьере Тан Линх рубин встречается в виде единичных зерен неправильной формы размером порядка 0.1-0.5 мм и их скоплений среди силикатных минералов (флогопита, фуксита, анортита и маргарита). Данные минералы образуют серии параллельно ориентированных прослоев розовато-зеленого цвета мощностью от <0.5 см до нескольких сантиметров в мелкокристаллических кальцитовых мраморах (рис. 1). Акцессорный титанит присутствует в виде единичных клиновидных зерен размером 0.1-0.2 мм, выделения которого приурочены к скоплениям зерен корунда. Также в основной массе породы присутствуют многочисленные зерна рутила бурого цвета неправильной, амебообразной формы, размер которых варьирует от 0.1 до 1 мм.

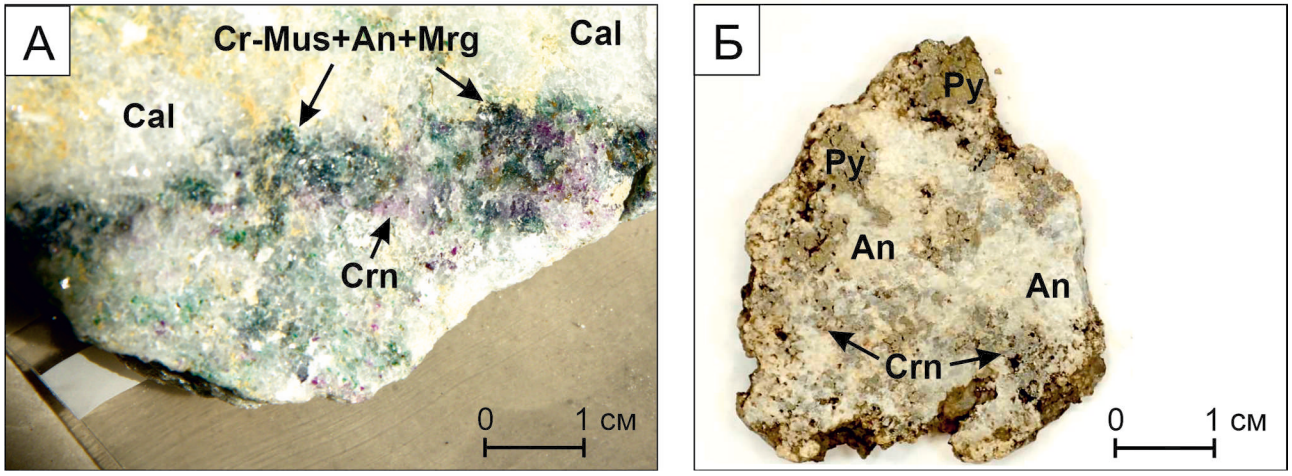


Рисунок 1. Рубинсодержащие карбонатно-силикатные породы месторождения Лук Йен.
А – прожилок розовато-зеленого цвета мощностью ~2.5 см, сложенный рубином, фукситом, анортитом и маргаритом в белом кальцитовом мраморе карьера Тан Линх (обр. V-19-10); Б – пирит-плагиоклазовый кальцифир с единичными зернами рубина из проявления Фан Тань (обр. V-44-08). Crn - рубин, Py – пирит, An – анортит, Cal – кальцит, Cr-Mus – фуксит, Mrg - маргарит.

Figure 1. Ruby-bearing carbonate-silicate rocks from the Luc Yen deposit.
A – pinkish-green veinlet (~2.5 cm thick) composed of ruby, chromian muscovite, anorthite, and margarite in white calcitic marble from the Tan Linh quarry (Spl. V-19-10); B – Calciphyre from Phan Thanh occurrence composed of pyrite and plagioclase with minor ruby grains (Spl. V-44-08). Abbreviations: Crn – ruby, Py – pyrite, An – anorthite, Cal – calcite, Cr-Mus - fuchsite, Mrg - margarite.

В кальцифирах проявления Фан Тань рубин встречается в карманах и гнездах в виде сростков многочисленных зерен размером порядка 0.5 мм (в скоплениях до 1 см), замещаемых по краям маргаритом. Матрица таких гнезд сложена практически полностью анортитом и пиритом, изредка встречаются реликты зерен кальцита неправильной формы. Акцессорные минералы представлены цирконом, титанитом и рутилом. Титанит встречается в виде слегка утолщенных трещиноватых зерен и прозрачных кристаллов размером от 0.1 до 1 мм. Обычно выделения титанита приурочены к границам зерен корунда и анортита, разбиты трещинами и замещаются рутилом, кальцитом и хрупкими слюдами. Зерна рутила наблюдаются в виде ксеноморфных выделений размером 0.3-0.5 мм, распространенных в основной массе породы среди чешуек маргарита.

Значение конкордантного U-Pb возраста титанита из силикатных мраморов карьера Тан Линх составляет 37±0.2 млн лет (СКВО=2.3). Рутил из силикатных мраморов характеризуется незначительным содержанием урана (2.2-2.9 мкг/г) и малорадиогенным изотопным составом свинца, что не позволяет достоверно оценить его возраст. Титанит из кальцифиров Фан Тань характеризуется возрастной дискордантностью, а три точки его состава аппроксимируются дискордией, верхнее пересечение которой с конкордией соответствует возрасту 280±78 млн лет (нижнее пересечение составляет 52±76 млн лет, СКВО=0.107). Средняя величина $^{207}Pb/^{206}Pb$ возраста титанита составляет 244±10 млн лет (СКВО=0.67) и может быть использована в качестве оценки возраста его кристаллизации. Рутил из кальцифиров, как правило, характеризуется низкорадиогенным изотопным составом свинца, что затрудняет интерпретацию полученных U-Pb данных. В качестве предварительной оценки его возраста может быть использована величина его конкордантного возраста 25±0.1 млн лет.

Пространственная приуроченность титанита к выделениям рубина позволяет использовать полученные значения в качестве возраста рубиновой минерализации. Значение возраста титанита 37 млн лет из силикатных мраморов карьера Тан Линх близко совпадает с оценками, полученными ранее другими исследователями [1–3], и традиционно связывается с высокоградиентным метаморфизмом вследствие столкновения Индийской и Евразийской плит и формирования Гималайского складчатого пояса. В то же время более древнее значение возраста 244 млн лет, полученное для кальцифиров Фан Тань, указывает на существование здесь более раннего этапа рубинообразования. Несмотря на сходство минерального состава карбонатно-силикатных пород карьера Тан Линх и проявления Фан Тань, полученные изотопные данные свидетельствуют о многоэтапности рубинообразования в пределах месторождения Лук Йен.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Garnier V., Giuliani G., Maluski H., Ohnenstetter D., Phan Trong T., Hoang Quang V., Long P.V., Schwarz D.** Ar–Ar ages in phlogopites from marble-hosted ruby deposits in northern Vietnam: evidence for Cenozoic ruby formation // Chemical Geology. 2002. V. 188. P. 33–49.

2. **Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani G., Maluski H., Deloule E., Phan Trong T., Pham Van L., Hoàng Quang V.** Age and significance of ruby-bearing marble from the Red River Shear Zone, northern Vietnam // The Canadian Mineralogist. 2005. V. 43. P. 1315–1329.

3. **Leloup P.H., Arnaud N., Lacassin R., Kienast J.R., Harrison T.M., Phan Trong T., Replumaz A., Tapponnier P.** New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan-Red River shear zone, SE Asia // Journal of Geophysical Research. 2001. V. 106. Iss. B4. P. 6683–6732.

4. **Long P.V., Giuliani G., Garnier V., Ohnenstetter D.** Gemstones in Vietnam: a review // Australian Gemmologist. 2004. V. 22. N 4. P. 162–168.

5. **Long P.V., Pardieu V., Giuliani G.** Update on gemstone mining in Luc Yen, Vietnam // Gems and Gemology. 2013. V. 49. N 4. P. 15.

ПЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИНДИКАТОРЫ ЭВОЛЮЦИИ МЕТАМОРФИЗМА В ТАТАРСКО-ИШИМБИНСКОЙ СДВИГОВОЙ ЗОНЕ (ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ)

К.К. Сохорев, П.А. Тишин

Томский государственный университет, г. Томск,
e-mail: sohorevkirill1998@mail.ru, tishin_pa@mail.ru

Аннотация. Одними из актуальных проблем современной метаморфической геологии остаются проблема соотношения деформационных и вещественных преобразований в земной коре и возникновение высокобарических фаз в ассоциации с фацией более низкой ступени. По результатам исследования получены данные о химическом составе породообразующих минералов, термодинамических условиях и возрастных рубежах образования кристаллических сланцев месторождения Благодатное, приуроченного к Татарско-Ишимбинской сдвиговой зоне. Данные позволяют говорить о неоднородности условий образования при доминирующей роли ориентированного тектонического давления над литостатическим давлением в зоне пластического сдвига.

PETROLOGICAL INDICATORS OF METAMORPHIC EVOLUTION IN THE TATAR-ISHIMBA SHEAR ZONE (YENISEI RIDGE)

K.K. Sokhorev, P.A. Tishin

Tomsk State University, Tomsk,
e-mail: sohorevkirill1998@mail.ru, tishin_pa@mail.ru

Abstract. One of the critical problems of modern metamorphic geology remains the problem of the relationship between deformation and material transformations in the earth's crust and the occurrence of high-pressure phases in association with a facies of a lower stage. Based on the results of the study, data were obtained on the chemical composition of rock-forming minerals, thermodynamic conditions and age boundaries of the formation of crystalline schists of the Blagovatnoye deposit, confined to the Tatar-Ishimba shear zone. The data allow us to speak about the heterogeneity of the formation conditions with the dominant role of oriented tectonic pressure over lithostatic pressure in the plastic shear zone.

Одной из актуальных проблем современной метаморфической геологии остается проблема временного и пространственного соотношения деформационных и вещественных преобразований в земной коре и их генетической взаимосвязи. Не менее дискуссионна и проблема существенных вариаций давления и условий возникновения более высокобарических

фаз среди минеральных ассоциаций с “нормальным” фоновым уровнем метаморфических преобразований [7]. Поэтому оценка времени активности зон сдвига имеет решающее значение для понимания поведения деформации земной коры в различных тектонических обстановках [6].

История большинства метаморфических пород включает в себя прохождение через несколько этапов изменения термодинамических условий. Эти преобразования могут сохраниться в виде минеральных реликтов, микроструктур и химической зональности в зернах, свидетельствующих о предыдущих событиях. Временной интервал между разными стадиями может быть весьма существенным [3].

Нами были изучены породы золоторудного месторождения Благодатное, приуроченного к Татарскому глубинному разлому. Он протягивается вдоль всего Заангарья от устья р. Подкаменная Тунгуска до р. Ангары, смещает Ангарский разлом и разделяет Восточно-Ангарский и Центрально-Ангарский террейны. Вместе с Ишимбинским разломом он формирует Татарско-Ишимбинскую шовную зону [1]. Заложение зоны произошло в результате коллизии Центрально-Ангарского террейна с Сибирским кратоном [3].

В строении месторождения Благодатное принимают участие кристаллические сланцы кординской свиты, характеризуемые сланцеватой и пятнистой текстурами. Гранат встречается в виде единичных изометричных, либо субизометричных шестиугольных, либо полигональных порфиробластов. Наиболее ранние — центральные зоны обогащены спессартиновой составляющей (Sps от 10 до 19%), с характерной структурой «снежного кома». Вторая, промежуточная, зона представлена не содержащим включений гранатом альмандинового состава (рис. 1а). Первая генерация биотита представлена зернами субизометричной или линзовидной формы типа mica fish (0.3-0.5 мм). Вторая генерация сложена мелкими чешуйками (0.04-0.2 мм), расположенными как по направлению сланцеватости, так и под углом к ней. На диаграмме Ti — Al(VI)-Fe+Mg+Mn (рис. 1б) виден переход от биотитовой зоны через ставролитовую к силлиманитовой [2]. На диаграмме Xfe – Al(IV) (рис. 1в) наблюдается изменение железистости биотита от 0.85% до 0.50%, что говорит об изменении температурного режима. Первая генерация мусковита образует вытянутые, переплетенные между собой зерна матрикса. Вторая генерация представлена чешуйчатыми и таблитчатыми индивидами, являясь составной частью гломеробластов. Об увеличении температуры и давления свидетельствуют как снижение значений Aal от 25 до 17, так и увеличение Asi с 12 до 18 (рис. 1г). Ставролит наблюдается только в гломеробластах в ассоциации с мусковитом второй генерации и кварцем. Таким образом, на первой стадии эволюции пород произошло образование граната спессартинового состава и крупнозернистого железистого биотита (Grt_1+Bt_1). Второй этап характеризуется образованием второй (альмандиновой) зоны граната, мелкозернистого магнезиального биотита и мусковита

(Grt_2+Ms_1+Bt_2+Pl+Qz_1). Данный парагенезис слагает основной объем породы. Для третьей стадии характерен парагенезис крупнозернистого мусковита, ставролита и кварца (Ms_2+St+Qz_2). Данный парагенезис наблюдается в гломеробластах.

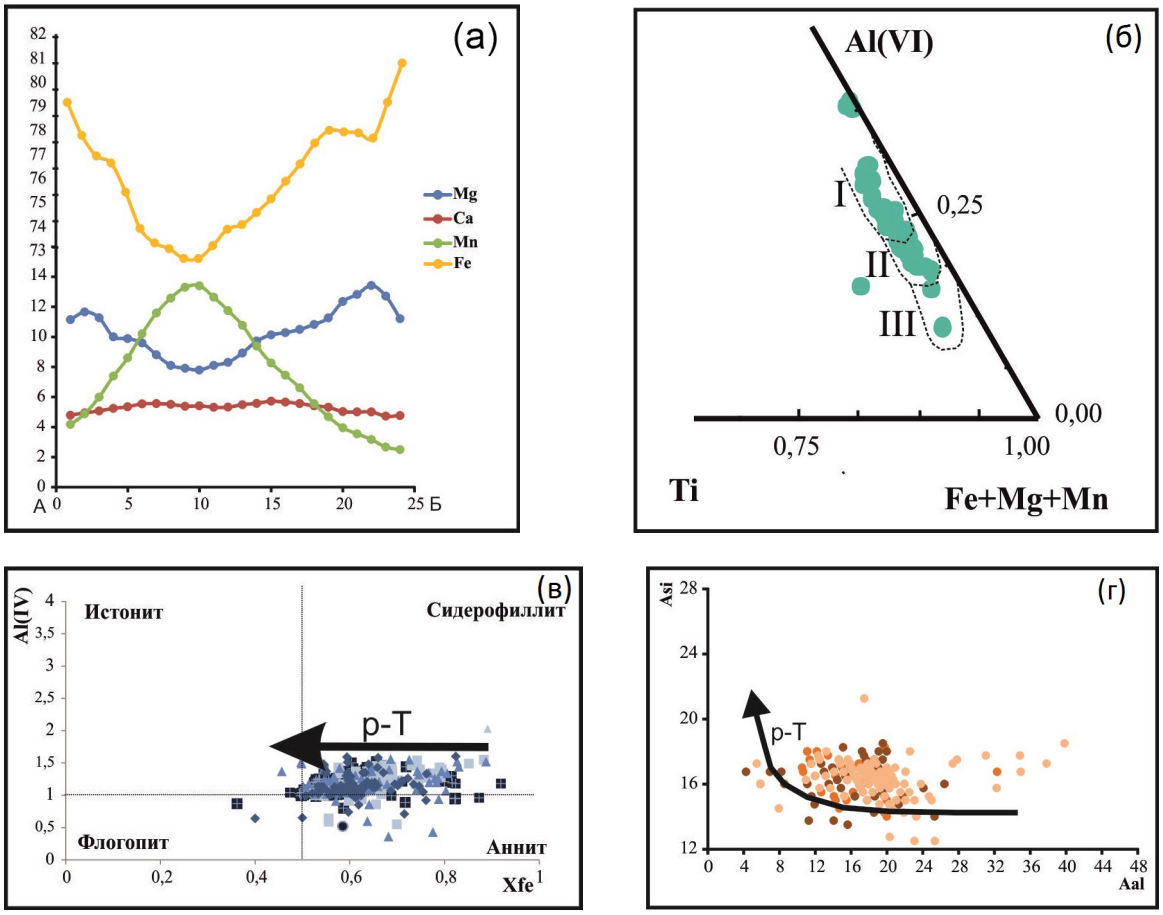


Рисунок 1. – Диаграммы химического состава граната и слюд.
(а) – концентрационные профили граната, (б) – диаграмма Ti – Al(VI)-Fe+Mg+Mn для биотита: I - зона биотита, II – зона ставролита, III – зона силлиманита, (в) – диаграмма Xfe – Al(IV) для биотита, (г) – диаграмма Aal-Asi для мусковита.

Figure 1. – Diagrams of chemical composition of garnet and micas.
(a) – garnet concentration profiles, (b) – diagram Ti – Al(VI)-Fe+Mg+Mn for biotite: I – biotite zone, II – stavrolite zone, III – sillimanite zone, (c) – diagram Xfe – Al(IV) for biotite, (d) – diagram Aal-Asi for muscovite.

Термодинамические параметры формирования метапелитов определялись на основе составов породообразующих минералов с использованием трех известных калибровок для Grt-Bt геотермометров и калибровок для Grt-Bt-Ms-Als и Grt-Pl-Bt-Mu-Qtz геобарометра. Средние оценки p-T условий варьируют в следующих интервалах: для первого этапа — 500-530 °C/ 3.8-4.0 кбар; для второго этапа — 570-610 °C/5.5-5.7 кбар. Исходя из представления о линейном росте литостатического давления (1 кбар/3.5 км), глубина образования пород на первом этапе составляет 13-14 км, геотермический градиент при этом равен 36-41 °C/км. Второй этап характеризуется повышением степени метаморфизма при снижении градиента до 12-13 С/км.

Возрастные рубежи, определенные по Ar-Ar датированию слюд составляют от 810.9 до 791.6 Ма, при этом значения возрастов мусковита и биотита разных генераций схожи, что говорит о двух возможных вариантах эволюции метаморфизма. В первом варианте имеет место быстрый надвиг блоков при коллизии со скоростью более 400 м/10^6 лет с последующей быстрой эксгумацией пород. В рассматриваемом случае скорость погружения составляет около 600 м/10^6 лет. Кроме того, в указанных возрастных рубежах имело место проявление постгренвильской коллизии. Однако это не объясняет наличие третьего парагенезиса (Ms_2+St+Qz_2), образованного на регрессивной стадии. Данный парагенезис свидетельствует о меньших глубинах, необходимых для второго этапа эволюции пород. В связи с этим падение геотермического градиента связывается с альтернативным механизмом, предусматривающим значительные превышения давления, а не его постепенное изменение. Локальные тектонические напряжения, имеющие место в сдвиговых зонах, могут способствовать генерации сверхдавлений [7]. Следовательно, вариации давления могли быть вызваны интенсивной сдвиговой деформацией в неоднородной среде на втором этапе метаморфической эволюции пород.

Как итог, смена минеральных парагенезисов и химического состава свидетельствуют об изменении термодинамических условий. Определения абсолютного возраста дают основание говорить о доминирующей роли ориентированного тектонического давления над литостатическим давлением в зоне пластического сдвига (Татарско-Ишимбинской), что сходится с данными по Приенисейской региональной сдвиговой зоне (ПРСЗ) [4]. Таким образом, на Енисейском кряже в постгренвильское время имела место активизация не только коллизионных, но и сдвиговых процессов, связанных с глубинными разломами.

Литература

1. **Верниковский В.А., Верниковская А.Е., Сальникова Е.Б. и др.** Позднерифейский щелочной магматизм западного обрамления Сибирского кратона: результат континентального рифтогенеза или аккреционных событий? // Докл. АН. 2008. Т. 419. С. 90-94.

2. **Кориковский С. П.** Фации метаморфизма метапелитов. М.: Наука, 1979. 269 с.

3. **Лиханов, И. И.** Метаморфические индикаторы геодинамических обстановок коллизии, растяжения и сдвиговых зон земной коры // Петрология. 2020. Т. 28. № 1. С. 4-22.

4. **Лиханов, И. И.** Бластомилонитовые комплексы западной части Енисейского кряжа (Восточная Сибирь, Россия): геологическая позиция, эволюция метаморфизма и геодинамические модели // Геотектоника. 2021. № 1. С. 412-465.

5. **Матушкин, Н. Ю.** Геология и кинематика Ишимбинской и Приенисейской зон разломов Енисейского кряжа // ИГМ СО РАН. 2010.

6. **Oriolo S., Wemmer K., Oyhantçabal P. et al.** Geochronology of shear zones–A review // Earth-Science Reviews. 2018. V. 185. P. 665-683.

7. **Schmalholz S. M., Podladchikov Y.** Metamorphism under stress: The problem of relating minerals to depth // Geology. 2014. V. 42. N 8. P. 733-734.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ВОПРОСЫ ПЕТРОГЕНЕЗИСА СРЕДНЕЭОЦЕНОВЫХ БАЗАЛЬТОВ СУВОРОВСКОЙ СВИТЫ (ВОСТОЧНЫЙ СИХОТЭ-АЛИНЬ)

А.А. Чащин, Д.В. Андросов, И.Ю. Чекрыжов

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: achashchin@mail.ru

Аннотация. Приведены результаты изучения эоценовых вулканитов (суворовская свита), распространенных в пределах Зеркальненской впадины Восточного Сихотэ-Алиня. Анализ опубликованных геохронологических данных и полученная новая K-Ar датировка (48.5 ± 1.8 млн лет) свидетельствуют, что формирование базальтоидов свиты происходило в довольно узком временном интервале (43-49 млн лет), соответствующем среднему эоцену. По петрогеохимическим особенностям базальтоиды свиты подразделяются на две группы, различающиеся по содержанию SiO_2, TiO_2, $FeO^*_{общ}$, P_2O_5, а также V, Zr, Hf, Nb, Ta, Th, Y, Ba и REE что, по-видимому, связано с разной степенью участия коровой компоненты в их происхождении.

GEOCHEMICAL FEATURES AND QUESTIONS ON THE PETROGENESIS OF MIDDLE EOCENE BASALTIC ROCKS OF THE SUVOROVO FORMATION, EASTERN SIKHOTEALIN

A.A. Chashchin, D.V. Androsov, I.Yu. Chekryzhov

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: achashchin@mail.ru

Abstract. Eocene volcanic rocks of the Suvorovo suite distributed within the Zerkalnenskaya depression in Eastern Sikhote-Alin were studied to clarify the age of the rock formation. A new K-Ar age of 48.5 ± 1.8 Ma obtained, together with the previously published geochronological data, evidences that basaltoids of the suite were formed within the relatively narrow time interval of 43 – 49 Ma that fit the middle Eocene. Petrogeochemically, the basaltoids are divided in two groups varying in the amount of SiO_2, TiO_2, FeO total, P_2O_5, and in the content of V, Zr, Hf, Nb, Ta, Th, Y, Ba, and REE, that may be explained by a different degree of the crust material trapped during their genesis.

Согласно существующим представлениям, начиная с эоцена в пределах кайнозойских рифтогенных впадин северной (Белогорская, Бухтянская, Масловская) и центральной (Кедровская, Светловоднинская, Максимовская и др.) частях Восточного Сихотэ-Алиня, происходит интенсивное формирование бимодальных (базальт-риолитовых) и (или) непрерывных (базальт-андезитовых)

вулканических серий. Для бимодального (контрастного) вулканизма характерно практически одновременное извержение базальтов и риолитов, причем довольно часто в сопоставимых объемах [2]. Детальная геолого-петрологическая характеристика эоценовых вулканогенных образований северной и центральной частей Восточного Сихотэ-Алиня дана в работах [1, 2]. Менее масштабно эоценовый вулканизм проявился в пределах континентальных впадин (Зеркальненская, Крестовская, Ванчинская) южной части Восточного Сихотэ-Алиня. Причем, породы этого возраста, ввиду их ограниченного распространения, изучены здесь значительно слабее. К таковым относятся и эоценовые базальты суворовской свиты, получившие распространение в Зеркальненской впадине. Опубликованные по ним материалы включают петрохимические, геохронологические данные и петрографические описания. Сведения о минералогическом, микроэлементном и особенно изотопном составе этих вулканитов ограничены. В этой связи вопросы генезиса, эволюции и природы глубинных источников данного вулканизма остаются нерешёнными и требуют детального изучения. Важны петролого-геохимические исследования и с практической точки зрения, поскольку с подобными эоценовыми комплексами нередко парагенетически связана благороднометалльная (Au-Ag) минерализация (например, месторождение Салют, Союзное и др.).

В настоящем сообщении приводятся новые петрохимические, геохимические и изотопно-геохронологические данные по основным и средним вулканитам суворовской свиты, ограничено распространённым в пределах осевой части Зеркальненской впадины.

В структурном плане Зеркальненская впадина представляет относительно узкую грабенообразную депрессию компенсационно-раздвигового типа, вытянутую в широтном направлении на 15 км в среднем течении р. Зеркальная. С юга и севера она ограничена дугообразными разломами. Фундамент впадины слагают триасовые и раннемеловые терригенные отложения Таухинского террейна, а также позднемеловые и позднепалеоценовые эффузивы Восточно-Сихотэ-Алинского вулканического пояса.

Сложена суворовская свита преимущественно андезибазальтами, базальтами с частыми прослоями пепловых туфов, туфопесчаников и туфобрекчий. Анализ фаций и элементов залегания базальтов свидетельствует о том, что в процессе формирования свиты излияния базальтов чередовались с выбросами пирокластического материала. При этом преобладание лав свидетельствует о трещинном характере извержений.

Полученные за последние 25 лет разными авторами единичные определения абсолютного возраста (K-Ar методом) базальтоидов суворовской свиты показали, что их формирование происходило в относительно узком временном интервале (43–47 млн лет), соответствующем среднему эоцену [3, 6]. Нами было проведено дополнительное K-Ar датирование андезитобазальтов,

закартированных в центральной части долины р. Зеркальной. Полученная датировка (48.5 ± 1.8 млн лет) оказалась несколько древнее по сравнению с ранее опубликованными возрастами, но в целом не противоречит возрастной оценке свиты.

По содержанию SiO_2 и суммы щелочей ($Na_2O + K_2O$) образцы соответствуют базальтам и андезибазальтам. По соотношению кремнезема и калия все они в большинстве случаев относятся к умереннокалиевой известково-щелочной серии и лишь немногие из них — к высококалиевой известково-щелочной серии. Низкокалиевые разновидности являются исключением. По величине отношения Na_2O/K_2O проанализированные вулканиты обладают калиево-натриевой специализацией (1.6-3.6), а по содержанию глинозема принадлежат к высокоглиноземистым (al = 1.2-1.6) и умеренно-глиноземистым разностям (al = 0.75-0.97).

С учетом особенностей распределения петрогенных оксидов и микроэлементов в базальтоидах суворовской свиты исследуемые вулканиты можно разделить на две группы.

Вулканиты первой группы представлены базальтами и андезибазальтами, для которых свойственен широкий диапазон вариаций MgO от 4.56 до 9.54 мас. % (при Mg# = 0.50 - 0.71). Породы имеют относительно высокие концентрации TiO_2 (1.28-1.72 мас. %), $FeO^*_{общ.}$ (8.3-9.7), P_2O_5 (0.43-0.65 мас. %) и низкие - SiO_2 (47.4-51.2 мас. %). Помимо этого, для них характерны повышенные содержания V, Zr, Hf, Nb, Ta, Th, Y, Ba. Примечательно, что магнезиальные разности базальтоидов наиболее обогащены Ni, Co, V и относительно обеднены Ti, Zr, Hf, Nb, Ba и Sr. На мультиэлементных спектрах базальтов и андезибазальтов этой группы отчетливо выражены максимум по Ba, минимумы – по Rb, Nb-Ta, и менее проявленные отрицательные аномалии по Hf, Ce, Ti и положительная – по Sr (рис.1а). Базальтоиды первой группы характеризуются умеренной степенью фракционирования $(La/Yb)_n$ = 6.6-10.8 и отсутствием Eu – минимума (Eu/Eu^* = 0.72-1.20). Суммарные содержания REE варьируют в них от 120 до 166 г/т. Вулканиты второй группы демонстрируют несколько повышенную кремнекислотность (SiO_2 = 52.90–55.34 мас. %), умеренную магнезиальность (MgO = 3.16-6.11 мас. % при Mg# = 0.57-0.65) и низкие содержания – TiO_2 (0.78-0.98 мас. %), $FeO^*_{общ.}$ (6.42-7.60) и P_2O_5 (0.24-0.28 мас. %). По сравнению с базальтоидами первой группы они обеднены Zr, Hf, Nb, Ta, Y, Th, Ba, вследствие чего они имеют менее выраженную положительную аномалию по Ba и более глубокий минимум по Nb-Ta на мультиэлементных спектрах. Они обнаруживают более низкий уровень абсолютных концентраций REE (77-103 г/т). При этом, базальты обеих групп не отличаются друг от друга по характеру распределения REE (рис. 1б) и, соответственно, отношениям $(La/Yb)_n$ (6.4-9.2).

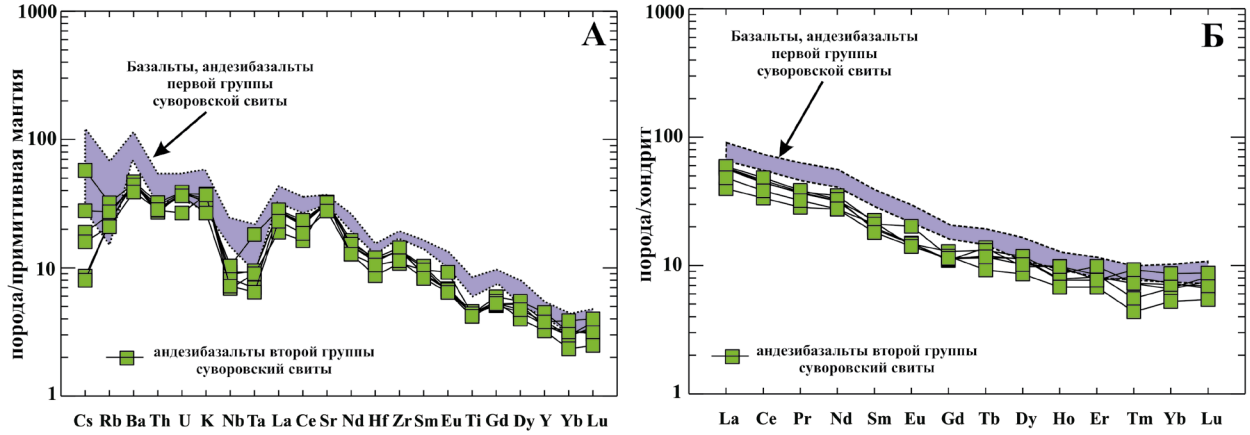


Рисунок 1. Спайдер диаграммы для базальтов и андезибазальтов суворовской свиты. а) нормированные к исходной мантии, по [4]; б) нормированные к хондриту [5].

Figure 1. Spider diagrams for basalts and basaltic andesites of the Suvorovo Formation. a) normalized to the primitive mantle to [4]; b) normalized to chondrite to [5].

Как отмечалось выше, характерной геохимической особенностью всех изученных базальтоидов суворовской свиты является относительно повышенное содержание LILE (Ba, Sr) при устойчивом дефиците в отношении некоторых HFSE (Ta, Nb и Ti), что обычно считается типоморфным признаком пород надсубдукционного происхождения. Действительно, на ряде дискриминантных диаграмм (Zr-Nb-Y, Th-Hf-Ta и др.) все проанализированные образцы располагаются внутри полей магматитов активных континентальных окраин и островных дуг. Однако, согласно существующим представлениям, формирование базитовых магм деплетированых в отношении Ta, Nb и Ti может происходить и при контаминации их коровым веществом [9].

Принимая во внимание тот факт, что формирование базальтоидов суворовской свиты в пределах Зеркальненской депрессии происходило в условиях мощного палеогенового растяжения коры, нельзя исключать вероятность участия процессов коровой контаминации в магмогенезисе изученных пород. В пользу этого предположения, в частности, свидетельствует расположение их фигуративных точек на диаграмме Ce/Y-La/Nb, где андезибазальты первой группы размещаются вблизи тренда смешения мантийных составов с корой, тогда как базальтоиды второй группы несколько смещены к тренду плавления мантии. О влиянии корового субстрата на состав исходного расплава указывают также и величины некоторых межэлементных отношений Th/Ce (0.06-0.15), Ce/Pb (3-8), Nb/U (7-12), которые близки к таковым в континентальной коре [7, 8].

Таким образом, полученные результаты позволяют предположить, что исходные для базальтов и андезибазальтов суворовской свиты магматические расплавы были контаминированы материалом континентальной коры, а вариации петро= и микроэлементов отражают различный вклад коровой компоненты. Именно корово-мантийным взаимодействием объясняется и

сопряжённое появление на поздней стадии эволюции подобных комплексов кислых магм с типовым Au-Ag оруденением, отражающим смешение разноглубинных флюидных систем.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мартынов Ю.А.** Петрология эоцен-миоценовой контрастной формации Нижнего Приамурья. Владивосток: ДВНЦ АН СССР. 1983. 143 с.

2. **Попов В.К.** Петрология палеоген-неогеновых вулканических комплексов Восточного Сихотэ-Алиня. Владивосток: ДВО РАН СССР. 1986. 156 с.

3. **Павлюткин Б.И., Чекрыжов И.Ю., Петренко Т.И.** Проблемы стратиграфии палеогена-неогена Зеркальненской впадины (Восточный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35. № 4. С. 49-64.

4. **McDonough W.F., Sun S.-S.** The composition of the Earth // Chemical Geology. 1995. V. 120. P. 223-253.

5. **Nakamura N.** Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na and K in carbonaceous and ordinary chondrities // Geochim. Cosmochim. Acta. 1974. V. 38. P. 757-775.

6. **Okamura S., Martynov Y.A., Furuyama K., Nagao K.** K–Ar ages of the basaltic rocks from Far East Russia: constraints on the tectono-magmatism associated with the Japan Sea opening. // The Island Arc. 1998. V. 7. P. 271–282. https://doi.org/10.1046/j.1440-1738.1998.00174.x

7. **Rudnick R.L., Fountain D.M.** Nature and composition of the continental crust: a lower crustal perspective // Rev. Geophys. 1995. V. 33. P. 267-309.

8. **Taylor S.R., McLennan S.M.** The continental crust: its composition and evolution. Blackwell: Oxford Press, 1985. 312 p.

9. **Xia L.Q.** The geochemical criteria to distinguish continental basalts from arc related ones // Earth Sci. Rev. 2014. V.139. P.195-212.

HETEROGENEOUS MID-OCEAN RIDGE BASALTIC MAGMA PLUMBING SYSTEM UNDERNEATH THE ULTRASLOW-SPREADING SW INDIAN RIDGE

Ben Ma[1], Ping-Ping Liu[2]

[1]SKLab-DeepMinE, MOEKLab-OBCE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, China, e-mail: maben@stu.pku.edu.cn

[2]SKLab-DeepMinE, MOEKLab-OBCE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, China, e-mail: ppliu@pku.edu.cn

Abstract. Processes of magma generation and evolution in global mid-ocean ridges are key to understanding lithospheric architecture at divergent plate boundaries. The composition and isotopic characteristics of olivine and plagioclase minerals in mid-ocean ridge basalts can reveal such complex magmatic processes [3, 5].

In this study, we report major, minor and trace element of olivine and plagioclase and in-situ Sr isotopes of plagioclase in basalts sampled from the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge, revealing different magma sources and a trans-lithospheric complex magma plumbing system [2]. The olivines in our study can be divided into high-Fo (84-89) and low-Fo group (74-77) and the olivines of Dr. 30 show elevated Ca and Ti contents at similar Fo. Correspondingly, the An compositions of plagioclase are also characterized by primitive and evolved features, with low-Mg basalts tending to have lower An values (~47). In one particular Plagioclase Ultraphyric Basalt [1, 4], plagioclase macrocrysts have high An (80 to 86) compositions in the cores, with An decreasing to ~43 within 300 um of the rim.

The plagioclase macrocrysts with high An contents of Dr. 30 and 31 show large variations in Sr and Ba (Figure 1). In Dr. 30 basalts, plagioclase macrocrysts can be divided into two groups, the high Sr and Ba group and low Sr and Ba group, with no profile variation in each grains, but the enrichment of Sr and Ba contents in Dr. 31 plagioclase with high An contents occurs essentially in the range of ~300 to ~1600 um in length from plagioclase rim.

Plagioclase of Dr. 30 and 31 has 87Sr/86Sr ranging from 0.70323 to 0.70507, recording an intracrystalline disequilibrium within plagioclase grains and no correlation between Sr contents and isotopes. The presence of intracrystalline Sr isotopic disequilibrium provides evidence that a single mineral grain has interacted with multiple generations of melts of diverse Sr isotope composition during growth. In-situ isotopic analyses of mineral grains document fine-scale aggregation history of distinct mantle-derived melts within the crystal mush.

In summary, these findings suggest the contribution of derived melts from different mantle sources and the existence of a trans-lithospheric and heterogeneous magma mush system beneath the ultraslow-spreading ridge, emphasizing the intricate interplay between multiple magma sources, magma replenishment, and magma evolution.

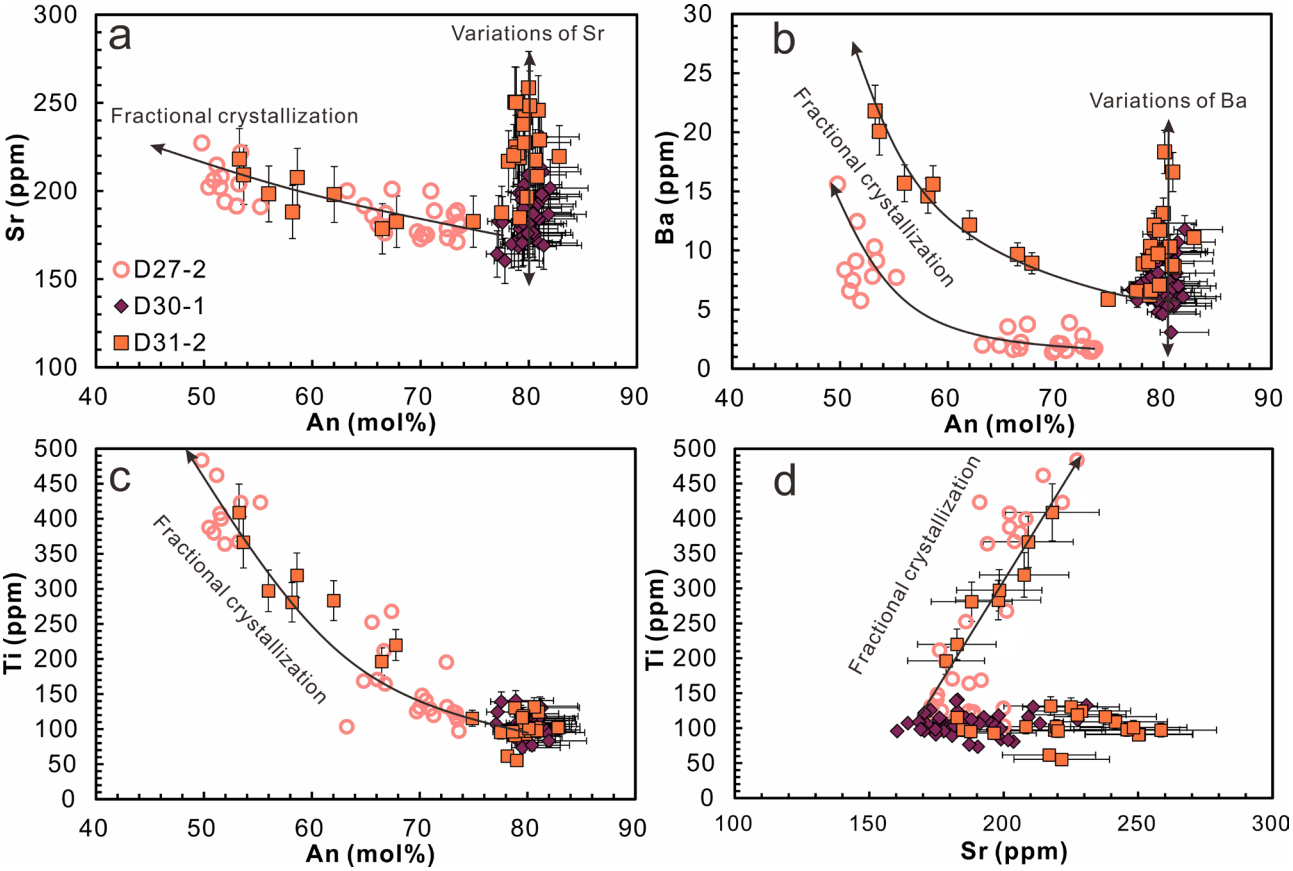


Figure 1. Trace element concentrations against An of plagioclase from the basalts of Southwest Indian Ridge. The plagioclase macrocrysts with high An contents of Dr. 30 and 31 show large variations in Sr and Ba, ranging from 160 to 260 ppm for Sr and 3 to 18 ppm for Ba, respectively.

REFERENCES

1. **Cui X., Zhou H., Koepke J. and Ma Q.** Polybaric heterogeneous mush zones: From deep to shallow beneath the ultraslow-spreading Southwest Indian Ridge // Earth and Planetary Science Letters. 2025. V. 658. P. 119325.

2. **Ma B., Liu P.-P., Dick H.J.B., Zhou M.-F., Chen Q. and Liu C.-Z.** Trans-Lithospheric Ascent Processes of the Deep-Rooted Magma Plumbing System Underneath the Ultraslow-Spreading SW Indian Ridge // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2024. V. 129. N 1.

3. **Lange A.E., Nielsen R.L., Tepley F.J. and Kent A.J.R.** Diverse Sr isotope signatures preserved in mid-oceanic-ridge basalt plagioclase // Geology. 2013. V. 41. N 2. P. 279-282.

4. **Lange A.E., Nielsen R.L., Tepley III F.J. and Kent A.J.** The petrogenesis of plagioclase–phyric basalts at mid–ocean ridges // Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2013. V. 14. N 8. P. 3282-3296.

5. **Rasmussen M.B., Halldórsson S.A., Gibson S.A. and Guðfinnsson G.H.** Olivine chemistry reveals compositional source heterogeneities within a tilted mantle plume beneath Iceland // Earth and Planetary Science Letters. 2020. V. 531. P. 116008

ACCELERATED MAGMA ASCENT THROUGH CONTINENTAL LITHOSPHERE: INSIGHTS FROM FE-MG DIFFUSION OF MANTLE OLIVINE HOSTED IN CENOZOIC BASALTS OF EASTERN CHINA

Ze-Xian Yao, Ping-Ping Liu, Ben Ma

SKLab-DeepMinE, MOEKLab-OBCE, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, e-mail: zxyao@stu.pku.edu.cn

Abstract. Constraining magma ascent rates is critical for understanding mantle-crust interactions and predicting volcanic hazards. However, the wide range of magma ascent rates (<0.1 to 10m/s) [6], their variations during ascent, and the controlling parameters are still poorly constrained. This limits our understanding on the dynamics of volcanic eruptions. The Cenozoic alkali basalts in eastern China hosts abundant lherzolite xenoliths [3], and are ideal to study trans-lithospheric magma ascent. We investigate ascent of Cenozoic intraplate basalts from eastern China using entrained lherzolites, which contain compositionally-zoned olivine in contact with basalts. Fe-Mg diffusion chronometry of olivine indicates short ascent timescales between 4 hours and 3 years, precluding prolonged crustal storage. Integrated with depths of lherzolites (32-75km) and their settling velocities (0.04-1.36m/s), the calculated magma ascent rates range from 0.21 to 2.34 m/s, and are faster west of the Great Gradient Line (0.36-2.34m/s) compared to the east (0.21-0.36m/s). High ascent rates in the west are ascribed to high water contents of the melts produced by increased proportion of pyroxenite melting under thick lithosphere (>120km). Combined with previous studies [1-2, 4-6], an accelerated average trans-lithospheric magma ascent from lithospheric mantle (~1.30-1.71m/s), through continental crust (~6.13m/s) to near-surface eruption (up to 17.3m/s) is firstly quantified. The high speed of magma transport in the mantle hints at quick eruptions once the basaltic melts are generated.

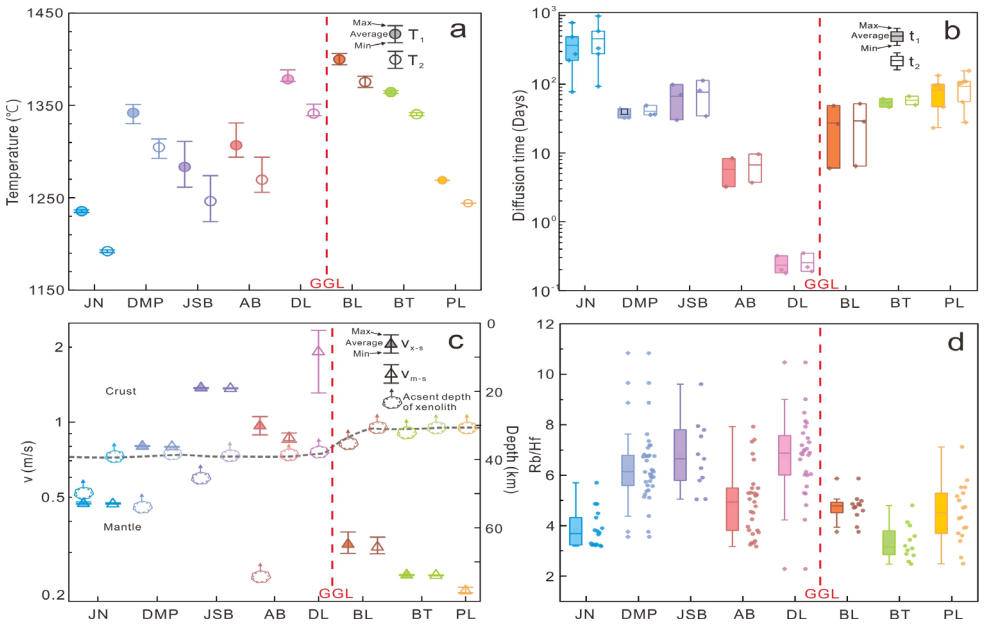


Figure 1. (a) Temperature for diffusion models. T_1 and T_2 represent the crystallization temperatures calculated using Moho pressure (P_1) and 0.5GPa (P_2), respectively; (b) Fe-Mg diffusion times of different volcanic fields. t_1 and t_2 are calculated separately using T_1-P_1 and T_2-P_2. (c) Magma ascent rates and depths of the mantle xenoliths. The velocities of the magma ($V_{x\text{-}s}$ and $V_{m\text{-}s}$) are calculated using xenolith ascent rates (V_{xeno} and V_{moho}) and settling rates (V_s). V_{xeno} is determined by ascent time (t_1) and pre-trapping mantle xenolith depth, while Vmoho is based on t_2 and Moho depth. The xenolith figures correspond to their respective depths for calculating xenolith ascent rates. (d) Rb/Hf ratios of the Cenozoic basalts studied (details see Appendix B).

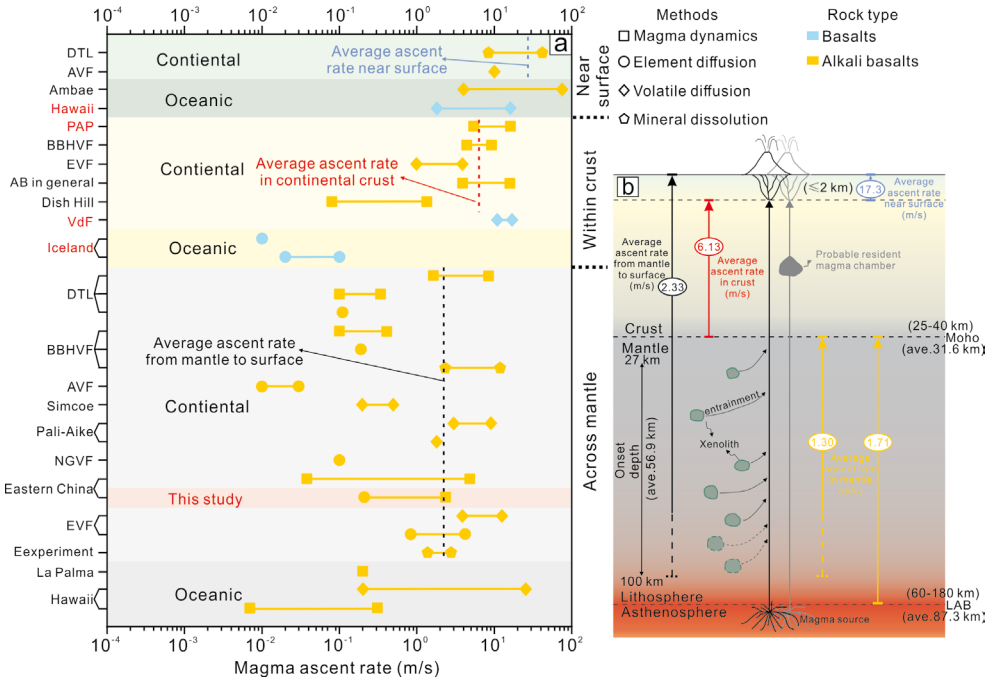


Figure 2. (a) Comparison of ascent rates of mantle-xenolith-hosting Cenozoic basaltic magmas in eastern China with literature-reported ones, analyzed by various methods in different tectonic settings (Appendix E). Red-marked volcanoes lack xenoliths. (b) Depth-segmented model for magma ascent rates in intracontinental volcanoes. Onset depth is the initial range for calculating ascent rates, usually where mantle xenoliths are entrained. Black arrows and figures show average ascent velocity from mantle to surface and corresponding ascent depth of xenoliths. Red and blue arrows indicate ascent rates in the crust and near the surface respectively. Green arrows and numbers represent magma ascent rates in the mantle, calculated using mantle xenolith entrainment depths or lithosphere-asthenosphere boundary (LAB).

REFERENCES

1. **Brenna M., Cronin S.J., Smith I.E.M., Tollan P.M.E., Scott J.M., Prior D.J., et al.** Olivine xenocryst diffusion reveals rapid monogenetic basaltic magma ascent following complex storage at Pupuke Maar, Auckland Volcanic Field, New Zealand // Earth and Planetary Science Letters. 2018. V. 499. P. 13–22.

2. **Demouchy S., Jacobsen S.D., Gaillard F. & Stern C.R.** Rapid magma ascent recorded by water diffusion profiles in mantle olivine // Geology. 2006. V. 34. N 6. P. 429.

3. **Fan Q. & Hooper P.R.** The Mineral Chemistry of Ultramafic Xenoliths of Eastern China: Implications for Upper Mantle Composition and the Paleogeotherms // Journal of Petrology. 1989. V. 30. N 5. P. 1117–1158.

4. **Jankovics M.É., Dobosi G., Embey-Isztin A., Kiss B., Sági T., Harangi S. & Ntaflos T.** Origin and ascent history of unusually crystal-rich alkaline basaltic magmas from the western Pannonian Basin // Bulletin of Volcanology. 2013. V. 75. N 9. P. 749.

5. **Kokandakar G. J., Ghodke S. S., Rathna K., More L. B., Nagaraju B., Bhosle M. V., & Kumar K. V.** Density, Viscosity and Velocity (Ascent Rate) of Alkaline Magmas // Journal of the Geological Society of India. 2018. V. 91. N 2. P. 135–146.

6. **Peslier A.H., Bizimis M. & Matney M.** Water disequilibrium in olivines from Hawaiian peridotites: Recent metasomatism, H diffusion and magma ascent rates // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2015. V. 154. P. 98–117.

ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ В ЗОНАХ СУБДУКЦИИ, КОЛЛИЗИИ И СКОЛЬЖЕНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

SEDIMENTATION IN THE LITHOSPHERIC PLATES, SUBDUCTION, COLLISION AND SLIDE ZONES

ПРОЯВЛЕНИЕ ПОЗДНЕПЕРМСКОГО ГЕОСФЕРНОГО КРИЗИСА В ГЛУБОКОВОДНЫХ ЗАДУГОВЫХ БАССЕЙНАХ ОХОТСКО-ТАЙГОНОССКОЙ ВУЛКАНИЧЕСКОЙ ДУГИ (СЕВЕРО-ВОСТОК АЗИИ)

А.С. Бяков[1,2], И.Л. Ведерников[1], И.В. Брынько[1,2]

[1]Северо-Восточный комплесный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан, e-mail: abiakov@mail.ru

[2]Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан

Аннотация. В конце пермского периода произошло крупнейшее в истории Земли геобиосферное событие. Рассмотрены изменения биоты, седиментации и геохимических характеристик на событийном рубеже позднепермского вымирания в задуговых глубоководных бассейнах Охотско-Тайгоносской (Кони-Тайгоносской) вулканической дуги на Северо-Востоке Азии. Показано, что эти изменения были очень существенными и, очевидно, связаны с проявлением вулканизма. Здесь полностью вымирают представители высокобореальной пермской фауны, происходит полное исчезновении биотурбации и текстур нарушенной слоистости, сменяющихся контуритами, что свидетельствует об углублении бассейна. В основании событийного интервала выявлены резкие аномалии содержания ряда химических элементов: Mo, Sn, Pb, As, V и Hg, а также изменение петрохимических характеристик. Фиксируются признаки аноксических обстановок, что выявлено по резко повышенным (на порядок) значениям отношения Mo/Mn. Здесь также значительно увеличиваются содержания Hg, нормированные на TOC и наблюдается хорошо выраженный отрицательный тренд величины $\delta^{13}C_{орг}$.

MANIFESTATION OF THE LATE PERMIAN GEOSPHERE CRISIS IN THE DEEP-SEA BACK-ARC BASINS OF THE OKHOTSK-TAIGONOS VOLCANIC ARC (NORTHEAST ASIA)

A.S. Biakov[1,2], I.L. Vedernikov[1], I.V. Brynko[1,2]

[1]North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute n.a. N.A. Shilo FEB RAS, Magadan, e-mail: abiakov@mail.ru

[2]North-Eastern State University, Magadan

Abstract. The largest geobiospheric event in the phanerozoic history of the Earth occurred at the end of the Permian. Changes in biota, sedimentation, and

geochemical characteristics at the event boundary of the Late Permian extinction in the deep-sea back-arc basins of the Okhotsk-Taigonos (Koni-Taigonos) volcanic arc in Northeast Asia are considered. It is shown that these changes were very significant and are obviously related to the manifestation of volcanism. Here, representatives of the hight-boreal Permian fauna completely die out, there is a complete disappearance of bioturbation and textures of disturbed layering, replaced by contourites, which indicates a deepening of the basin. At the base of the event interval, sharp anomalies in the content of a number of chemical elements were identified: Mo, Sn, Pb, As, V and Hg, as well as changes in petrochemical characteristics. Signs of anoxic conditions are recorded, which is revealed by sharply increased (by an order of magnitude) values of the Mo/Mn ratio. Here, the Hg contents, normalized to TOC, also increase significantly and a well-defined negative trend in the $\delta^{13}C_{org}$ value is observed.

В конце пермского периода произошло крупнейшее в фанерозойской истории Земли вымирание биоты, когда исчезло более 95% морских организмов и многие группы наземной биоты. Это катастрофическое событие повсеместно сопровождалось также резкими изменениями процессов осадконакопления и различных геохимических характеристик отложений (как петро-, так и элементной геохимии). В глубоководных разрезах пермских задуговых бассейнов Охотско-Тайгоносской (Кони-Тайгоносской) вулканической дуги (Аян-Юряхском, Балыгычанском, Гижигинском и др.) на Северо-Востоке Азии позднепермское геосферное событие может быть реконструировано весьма отчетливо. Переходные отложения перми и триаса здесь представлены верхней частью старательской свиты и нижней частью балтинской толщи (Аян-Юряхский бассейн), и верхами паутовской и низами гербинской свит (Балыгычанский бассейн). Это довольно мощные (первые сотни метров) глинисто-алевролитовые толщи, стратиграфическая граница между которыми и фиксирует рассматриваемый событийный интервал.

Дособытийный уровень (старательская и паутовская свиты) представлен своеобразными темно-серыми песчанистыми аргиллитами с прослоями алевролитов с характерной нарушенной слоистостью, образованной за счет плотностной дифференциации осадка, неяснопятнистыми текстурами и интенсивной биотурбацией. В отложениях часто встречаются многочисленные остатки бентосной фауны — иноцерамоподобные двустворчатые моллюски родов *Maitaia* и *Intomodesma* и гастроподы-эуомфалиды *Straparolus* sp. [1, 2].

Рассматриваемый событийный уровень лучше всего изучен в западных частях Балыгычанского седиментационного бассейна [1]. Контакт паутовской свиты с вышележащими отложениями гербинской свиты, изученный в верховьях р. Паутовая, отчетливый. Здесь, вверх по разрезу, неяснослоистые, со следами биотурбации граувакковые породы паутовской свиты в интервале нескольких метров сменяются тонкоотмученными аргиллитами гербинской свиты, в

которых присутствуют редкие сгущения (3–10 мм через 7–40 мм) светло-серых тонко-горизонтально-слоистых (нитевидные слойки от долей миллиметра до 1 мм) кварцево-полевошпатовых алевролитов. Иногда в этих слойках намечается градационная и косая слоистость, что позволяет интерпретировать рассматриваемые отложения как контуриты, свидетельствующие об углублении бассейна седиментации на рассматриваемом рубеже.

Появление в разрезе отмеченных разновидностей пород маркирует событийный уровень, с которым совпадает полное исчезновение остатков фауны (иноцерамоподобных двустворчатых моллюсков и гастропод-эуомфалид — типичных представителей пермской высокобореальной биоты) и каких-либо следов жизнедеятельности, в том числе текстур биотурбации осадка. За долгие годы исследований несколько выше событийной границы был обнаружен единственный отпечаток пектиноидной двустворки *Claraioides* aff. *primitivus* (Yin) [3]. Как считается, эти двустворки вели псевдопланктонный образ жизни, прикрепляясь к плавающим остаткам растений. Никаких других остатков фауны в низах гербинской свиты не найдено. Первые раннетриасовые аммоноидеи *Tompophiceras pascoei* (Spath) найдены лишь примерно в 70 м выше по разрезу от подошвы гербинской свиты.

На рассматриваемом событийном рубеже установлено также существенное изменение петрографических особенностей отложений: кардинально меняется состав обломочной части алевролитов и песчаников (лититовую составляющую, представленную преимущественно обломками вулканитов кислого и среднего состава, вытесняет обломочный кварц, при этом валовое содержание кремнезема в породах значимо уменьшается).

В основании событийного интервала по данным экспрессного количественного спектрального анализа выявлены резкие аномалии содержаний ряда химических элементов: Mo (увеличение с 1 до 5–25 г/т), Sn (с 2 до 5–12 г/т), Pb (с 5 до 40 г/т), As (с 5 до 95 г/т) и Sb (с 2 до 10 г/т), а также V и Hg. Здесь же происходит значительное изменение петрохимических характеристик – уменьшается содержание кремнезема и оксида натрия. Фиксируются признаки аноксических обстановок: наблюдаются резко повышенные (на порядок) значения отношения Mo/Mn (до 0.048 вместо фоновых 0.002–0.008 для изучаемого бассейна) [4]. Недавно изученные нами в кооперации с китайскими коллегами (J. Shen) содержания Hg, нормированные на TOC, обнаруживают на событийном рубеже резкое увеличение (более чем в три раза), что является, согласно исследованиям многих авторов [6; и др.], свидетельством проявления вулканизма. Однако его природа (островодужный или плюмовый) пока не расшифрована.

Изучение величины $\delta^{13}C_{орг.}$ в пограничных пермо-триасовых отложениях в Балыгычанском бассейне [5] показало присутствие хорошо выраженного отрицательного тренда вблизи событийного интервала: от –24.7‰ до –27‰, что наблюдается и в большинстве разрезов мира на рассматриваемом уровне

[7; и др.]. Этот отрицательный тренд свидетельствует о резком падении биопродуктивности в бассейне.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ, проект № 24-27-00180, https://rscf.ru/project/24-27-00180/.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бяков А.С., Ведерников И.Л.** Стратиграфия пермских отложений северо-восточного обрамления Охотского массива, центральной и юго-восточной частей Аян-Юряхского антиклинория. Препринт. Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, 1990. 69 с.

2. **Бяков А.С.** Пермские отложения Балыгычанского поднятия (Северо-Восток Азии). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. 87 с.

3. **Бяков А.С.** О полном объеме перми на Северо-Востоке Азии: палеонтологическое доказательство присутствия аналогов чансина // Докл. РАН. 2001. Т. 378. № 3. С. 363–365.

4. **Бяков А.С., Ведерников И.Л.** Свидетельства аноксии на рубеже перми и триаса в глубоководных фациях на Северо-Востоке Азии // Докл. РАН. 2007. Т. 417. № 5. С. 654–656.

5. **Бяков А.С., Horacek M., Горячев Н.А., Ведерников И.Л., Захаров Ю.Д.** Первая детальная запись $\delta^{13}C_{org.}$ в пограничных пермо-триасовых отложениях Колымо-Омолонского региона (Северо-Восток Азии) // Докл. АН. 2017. Т. 474. № 3. С. 347–350.

6. **Grasby S.E., Them T.R.II, Chen Z., Yin R., Ardakani O.H.** Mercury as a proxy for volcanic emissions in the geologic record // Earth-Sci. Rev. 2019. V. 196. P. 102880.

7. **Korte C., Kozur H.W.** Carbon-isotope stratigraphy across the Permian-Triassic boundary: A review // Journ. Asian Earth Sci. 2010. V. 39. P. 215-235.

ЛИТОХИМИЯ ГРАНИЦЫ ПОЗДНЕПЕРМСКОГО МАССОВОГО ВЫМИРАНИЯ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ АЗИИ

И.Л. Ведерников[1], А.С. Бяков[1,2], И.В. Брынько[1], С.С. Бурнатный[1]

[1]Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан, e-mail: ivedernikov@rambler.ru

[2]Северо-Восточный государственный университет, г. Магадан

Аннотация. Детальная стратиграфия семикилометрового разреза от нижней перми до нижнего триаса и его литохимическое изучение позволили выделить уникальные изменения на событийной границе позднепермского массового вымирания. Использован аналитический материал из шести ключевых разрезов переходных пермо-триасовых слоёв.

LITHOCHEMISTRY OF THE LATE PERMIAN MASS EXTINCTION BOUNDARY IN NORTHEAST ASIA

I.L. Vedernikov[1], A.S. Biakov[1,2], I.V. Brynko[1], S.S. Burnatny[1]

[1]North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, Magadan, e-mail: ivedernikov@rambler.ru

[2]North-Eastern State University, Magadan

Abstract. Detailed stratigraphy of a seven-kilometer section from the Lower Permian to the Lower Triassic and its lithochemical study allowed us to identify unique changes at the event boundary of the Late Permian mass extinction. Analytical material from six key sections of the Permian-Triassic transition layers was used.

Событийная граница позднепермского массового вымирания на Северо-Востоке Азии наиболее полно представлена в отложениях задуговых бассейнов Охотско-Тайгоносской вулканической дуги (Охотского, Аян-Юряхского и Балыгычанского). Формировались эти осадки в относительно глубоководных условиях на континентальном склоне и у его подножия. Для выделения уникальных литохмических особенностей событийной границы их необходимо было сравнить с подобными особенностями всего подстилающего пермского разреза [3].

Мощность выведенных на дневную поверхность отложений только в интервале от верхов нижней перми до нижнего триаса около 7 км. Это однообразные, на первый взгляд, сероцветные, можно даже сказать, черносланцевые толщи. В гранулометрическом отношении — преимущественно

пелиты, слагающие фации, которые мы предлагаем называть фоновыми. Их литохимия и текстурные характеристики устойчивы по простиранию, коррелируются между бассейнами и сравнительно постоянны по мощности. Геохимические параметры осадков этих фаций отражают специфику бассейнов осадконакопления, а возможные изменения, связанные с глобальным событием, не маскируются резкой сменой литологии (в отличие от мелководья)

Дебризные фации, которые накладываются на фоновые фации крайне невыдержанно и по простиранию, и по мощности, при построении литохимических колонок мы аккуратно исключили.

Основной объем данных был первоначально получен в результате описания и опробования (через 10 м по мощности) разрезов Аян-Юряхского бассейна (525 отрядо/дней в течение пяти сезонов) и дополнен корреляцией с Охотским [2] и Балыгычанским бассейнами [1]. Это позволило по фаунистическим и текстурным признакам разделить отложения на 13 картируемых стратиграфических подразделений [3], признанных геологами-съемщиками. Была установлена их стратиграфическая последовательность и отсутствие перерывов, а также открыта однонаправленная литохимическая эволюция осадка [4]. На четырех стратиграфических рубежах вверх по разрезу ступенчато снижается содержание кремния и натрия. В пересчете на оксиды максимально наглядно это демонстрирует модульная дискриминантная диаграмма ФМ-НКМ, предложенная Я.Э. Юдовичем и М.П. Кетрис [6]. Рубежи точно совпадают со сменой вверх по разрезу наиболее выдержанных по простиранию текстур: биотурбации, турбидитных циклов, и текстур тончайшей горизонтальной слоистости. Названные текстуры определяют основную композицию смены фоновых фаций во всех разрезах описываемых бассейнов и в сочетании с находками фауны способствуют надежной корреляции и стратиграфической привязке. Такими же фациями представлена и рассматриваемая событийная граница позднепермского массового вымирания (ранее граница перми и триаса), чем она здесь и интересна.

В сводном разрезе насчитывается четыре мощных (до 500 м) интервала с текстурами биотурбации различной степени (от неясно пятнистых текстур до степени почти полной гомогенизации осадка). Нижняя граница таких интервалов, там, где это позволяют установить условия наблюдения, фациальная (чередование возрастающих по мощности пакетов). Верхняя граница — событийная, резкая. Верхний интервал обрывается событийной границей Великого пермского вымирания.

Текстуры биотурбации — свидетельство бурной жизни в придонном слое по определению [5]. Текстуры тончайшей горизонтальной слоистости, напротив — смерть всего живого. Таким образом, скачкообразный переход от биотурбированного осадка к тончайшей параллельной слоистости — однозначный индикатор вымирания. Они изучались нами детально. Наибольший интерес, естественно, вызывает интервал позднепермского массового

вымирания. Он же литохимически и самый контрастный. Опробование через 1.5 см по мощности выявило резкие, стократно превышающие фоновые значения, всплески содержаний индикаторных элементов, свидетельствующих об аноксии [6] – молибдена и ванадия.

При этом резкие различия физических свойств дособытийных («пермских») и постсобытийных («триасовых») пород на этом интервале почти повсеместно приводят к тектоническим нарушениям, что делает поиск пригодных для изучения разрезов трудной задачей. На сегодня в районе исследований удалось найти только шесть коренных обнажений с непрерывным пермо-триасовым переходом. Характер перехода в них однотипный. Интервал опробования уменьшался при приближении к фаунистически подтвержденной границе с 10 м до 1.5 м, затем 15 см и 1.5 см.

Более того, в ходе полевых работ 2021, 2022 годов в разрезе на руч. Косой (верховья р. Среднекан, Балыгычанский бассейн) удалось отобрать образцы такого перехода, где дособытийные и постсобытийные слои находятся в одном штуфе (12-4-16/ИВ-22).

Здесь на биотурбированные до полной гомогенизации породы широкинской свиты (мощность 150-170 м), содержащие многочисленные остатки позднепермской фауны, согласно залегают породы «триаса» с тончайшей слоистостью, в которых сохраняются даже слойки мощностью в одно алевритовое зернышко до 0.05 мм. Первый тончайший слоек ложится непосредственно на биотурбированную породу и на лежащие параллельно плоскости напластования линзовидные скопления обломков призматического слоя раковин крупных иноцерамоподобных двустворок, раковин гастропод *Straparolus sp.* и неопределимой проблематики. Выше наблюдается только тончайшая горизонтальная слоистость, характерная для гербинской свиты раннего триаса без каких-либо остатков фауны и следов биотурбации. Смена происходит на интервале 8 мм мощности. Было опробовано восемь пересечений событийной границы, что позволяет уверенно установить стратифицируемые геохимические изменения по разрезу.

Из образца 12-4-16/ИВ-22, представляющего переходные слои событийного уровня позднепермского массового вымирания, был изготовлен препарат, включающий 2 см мощности и исследованы на электронном сканирующем микроскопе три параллельных профиля в крест простирания. На каждом свыше 2000 точек измерения содержаний 20 элементов. На графиках выявляется три контрастных слоя (прежде всего по содержанию натрия и кремния). Мощность каждого в препарате около 6 мм. Нижний слой («пермский»), среднее содержание в пересчете на оксид $Si0_2$=70.7%. Средний слой — он еще без слойков (биотурбация?), но уже имеющий аргиллиты с триасовой литохимией $Si0_{2\ средне}$=55.4%, выше слой явно триасовой текстуры с пакетами тончайших слойков $Si0_{2\ средне}$=60,9%, а в кровле этого слоя (аргиллит без слойков алевролита) $Si0_{2\ средне}$=54.3%! Вот так реально отличаются по

содержанию кремнезема дособытийные «пермские» аргиллиты (70%) от постсобытийных «триасовых» (54%) в одном и том же типе пород. Так же резко падает содержание натрия в пересчете на оксид.

Исследования элементного состава проводились на сканирующем электронном микроскопе EVO-50 с энергодисперсионными спектрометрами AXS XFlash фирмы Bruker и системой рентгеновского микроанализа Quantax Esprite 1.9 (Северо-Восточный ЦКП, СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, аналитик – Соцкая О.Т.).

Таким образом, литохимическое опробование проведено от бассейна до микроструктуры (четыре уровня разрешения с постепенным приближением к событийной границе). Это позволило сузить интервал изменений, предшествовавших катастрофическому событию позднепермского массового вымирания в изученных бассейнах, до 9 см мощности разреза, а восстановление кислородной среды (судя по индикаторным элементам – Mo и V) до 4.5 см. Исходя из усредненной скорости осадконакопления этих толщ временной интервал изменений можно очень приблизительно оценить в 430 и 220 лет соответственно. Причем гибель биоты в бассейнах наступила в самом начале пика аноксии (менее чем через 50 лет после начала катастрофического события).

Для всех шести коренных обнажений событийной границы получены силикатные анализы методом РФА или САСП, для разреза на руч. Косом используются результаты анализа ICP MC, в том числе содержаний РЗЭ, изучена изотопия неокисленного углерода, проведены палеомагнитные исследования. Сравнение литохимических изменений в шести разрезах позволяет выделить общие для всех индикаторы катастрофы, последовательность их проявления и подойти к решению вопроса о причинах и следствиях этого грандиозного события. Совпадение направленности литохимических изменений при переходе через событийную границу позднепермского массового вымирания с общим эволюционным трендом в перми может поставить вопрос о закономерности этого события [4].

Исследования выполнены при финансовой поддержке РНФ, проект № 24-27-00180, https://rscf.ru/project/24-27-00180/.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бяков А.С.** Пермские отложения Балыгычанского поднятия (Северо-Восток Азии). Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2004. 87 с.

2. **Бяков А.С., Ведерников И.Л.** Пермские морские макрофации северо-восточной периферии Охотского седиментационного бассейна (северо-восток Азии) // Осадочные бассейны, седиментационные и постседиментационные процессы в геологической истории. Материалы VII Всероссийского литологического совещания. Новосибирск. 2013. Том I. С. 131-134.

3. **Бяков А.С., Ведерников И.Л.** Стратиграфия пермских отложений северо-восточного обрамления Охотского массива, центральной и юго-восточной частей Аян-Юряхского антиклинория. Препринт. Магадан: СВКНИИ ДВО АН СССР, СВПГО. 1990. 69 с.

4. **Ведерников И.Л., Бяков А.С., Брынько И.В., Наумов А.Н., Бурнатный С.С.** Эволюция осадконакопления Аян-Юряхского осадочного бассейна в поздней перми – начале триаса (Северо-Восток России). Материалы IX Всероссийского литологического совещания (с международным участием). Казань. 2019. С. 72-73.

5. **Фролов В.Т.** Литология. М.: Изд-во МГУ,1993. 432 с.

6. **Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** Основы литохимии. СПб: Наука, 2000. 479 с.

ОЦЕНКА РОЛИ ВУЛКАНОГЕННОГО МАТЕРИАЛА В ФОРМИРОВАНИИ УГЛЕНОСНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ МЕЛОВОГО ВОЗРАСТА ЗАБАЙКАЛЬСКОГО КРАЯ

А.В. Вергунов

Тюменский государственный университет, г. Тюмень, e-mail: alexeivergunov@rambler.ru

Аннотация. В углях Харанорского месторождения изучен тонштейн мелового возраста, сформированный из вулканического пепла. Целью работы было определение роли вулканогенного материала в формировании угленосных отложений. Методы исследования включали минералогический (оптическая и электронная микроскопия, рентгенография), геохимический (ICP-MS, INAA) и палинофациальный анализы. Показано, что тонштейн состоит в основном из каолинита, кварца и КПШ, с примесью циркона и ильменита. Геохимически он характеризуется обогащением Ga, Nb, Hf, Ta, Th и U. Выявлена повышенная концентрация этих элементов в угле, прилегающем к тонштейну, что свидетельствует о миграции элементов из вулканического пепла. Сделан вывод, что вулканический пепел оказал влияние на условия формирования угленосных отложений, в частности, на геохимический состав угля и структуру растительности. Полученные данные могут быть использованы для дальнейших исследований вулканизма и формирования угольных месторождений.

ASSESSMENT OF THE ROLE OF VOLCANOGENIC MATERIAL IN THE FORMATION OF COAL-BEARING DEPOSITS OF THE CRETACEOUS AGE OF THE TRANSBAIKAL TERRITORY

A.V. Vergunov

University of Tyumen, Tyumen, e-mail: alexeivergunov@rambler.ru

Abstract. A Cretaceous-age tonstein formed from volcanic ash has been studied in the coals of the Kharanor deposit. The aim of the work was to determine the role of volcanogenic material in the formation of coal-bearing deposits. The research methods included mineralogical (optical and electron microscopy, X-ray diffraction), geochemical (ICP-MS, INAA), and palynofacies analyses. It was shown that the tonstein consists mainly of kaolinite, quartz, and K-feldspar, with an admixture of zircon and ilmenite. Geochemically, it is characterized by enrichment in Ga, Nb, Hf, Ta, Th, and U. An increased concentration of these elements was found in the coal adjacent to the tonstein, indicating the migration of elements from the volcanic ash. It was concluded that volcanic ash influenced the formation conditions of coal-bearing deposits, in particular, the geochemical composition of

the coal and the structure of the vegetation. The obtained data can be used for further research on volcanism and the formation of coal deposits.

В углях различных регионов мира, в отложениях от палеозойского до кайнозойского возраста, часто отмечаются признаки присутствия вулканогенного материала, встречающегося преимущественно в виде тонких глинистых прослоев, известных как тонштейны. Приуроченность площадей угленакопления к тектонически активным областям связана с формированием благоприятных условий формирования и захоронения органического вещества, низкоэнергетической средой осаждения в торфяниках и быстрым накоплением перекрывающих осадков, создающим благоприятные условия для сохранения вулканического пепла. Изучение этих глинистых горизонтов и вмещающих углей позволяет оценить влияние вулканогенного материала на формирование минеральных и геохимических характеристик угленосных отложений, особенно в условиях относительно редких находок мезозойских тонштейнов, делающих Харанорское месторождение бурых углей уникальным объектом для исследований.

Комплексные исследования влияния вулканизма на процессы углеобразования, включая изменение экологических условий, состава растительности, а также минерального и химического состава угля, органического вещества, немногочисленны. Данное исследование направлено на комплексное изучение измененного вулканического пепла в меловых углях Харанорского месторождения Забайкальского края.

Тургино-Харанорская впадина, сформированная в процессе рифтогенеза, заполнена юрскими и меловыми отложениями, представленными континентальными туфогенно-осадочными образованиями. В пределах впадины расположено Харанорское буроугольное месторождение. Оно является крупнейшим в Забайкальском крае. Продуктивные отложения месторождения представлены кутинской свитой [1]. Основным объектом исследования является угольный пласт Новый-1а.

В отложениях Харанорского месторождения, и, в частности, в нижней части угольного пласта Новый-1а выявлен маломощный глинистый прослой (8-10 см). На основе полевых наблюдений, а также структурно-текстурных, минералогических (оптическая микроскопия, сканирующая электронная микроскопия, рентгеновская дифрактометрия) и геохимических (ICP-MS, ICP-AES, ИНАА) данных установлено его вулканогенное происхождение, классифицирующее данный прослой как тонштейн. Для оценки влияния вулканического пепла на растительность проведены палинологический и палинофациальный анализы.

Тонштейн характеризуется светлым цветом, кремнеподобным изломом и отсутствием выраженной слоистости. Минеральный состав представлен преимущественно каолинитом (до 77.5%), кварцем (до 15%) и

калиевым полевым шпатом (КПШ). Акцессорные минералы представлены цирконом, ильменитом, монацитом-(Ce) и ксенотимом-(Y). Геохимический состав характеризуется высокими концентрациями Ga (41 г/т), Nb (46.4 г/т), H (10.3 г/т), Ta (9.2 г/т), Hg, Th (13.5 г/т) и U (7.82 г/т) [2].

При изучении химического состава вмещающего угля выявлены аномальные концентрации редких элементов (РЗЭ, Y, Zr, Hf, Nb, Ta, Th и U) в зонах, прилегающих к тонштейну, что указывает на взаимодействие вулканогенного материала с органическим веществом угля. Наибольшее обогащение наблюдается в пределах нескольких сантиметров от контакта.

На основе геохимических данных восстановлен исходный состав вулканического пепла, сформировавшего тонштейн, как трахидацитовый. Схожесть геохимических характеристик тонштейна с измененными вулканическими пеплами из Кузбасса и Минусинского бассейна, а также отрицательная Eu-аномалия свидетельствует об его кислом и щелочном характере.

Опираясь на результаты палинологического и палинофациального анализов угленосных отложений Харанорского месторождения, установлено, что вулканический пепел, выпавший в альбе, кратковременно нарушил существовавшую болотную экосистему, приводя к захоронению нижних слоев растительности, однако не вызвал долговременных изменений в видовом составе флоры или условиях седиментации, что указывает на устойчивость местной растительности к подобным событиям.

Выводы

Комплексное изучение тонштейна в углях Харанорского месторождения позволило установить влияние вулканического пепла на геохимию углей и растительный покров палеоэкосистемы, продемонстрировав эффективность интеграции минералогических, геохимических и палинологических методов для изучения угленосных отложений. Мощность тонштейна позволяет оценить первоначальную толщину выпавшего вулканического пепла на поверхность палеоболота в 40-50 см. Вулканический пепел, имевший трахидацитовый состав, оказал значительное влияние на геохимию угля и условия осадконакопления в период формирования угленосных отложений Харанорского месторождения. В частности, он послужил источником редких элементов для вмещающих углей, обогатив их Nb, Ta, Hf, REE, Y, Th и U.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-27-00314, https://rscf.ru/project/24-27-00314/.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Угольная база России.** Т. IV. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири (Тунгусский и Таймырский бассейн, месторождения Забайкалья). М.: ЗАО «Геоинформарк», 2001. 493 с.

2. **Vergunov A., Arbuzov S., Kholodov A., Novoselov A., Deeva E., Shadrina S., Kenesbayev B.** Chemical and mineral composition of altered volcanic ash in the Early Cretaceous coals of the Kharanorskoe deposit, Eastern Siberia, Russia // Acta Geochimica. 2025. V. 20. P. 1199. https://doi.org/10.1007/s11631-025-00767-w

ЛИТОХИМИЯ СРЕДНЕПАЛЕОЗОЙСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ЗАПАДНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ

Н.А. Доронина

Геологический институт СО РАН, г. Улан-Удэ,
e-mail: dna48@mail.ru

Аннотация. В составе асынской и ципиканской свит присутствуют литотипы двух источников терригенного материала: пассивных континентальных окраин и континентальных островных дуг / активных континентальных окраин. Метаосадки двух свит образуют ряд от силитов до гидролизатов (от кварцевых песчаников до глинистых пород, испытавших влияние процессов гидролиза). Вероятным источником материала служили магматические породы (интрузивные и вулканиты) кислого состава, резко подчиненно андезибазальты, а также силиты second-cycles. Осадконакопление происходило в окислительно-восстановительных условиях пресноводных континентальных бассейнов.

LITHOCHEMISTRY OF MIDDLE PALEOZOIC TERRIGENOUS DEPOSITS OF WESTERN TRANSBAIKALIA

N.A. Doronina

Geological Institute SB RAS, Ulan-Ude, e-mail: dna48@mail.ru

Abstract. The Asynskaya and Tsipicanskaya suites contain lithotypes of two sources of terrigenous material: passive continental margins and continental island arcs/active continental margins. The metasediments of the two suites form a series from silites to hydrolysates (from quartz sandstones to clayey rocks that have experienced the influence of hydrolysis processes). The probable source of the material was igneous rocks (intrusive and volcanic rocks) of acidic composition, sharply subordinated to basaltic andesites, as well as second-cycle silites. Sedimentation occurred under oxidation-reduction conditions.

Западное Забайкалье, входящее в состав Центрально-Азиатского складчатого пояса, рассматривается как комбинация докембрийских микроконтинентов и разновозрастных структурно-формационных зон, которая сформировалась в палеозое на месте Палеоазиатского океана. Основные коллизионные события происходили в каледонское и герцинское время [5], основные магматические — в позднекаменноугольное — раннепермское время: гранитоиды Ангаро-Витимского батолита — 305-285 млн лет (C_3-P_1) [6] и практически синхронный основной вулканизм толеитовый и высокомагнезиальный 296-277 млн лет (P_1) [1]. Механизм формирования магматических комплексов дискутируется. Один из возможных

вариантов — плюмовая тектоника и связанный с нею континентальный рифтогенез. Об обстановках, предшествовавших палеозойскому магматизму, могут свидетельствовать литохимические характеристики терригенных отложений, сохранившихся в останцах, «ксенолитах» в поле гранитоидов. Уровень преобразований ксенолитов варьирует от катагенеза до эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма.

В центральной части Западного Забайкалья выделена общирная зона палеозоид — Байкало-Витимская складчатая система (БВСС). В состав БВСС входят Турка-Курбинская, Витимкан-Ципинская, Удино-Витимская структурно-формационные зоны. В каждой из них присутствуют среднепалеозойские отложения, охарактеризованные комплексом органических остатков. Объектом изучения стали асынская свита Ямбуйского ксенолита Туркинской подзоны и ципиканская свита Икатской подзоны, включенные в состав гаргинской серии. Основанием для объединения послужили одинаковый набор пород и близкий уровень метаморфизма. В состав обеих свит входят сланцы, тонкозернистые кварц-биотит-плагиоклазовые (±андалузит, ставролит, гранат), кварцевые метапесчаники, пачки мраморов. Петрографически слюдистые сланцы соответствуют петрокластическим грауваккам. Химический состав, природа и условия формирования отложений не изучались. Эту задачу предстоит решить литохимическими методами.

Асынская свита мощностью до 3000 м, образующая восточную часть Ямбуйского ксенолита, закартирована в верховьях р. Турка. Возраст свиты — пограничный между девонским и каменноугольным периодами (малёвский горизонт нижнего турне) ~ 359 млн лет. Гранулометрия пород асынской свиты по классификации А.Н. Неелова (1980) варьирует от псаммитолитов до пелитов, образуя две группы: песчаники кварцевые моно- и олигомиктовые некарбонатные (4 пробы) и ряд от алевролитов до аргиллитов пелитовых полимиктовых и грауваккковых (37 проб). Породы обеих групп слабожелезистые, слабокарбонатные (C ≤ 10%), 5 проб карбонатистых. В дальнейшем породы со значениями a<0.3 (псаммитолиты и алевролиты) отнесены к псаммитам, a>0.3 (алевропелиты и пелиты) – к пелитам. Глиноземистые минералы (андалузит, ставролит, гранат) присутствуют в обеих группах пород и во всех гранулометрических разностях.

Модульные диаграммы подтверждают разделение пород на две группы: гипер-нормосилиты (кварцевые метапесчаники) и непрерывный ряд от миосилитов (алевролитов) до псевдосуперсиаллитов (глин, переходных от сиаллитов к гидролизатам) и собственно псевдогипогидролизатов [2]. Почти половина проб относится к псевдоосадочным (MgO>3%), исходным материалом которых послужили магматические породы. «Нормальные» алевролиты содержат значительную примесь полевошпатовой пирокластики (НКМ>0.4). Значения калиевого модуля (КМ)>0.28, свидетельствующие о присутствии калишпатов, обнаружены в 3-х пробах. Псевдогипогидролизат

2502/2 с алкалитовым значением Na_2O+K_2O=9.43% может оказаться метасоматически переработанным щелочным туфом основного состава. Положительная корреляция титанового модуля с железным, фемическим и гидролизатным обусловлена присутствием породообразующего биотита и свидетельствует о петрогенной природе большинства пород асынской свиты [7], а именно туфогенной кислого состава. Признаком туфогенной природы, кроме позитивной корреляции ЖМ-ТМ и негативной ФМ-НКМ, служит витрокластическая и литокристаллокластическая структура в некоторых шлифах. Щелочной модуль (Na_2O/K_2O)>1, характерный для базальтовой и андезибазальтовой пирокластики, наблюдается в трех пробах. Кварцевые песчаники с низкими значениями ГМ, по-видимому, литогенные, характеризуются отрицательной корреляцией ТМ-ГМ, положительными ГМ-НКМ, ГМ-(Na_2O+K_2O). По классификации М.М. Хиррона (1988), пелиты отвечают глинистым сланцам, псаммиты располагаются в полях Fe-сланцев глинистых, вакк, аркозов, а кварцевые песчаники — в полях литаренитов, сублитаренитов, субаркозов.

Ципиканская свита мощностью до 4000 м закартирована в бассейне р. Ципикан. Возраст отложений — франский ярус верхнего девона (385-375 млн лет). В обломочной фракции слюдистых сланцев присутствуют окатанные обломки (d до 2 мм) кварца, плагиоклаза (№ 50.7 – 47.3) и кварц-плагиоклазовых пород. Присутствуют рассланцованные риодациты с бластопорфировой и диабазы с бластоофитовой структурой. Терригенные породы, в основном, некарбонатные, 4 пробы карбонатистые. Метаморфизм неоднородный: в северо-западной части от оз. Баунт до широты руч. Поворотного хлорит-серицитовая субфация зеленосланцевой фации, породы сохранили облик метапесчаника, метаалевролита, южнее до русла р. Талой — эпидот-амфиболитовая фация (сланцы кварц-биотит-плагиоклазовые ± гранат, ставролит, андалузит). Причина перепада в уровне метаморфизма — возможный левый сдвиго-сброс северного блока относительно южного. Текстура пород сланцеватая, бластомилонитовая, структура — псаммитовая, лепидо-порфиро-пойкилобластовая. На модульных диаграммах осадки образуют последовательность от суперсилита до псевдогипогидролизата, всего 61 проба. Породы ципиканской свиты петрогенные. Во всех кластерах присутствует полевошпатовая и основная кластика, редко калишпат (в 4 пробах). По классификации М.М. Хиррона (1988), пелиты отвечают глинистым сланцам, псаммиты – ваккам и литаренитам.

Глинистые породы обеих свит на диаграмме НКМ-ФМ в основном принадлежат полям V и VI и области перекрытия с полем II. В поле V попадают обычные глины: «стандартная трехкомпонентная смесь хлорит + монтмориллонит + гидрослюда», в поле VI — гидрослюдистые с примесью дисперсных частиц полевых шпатов, характерные для аридных кор выветривания. В поле II доминирует монтмориллонит.

Возможность шлихования: корреляция содержаний циркония и окиси титана в породах обеих свит положительная, но закономерность Мигдисова не наблюдается, следовательно, динамической сортировки осадка не происходило. Источниками обломочного материала служили магматические породы кислого состава: гранодиориты, граниты, редко андезибазальты, небольшое количество рециклированных пород. Сохранность плагиоклазовой кластики и единичные образцы гидролизатов свидетельствуют о слабом выветривании пород в областях размыва. Большая часть значений CIA [Nesbit, Young, 1989] в пелитах асынской свиты 60-70 (среднее 66), в ципиканской 55-65 (среднее 61) позволяет предполагать умеренный — субтропический климат [4].

Тектонические обстановки. Природа бассейнов осадконакопления может быть расшифрована на основе интерпретации элементного состава **песчаников** и с учетом содержаний REE. Нормированное к хондриту распределение REE в обеих свитах субпараллельно трендам континентальной коры и PAAS с четким Eu-минимумом: $(La/Yb)_N$=5-11 Eu/Eu*=0.52-0.76. На кривых кварцевых песчаников кроме Eu-минимума наблюдается цериевый максимум. В изучаемых породах LREE в 3 раза превышают их уровень в граувакках зон субдукции. С помощью дискриминирующих параметров Бхатиа (1983) TiO_2%, Al_2O_3/SiO_2, (Fe_2O_3T+ MgO) %, K_2O/Na_2O и $Al_2O_3/(CaO + Na_2O$ (табл. 1) кварцевые песчаники можно отнести к образованиям пассивной континентальной окраины, а незрелые полимиктовые псаммиты асынской и ципиканской свит - к образованиям континентальной островной дуги или активной континентальной окраины. На диаграммах Мейнарда (1982), Розера, Корша (1986) эти породы располагаются, главным образом, в полях активной континентальной окраины. Анализ значений индикаторных отношений показал, что накопление глинистых осадков обеих свит происходило в окислительных условиях [3] пресноводных континентальных бассейнов без подводной гидротермальной деятельности.

Таблица 1. Отношения элементов (средние значения) в эталонных осадочных бассейнах по Бхатиа (1983) и песчаниках асынской и ципиканской свит.

Table 1. Elemental ratios (average values) in reference sedimentary basins according to Bhatia (1983) and sandstones of the Asynskaya and Tsipicanskaya suites

Тектоническая обстановка в области источника материала	TiO_2, %	Al_2O_3/SiO_2	Fe2O3T+ MgO	K_2O/Na_2O	$Al_2O_3/(CaO+Na_2O)$
Океаническая островная дуга	0.8-1.4	0.24-0.33	8-14	0.2-0.4	1.4-2.4
Континентальная островная дуга	0.5-0.7	0.15-0.22	5-8	0.4-0.8	1.6-2.8
Активная континентальная окраина	0.25-0.45	0.1-0.2	2-5	0.6-1	1.7-3.5
Пассивная континентальная окраина	0.2-0.5	0.06-0.13	0.05-3.5	1.2- > 2	2.9 -> 6
Асынская, кварцевые песчаники	**0.30**	**0.19**	**2.13**	**5.7**	**6.42**
Асынская, Fe-сланцы, вакки, аркозы	**0.72**	**0.22**	**8.16**	**1.4**	**3.6**
Ципиканская, вакки и литарениты	**0.47**	**0.19**	**6.89**	**1.75**	**3.49**

ЛИТЕРАТУРА

1. **Доронина Н.А., Игнатов А.М., Падерин И.П. и др.** Возраст коматиитового магматизма в Западном Забайкалье // Геодинамика и минерагения Северной Евразии. Материалы VI Международной научной конференции. Улан-Удэ. 2023. С. 211-214.

2. **Ершов В.В., Перстнева Ю.А.** Литохимическая характеристика сопочной брекчии грязевых вулканов мира // Отечественная геология. 2018. № 4. С. 72-83.

3. **Маслов А.В.** Литогеохимия терригенных пород верхнего докембрия Волго-Уральской области. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2012. 248 с.

4. **Маслов А.В., Подковыров В.Н.** Индексы химического выветривания и их использование для палеоклиматических реконструкций (на примере разреза венда-нижнего кембрия Подольского Приднестровья) // Литология и полезные ископаемые. 2023. № 3. С. 249-273.

5. **Руженцев С.В., Минина О.Р., Некрасов Г.Е. и др.** Байкало-Витимская складчатая система: строение и геодинамическая эволюция // Геотектоника. 2012. № 2. С. 3-28.

6. **Цыганков А.А., Литвиновский Б.А., Джань Б.М. и др.** Последовательность магматических событий на позднепалозойском этапе магматизма Забайкалья (результаты U-Pb изотопного датирования) // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 9. С. 1249-1276.

7. **Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** Основы литохимии. СПб: Наука, 2000. 479 с.

ВОЗМОЖНЫЕ КОРЕННЫЕ ИСТОЧНИКИ РОССЫПНОГО САМОРОДНОГО ЗОЛОТА ЭВОТИНСКОГО РУДНО-РОССЫПНОГО РАЙОНА (АЛДАНО-СТАНОВОЙ ЩИТ).

А.И. Журавлев, А.В. Округин, Б.Б. Герасимов, Е.Е. Лоскутов, А.И. Иванов

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

Аннотация. Эвотинский рудно-россыпной район (ЭРР) относится к территории, перспективной на обнаружение различных типов золотоносных объектов. В результате проведенных исследований установлено, что коренными источниками россыпного золота ЭРР могли являться проявления золото-кварц-сульфидного типа, схожие с распространенными на месторождении им. П. Пинигина, золото-серебряными, золото-сульфидными и, возможно, иными рудами. Выявление в россыпях слабо окатанного золота, повышает потенциал территории на обнаружение новых рудных объектов.

POSSIBLE PRIMARY SOURCES OF PLACER NATIVE GOLD IN THE EVOTINSKII ORE-PLACER REGION (ALDAN-STANOVOY SHIELD).

A.I. Zhuravlev, A.V. Okrugin, B.B. Gerasimov, E.E. Loskutov, A.I. Ivanov

Diamond and precious metals geology institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

Abstract. The Evotinskii ore-placer region (EOR) is a territory promising for the discovery of various types of gold mineralization. As a result of the performed studies, it is assumed that the primary sources of placer gold in the EOR could be gold-sulfide-quartz mineralizations similar to those that studied at the P. Pinigin deposit, gold-silver mineralizations, gold-sulfide mineralizations and possibly others ores. The detection weakly rounded gold particles in placers increases the potential of the territory for the discovery of new ore objects.

Алдано-Становой щит (АСЩ) характеризуется блоковым строением с древними ядрами, зеленокаменными поясами и долгоживущими межблоковыми структурными швами с повышенной флюидно-магматической проницаемостью. В его пределах выделяются несколько рудных районов, содержащих большое количество как коренных, так и россыпных месторождений золота. Несмотря на длительную историю изучения территории, для многих россыпей не установлены коренные источники. В связи с этим актуальным становится сравнительное исследование типоморфизма самородного золота известных

объектов Сибирской платформы [4]. ЭРР является одним из перспективных рудно-россыпных районов АСЩ на выявление промышленно-значимого золотого оруденения различных геолого-промышленных типов [3]. В данном сообщении проведено обобщение полученной ранее информации по минералого-геохимическим особенностям россыпного самородного золота ЭРР [1] и рассмотрены возможные рудно-формационные типы его коренных источников.

Известно, что наряду с хорошо изученными месторождениями Центрально-Алданского рудного района (ЦАРР), связанными с мезозойской активизацией, в пределах АСЩ широко развиты проявления, приуроченные к зеленокаменным поясам, конгломератам плитного и грабенного комплекса протерозоя [6]. Например, месторождение им. П. Пинигина, приуроченное к палеопротерозойским метабазитам медведевского комплекса [2]. Исследования самородного золота месторождения показало, что пробность изменяется в диапазоне 908-1000‰, со значительным преобладанием частиц с пробностью более 980‰ (> 75%), отмечается тесная ассоциация с мальдонитом, самородным висмутом, теллуридами и оксидами Bi. Установлено субграфическое строение многих частиц. Некоторые представляют собой отпрепарированные каркасно-ячеистые агрегаты, другие формируют симплектитовые срастания самородного золота и оксидов висмута. Исследование внутренней структуры методом многократного травления раствором на основе царской водки показало монозернистое гомогенное внутреннее строение большинства золотин. Методом LA-ICP-MS установлены повышенные содержания элементов микропримесей в золоте — Cu, Bi. Полученные данные показывают, что золото-кварц-сульфидное оруденение рассмотренного месторождения по своим типоморфным признакам существенно отличается от золота известных типов мезозойских золоторудных месторождений Центрального Алдана [4]. Среди изученных нами объектов также примечателен пункт минерализации, связанный со становлением Медведевского мезозойского многофазового массива. Отмечается присутствие низко- и среднепробного самородного золота (746–865‰) [1]. По данным И.Р. Прокопьева [7], рудные минералы представлены пиритом, халькопиритом, сфалеритом, пирротином и теллуридами (эмпрессит?), а температура формирования минерализации составляла >360-280 °С. Учитывая диапазон вариации пробности, ассоциацию с сульфидами, теллуридами серебра, относительно низкие температуры формирования минерализации, данное оруденение рассматривается нами как золото-серебряное.

По результатам изучения минералого-геохимических особенностей россыпного золота ЭРР нами выделено нескольких разновидностей. Самородное золото первой разновидности имеет размеры от 0.1 до 1.1 мм, преимущественно цементационные формы и различную степень окатанности — от слабой до хорошей. Пробность варьирует от 907 до 1000‰.

По данным LA-ICP-MS анализа, в нем присутствуют повышенные содержания элементов микропримесей — Cu, Bi (здесь и далее подчеркнуты максимальные), умеренные — Pd, Sb, Pt. Обнаружены минеральные включения: кварц, галенит, пироксен, мальдонит, пильзенит, теллуровисмутит, оксиды Bi. Многие зерна золота представлены отпрепарированными каркасно-ячеистыми агрегатами и симплектитовыми срастаниями самородного золота и оксидов висмута. Структурное травление показало монозернистое гомогенное внутренне строение большинства золотин. В единичных частицах определены структуры двойникования. По комплексу минералого-геохимических особенностей данное золото близко изученному на месторождении им. П.Пинигина.

Золото второй разновидности характеризуется размерами от 0.1 до 1 мм и, главным образом, цементационными и дендритными формами. Окатанность зерен в основном средняя и хорошая. По данным микрозондового анализа пробность изменяется от 619 до 852‰. LA-ICP-MS анализом выявлены повышенные содержания элементов микропримесей — Zn, Sn, Sb, Te, но минимальные — Cu. В качестве минеральных включений установлены: кварц, пирит, гессит, кюстелит. Характерные внутренние структуры золотин неясно-, много- и концентрически-зональные, разнофазные, грануляции. Большинство знаков имеют высокопробные оболочки, нередко мощные. Предполагается связь данного золота с золото-серебряными оруденениями, схожими с рассмотренными в пределах массива Медведевский.

Самородное золото, отнесенное к третьей разновидности, представлено зернами размером 0.1 до 1.8 мм с цементационными и трещинными формами. Степень окатанности различная, от слабой до хорошей. Частицы имеют пробность от 709 до 903‰. По данным LA-ICP-MS анализа, в них фиксируются микропримеси Zn и Sb, но в концентрациях ниже, чем в золоте второй разновидности. Содержание Cu в золоте несколько выше. Для золотин характерна ассоциация с пиритом, кварцем. Определены внутренние структуры — неясно-, концентрически-зональные, зернистые, двойникования (в т.ч. полисинтетического). Широко распространены высокопробные оболочки. Возможно, повышенные содержания Zn, Sb, наряду с тесной ассоциацией с сульфидами, указывают на генетическую связь с золото-сульфидным оруденением мезозойского возраста, схожим с распространенным в ЦАРР.

Частицы, сгруппированные в четвертую разновидность, характеризуются размерами от 0.1 до 1.2 мм, высокой пробностью (899-1000‰) и цементационными, трещинными формами. В зернах установлены элементы микропримеси — Cu, Pd, Pt, Bi, определенные методом LA-ICP-MS. Кварц, галенит и пирит отмечены в качестве минералов включений. В сравнении с золотом первой разновидности фиксируется существенно повышенное содержание Pd, отсутствие Sb, значительно более низкое содержание Bi при сопоставимых содержаниях Cu и Pt. Травление позволило выявить неяснозональные, зернистые и двойникованые внутренние структуры в

неяснозональные, зернистые и двойникованые внутренние структуры в единичных частицах. Золото с подобными минералого-геохимическими особенностями было нами изучено в верховьях р. Мал. Нимныр. Проводимые в этом районе поисковые работы под руководством Е.А. Кардаша (2008 г.) обнаружили присутствие золота в зоне катаклаза, окварцевания и пиритизации плагиогранитов и диопсид-плагиоклазовых сланцев, расположенных вблизи железорудного месторождения. По мнению авторов отчета, генезис проявления отличается от руд месторождения им. П. Пинигина. Предполагается, что данные зоны являлись источниками россыпного золота верховьев р. Мал. Нимныр. Однако подтверждение этой гипотезы требует дополнительных исследований.

Ареал субщелочных и щелочных магматитов мезозойского возраста, располагающихся вдоль северной границы Алданского щита, рассматривается Л.М. Парфеновым с соавторами [5] в составе Южно-Алданской системы впадин, которые представляют собой тыловой прогиб активной континентальной окраины, связанный с субдукцией в обрамлении Монголо-Охотского пояса. Проникновение из разных уровней длительно развивающейся субдукционной зоны рудно-магматических систем к поверхности, очевидно, будет происходить в различных геологических обстановках. Это приведет к образованию разных типов руд, от золото-медно-порфировых до золото-серебряных и других, которые могли являться источниками россыпного золота. Помимо этого, очевиден вклад оруденения, сформированного в докембрийскую эпоху, рассмотренного нами на месторождении им. П. Пинигина и, возможно, иных, не установленных или слабо изученных на текущий момент руд.

Проведенные исследования показали, что возможными коренными источниками россыпного золота ЭРР могли являться проявления золото-кварц-сульфидного типа, схожие с распространенными на месторождении им. П. Пинигина, золото-серебряными, золото-сульфидными и, возможно, иными рудами. Выявление в россыпях слабо окатанного золота, повышает потенциал территории на обнаружение новых рудных объектов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Журавлев А.И., Округин А.В., Герасимов Б.Б. и др.** Самородное золото россыпей Эвотинского района (Алдано-Становой щит): минералого-геохимические особенности и потенциальные коренные источники // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2024. Т 29. № 4. С. 511–526.

2. **Кравченко А.А., Смелов А.П., Березкин В.И., Попов Н.В.** Геология и генезис докембрийских золотоносных метабазитов центральной части Алдано-Станового щита (на примере месторождения им. П. Пинигина). Якутск: РИЦ Офсет, 2010. 148 с.

3. **Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В. и др.** Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции // Региональная геология и металлогения. 2017. № 71. С. 93–111

4. **Округин А.В., Журавлев А.И., Мохначевский Г.В.** Минералого-геохимические и морфологические особенности россыпного золота юго-восточной части Сибирской платформы // Отечественная геология. 2013. № 5. С. 19-27

5. **Парфенов Л.М., Попеко Л.И., Томуртого О.** Проблемы тектоники Монголо-Охотского орогенного пояса // Тихоокеанская геология. 1999. № 5. С. 24-43.

6. **Попов Н.В., Шапорина М.Н., Амузинский В.А. и др.** Металлогения золота Алданской провинции // Геология и геофизика. 1999. Т. 40. № 5. С. 716-728.

7. **Прокопьев И.Р., Дорошкевич А.Г., Пономарчук А.В. и др.** Золоторудная минерализация Джелтулинского, Амгинского и Медведевского мезозойских щелочных массивов Алданского щита (Якутия): обзор данных по включениям в минералах. Кызыл. ТувИКОПР СО РАН, 2024. С. 71–77

ПРЕДПОЛАГАЕМЫЕ ПРИЧИНЫ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ СИНХРОННОСТИ СОБЫТИЙ МАССОВОГО ВЫМИРАНИЯ НАЗЕМНЫХ И МОРСКИХ БИОТ В КОНЦЕ ПЕРМИ

Ю.Д. Захаров[1], А.И. Ханчук[1], С.В. Высоцкий[1], Т.А. Веливецкая[1], А.С. Бяков[2], Р.В. Кутыгин[3], А.М. Попов[1], А.В. Игнатьев[1], И.В. Брынько[2], И.Л. Ведерников[2]

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, yurizakh@mail.ru

[2]Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан

[3]Институт геологии алмаза и драгоценных металлов СО РАН, г. Якутск

Аннотация. В аутигенных сульфидах пограничных слоев перми и триаса относительно высоких палеоширот Северного полушария (Верхоянье) впервые обнаружены S-изотопные ($\delta^{34}S$, $\Delta^{33}S$) аномалии. Это указывает на присутствие здесь признаков масс-независимого фракционирования изотопов серы (MIF-S), свидетельствующих о формировании аутигенных сульфидов Верхоянья в условиях интенсивного воздействия жесткого ультрафиолетового излучения (UVR), вызванного редукцией озонового экрана. Предполагается, что процесс возрастания UVR в конце перми был глобальным, принимая во внимание тот факт, что S-изотопные аномалии этого времени недавно были обнаружены и в низких палеоширотах надобласти Тетис (Южный Китай). Относительная синхронность событий массового вымирания наземных и морских биот в конце перми связывается, во-первых, с непосредственным воздействием возрастающего UVR на наземную биоту, а также морскую биоту эвфотичкской зоны океанов (наряду с непосредственным влиянием некоторых других факторов, ассоциирующихся с рядом глобальных биогеохимических циклов Земли), и, во-вторых, с развитием аноксии в океанах, как результата значительного воздействия UV-C и UV-B излучения на фитопланктон, основной поставщик кислорода в топосферу и гидросферу.

A PROPOSED SET OF CAUSES FOR THE RELATIVE SYNCHRONITY OF MASS EXTINCTION EVENTS OF TERRESTRIAL AND MARINE BIOTA AT THE END OF THE PERMIAN

Yu.D. Zakharov[1], A.I Khanchuk[1], S.V. Vysotskiy[1], T.A. Velivetskaya[1], A.S. Biakov[2], R.V. Kutygin[3], A.M. Popov[1], A.V. Ignatiev[1], I.V. Brynko[2], I.L. Vedernikov[2]

[1]*Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, yurizakh@mail.ru*

[2]*North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute, FEB RAS, Magadan.*

[3]*Institute of Geology of Diamonds and Precious Metals, SB RAS, Yakutsk.*

Abstract. The first finding of S-isotope ($\delta^{34}S$, $\Delta^{33}S$) anomalys was made in autigenic sulfides from the Permian-Triassic boundary (PTB) beds within relatively high paleolatitudes of the Northern Hemisphere (Verkhoyansk region). This finding is indicative of the occurrence of mass-independent fractionation of sulfur isotopes (MIF-S), suggesting the formation of the aforementioned sulfides under conditions of intense exposure to hard ultraviolet (UV) radiation (UVR) caused by the reduction of the ozone shield. It is proposed that the increase in UVR at the end of the Permian was global, given that the discovery of the S-isotope anomaly in the PTB transition was also recently made in the low paleolatitude area of the Tethys (South China). The relative synchrony of the events of mass extinction of terrestrial and marine biotas at the end of the Permian can be explained, firstly, by the direct impact of increased UVR of terrestrial biota and marine biota of the euphotic zone of the oceans (in addition to the direct influence on them of some other factors associated with changes in a number of global biogeochemical cycles); and secondly, by the development of anoxia in the oceans as a result of the destructive influence of the UV-C and UV-B radiation of phytoplankton, the main supplier of oxygen to the troposphere and hydrosphere.

Целью наших исследований является анализ возможных причин относительной синхронности двух основных биосферных событий позднепермского (познечансинского) времени: 1) массового вымирания наземных и растительных организмов; 2) массового вымирания морских биот. Для решения данной проблемы нами были использованы некоторые палеонтологические и геохимические данные, недавно полученные по пограничным слоям перми и триаса Ю. Верхоянья (Zakharov et al., 2014, 2020, 2021; Бяков и др., 2020; Кутыгин и др., 2023). C- и N-изотопные минимумы, установленные в зоне перехода от перми к триасу Ю. Верхоянья, как и ряда других регионов мира, являются, по-видимому, отражением существенных изменений в углеродном, азотном и в связанных с ними других глобальных биогеохимических циклах Земли, имевших место в позднечансинское время (рис. 1).

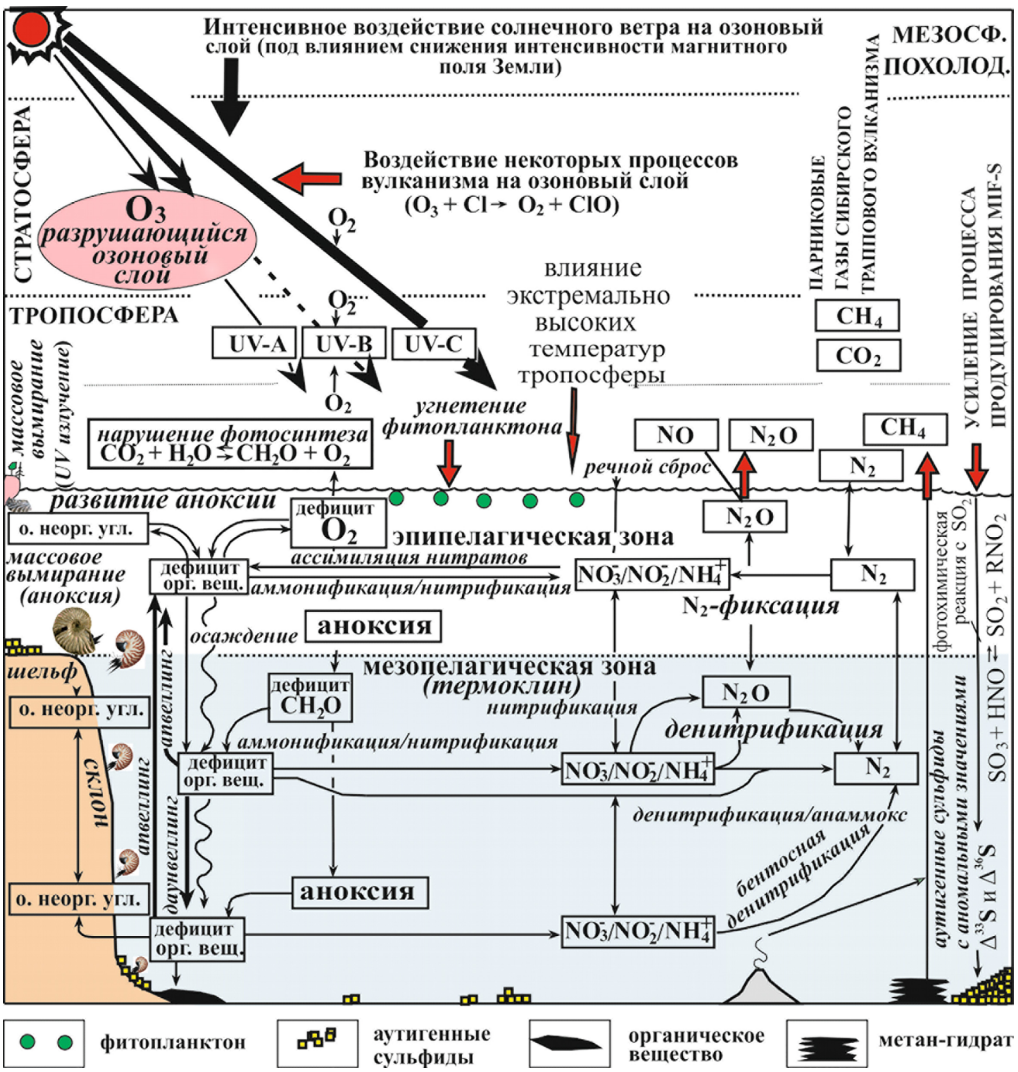


Рисунок. 1. Схематическое изображение некоторых элементов кислородного, азотного и углеродного биогеохимических циклов Земли (Gruber, 2004; Захаров и др., 2021), существенно модифицированное с целью иллюстрации основных позднечансинских событий, связанных с массовым вымиранием наземных и морских биот. Сокращения: о. неорг. угл. – отложение неорганического углерода, орг. вещ. – органическое вещество, MIF-S – масс-независимое фракционирование изотопов серы, мезоф. похолод – мезосферное похолодание.

Figure 1. Schematic representation of some elements of oxygen, nitrogen and carbon biogejchemical cycles of the latest Changhsingian time (Gruber. 2004; Zakharov et al., 2021), significandly modifed to illustrate the major latestChanghsingian events, associated with the mass extinction of terrestial andmarine biotas. Abbreviations: org.mat. – organic matter; inorg.C prec. – inorganic carbon precipitation; mesosph. – mesosphere.

Другим важным достижением в изучении разрезов Ю. Верхоянья является обнаруженияе S-изотопных (^{34}S, $\Delta^{33}S$) аномалий в аутигенных сульфидах из верхней части верхнечансинской зоны *Otoceras concavum* разреза Лев. Суол (см. публ. в этом же томе - Высоцкий и др., 2025). Это указывает на присутствие здесь признаков масс-независимого фракционирования изотопов серы (MIF-S), свидетельствующих о формировании аутигенных сульфидов Верхоянья в условиях интенсивного воздействия UV-C и UV-D излучения, вызванного редукцией озонового экрана. В связи с этим открытием особый интерес приобретает гипотеза Фишера с соавторами [3], согласно которой

в большом ряду факторов среды, ответственных за массовое вымирание, существенное влияние на наземную растительность могло оказывать жесткое UVR. Однако до открытия S-изотопных аномалий позднечансинского возраста в Китае [2] и Верхоянье инструментально полученных данных геохимического плана, подтверждающих гипотезу, не было. Поскольку упомянутые сведения были получены как по низким палеоширотам Тетической надобласти [2], так и по относительно высоким палеоширотам Бореальной надобласти, можно предполагать, что интенсивное жесткое UV-C и R поверхности Земли в конце перми имело глобальные масштабы (рис. 1). Усиление жесткого UV-B облучения поверхности Земли в конце перми, естественно, могло оказывать прямое влияние только на наземную биоту и морские организмы, обитавшие в эвфотической зоне океанов. Однако губительное воздействие UVR на фитопланктон, основной продуцент кислорода на Земле, наряду с некоторым влиянием кислотных дождей, приводило, по-видимому, к относительно синхронному развитию другого события: аноксии топосферы и гидросферы. Интенсивное UV-C и UV-B облучение поверхности Земли в конце перми имело глобальные масштабы. Усиление жесткого UV облучения поверхности Земли и быстрое развитие аноксии в океанах, преимущественно в результате уничтожения фитопланктона, представляются основными факторами, приводящими к относительной синхронности событий массового вымирания наземных и морских биот в конце перми. Причина существенного разрушения озонового слоя в конце перми не вполне ясна [3, 1]. Опубликованные данные, свидетельствующие о низкой напряженности геомагнитного поля на рубеже перми и триаса (Щербакова и др., 2005; Елисеев и др., 2022), позволяют предполагать, что это событие могло быть связано не только с вулканической активностью в Сибирской трапповой провинции [2], но и, в большей степени, со снижением напряженности магнитного поля Земли. Последнее создает условия для ограничения отклонений солнечного ветра и тем самым усиления разрушительного воздействия его заряженных частиц на озоновый экран. Морская биота Бореальной надобласти, в отличие от наземной растительности бореальных районов (Hermannet et al., 2010), по-видимому, не подвергалась массовому вымиранию в конце перми. Ряд групп морских организмов Бореальной надобласти имел возможность преодолеть рубеж перми и триаса на родовом и даже видовом уровнях. К числу первых могут быть отнесены аммоноидеи *Otoceras* и *Episageceras* (Захаров и др., 2020) и, вероятно, брахиоподы *Piarorhynchia* и *Rimirhynchopsis* (опред. А.С. Дагиса и А.М. Попова), к числу вторых — некоторые виды двустворок и фораминифер (Бяков и др., 2018). Предполагается, что во время массового вымирания во многих регионах в конце перми бореальные бассейны играли роль своеобразного рефугиума, обеспечивавшего выживаемость ряда групп морских организмов. Его возникновению могли способствовать следующие события: 1) замедление развития аноксии в бореальных басейнах (в связи с

возможным замедлением разрушения озонового экрана в районе высоких палеоширот Северного полушария), 2) развиие в них благоприятных для обитания температурных условий (Zakharov et al., 2020), 3) развитие в них апвелинговых систем (Grisby et al., 2015; Захаров и др., 2021), способствующих возобновлению пищевых ресурсов и улучшению кислородного режима.

Работа выполнена по целевому заданию ДВГИ ДВО РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Channell J.E.T., Viglioyyi L.** The role of geomagnetic field intensity in Late Quaternary evolution of humans and and large mammals // Reviws of Geophysics. 2019. V. 57. N 3. P. 709-738.

2. **Li R., Shu- Shen S.Z., Xi X.-P. et al.** Atmospheric ozone destruction and the end-Permian crisis: Evidence from multiple sulfur isotope // Chemical Geology. 2024. V. 647. P. 121936. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.1219363.

3. **Visscher H., Looy V., Colinson e. et al.** Environmental mutagenesis during the end-Permian ecological crisis // Proc. Natl. Acad.Sci. USA. 2004. V. 101. N 35. P. 2952-2956. https://doi.org/10.1073/pnas.0404472101

АУТИГЕННЫЕ МИНЕРАЛЫ ЗОЛОТА В ПОВЕРХНОСТНЫХ ДОННЫХ ОСАДКАХ ЧУКОТСКОГО ШЕЛЬФА И ПРИЛЕГАЮЩЕЙ ЧАСТИ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА

В.В. Иванов[1], М.В. Иванов[2], А.И. Ханчук[1], О.Н. Кеня[1], А.П. Кириенко[1], Л.Г. Колесова[1], А.В. Поселюжная[1]

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: d159327@yandex.ru

[2]Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток

Аннотация. Методом аналитической сканирующей электронной микроскопии охарактеризованы морфологически необычные микрозерна природных Au–Cu–Ag и Au–Hg сплавов из современных донных отложений Чукотского шельфа и прилегающей части Северного Ледовитого океана. Предложена биогеохимическая концепция их минералогенеза.

AUTIGENIC GOLD MINERALS IN SURFACE BOTTOM SEDIMENTS CHUKCHI SHELF AND ADJACENT PART OF THE ARCTIC OCEAN

V.V. Ivanov[1], M.V. Ivanov[2], A.I. Khanchuk[1], O.N. Kenya[1], A.P. Kirienko[1], L.G. Kolesova[1], A.V. Poselyuzhnaya[1]

[1]Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, e-mail: d159327@yandex.ru

[2]V.I. Ilyichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok

Abstract. Morphologically unusual micrograins of natural Au–Cu–Ag and Au–Hg alloys from modern bottom sediments of the Chukchi Shelf and the adjacent part of the Arctic Ocean have been characterized using analytical scanning electron microscopy. A biogeochemical concept of their mineralogenesis has been proposed.

Мелководный, преимущественно с глубинами 50-60 метров, Чукотский шельф имеет в целом выровненный рельеф с системой положительных и отрицательных морфоструктур разного возраста и ранга. С учетом взмучивания донных отложений и переноса взвесей при воздействии морских течений укажем на крупные батиметрические депрессии (желоб Геральд, Центральный канал и каньон Барроу), которые пересекают шельф. Они

заметно влияют на многоструйную циркуляцию поступающих через Берингов пролив тихоокеанских вод, сказываясь на особенностях локальных обстановок литогенеза и региональной экосистеме. Упомянем также реликты сети современных и погребенных плиоцен-четвертичных речных палеодолин, которые сопряжены в плане с речными долинами на суше.

В южной части этого окраинного моря Северного Ледовитого океана (СЛО) ощутим приток минеральной и органической взвеси, которая с запада приносится водными массами Восточно-Сибирского моря по проливу Лонга шириной более 140 км вдоль впадины, имеющей сложную тектоническую историю развития. Она разграничивает современный континентальный шельф и "валькарайский" погребенный палеошельф, в прошлом служивший ареной неоднократных трансгрессий/регрессий моря. Благодаря этому в мощной толще кайнозойских рыхлых отложений Валькарайской низменности сформировались сопряженные аллювиальные и прибрежно-морские полигенные россыпи относительно низкопробного и среднепробного золота с размером зерен до 2-5 мм. Последующие поднятия/опускания южной части Валькарейской впадины обусловили их глубокое захоронение и на суше (лагуна Рыпильхин), и в проливе Лонга на глубинах до 35 м. Вдоль чукотского побережья, края арктических лагун, на бенче и пляже прослеживаются протяженные шлейфы мелкого самородного золота [6].

При вещественном изучении донных осадков в южной части шельфа, особенно в районе "Чукотского грабена", который примечателен локальными геохимическими аномалиями Au, Ag и платиноидов, а также повышенными содержанями в осадках биогенных компонентов ($SiO_{2ам.}$, $C_{орг.}$), с помощью электронно-зондового микроанализатора в псаммит-алевритовой фракции современных осадков впервые были выявлены микрозерна благороднометалльных и других минералов [1, 2, 4].

Нами, с помощью аналитической сканирующей электронной микроскопии, минералы благородных металлов обнаружены на обширной территории, включая российский и американский секторы Чукотского моря, а также примыкающий район высокоширотной Арктики (рис. 1). Задействована оригинальная коллекцию проб поверхностных донных осадков (ПДО), которые были отобраны дночерпателями в ходе российско-американской экспедиции “RUSALCA”(НИС “Профессор Хромов” в 2004 г. [3]) и второй арктической китайской экспедиции “CHINARE-2003” (НИС “Xuelong” [7]).

Морфометрия и анализ состава золотин осуществлены на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ; катод с термополевой эмиссией типа Шоттки) TESCAN LYRA 3 XMH с энергодисперсионным спектрометром (ЭДС) AZtec X-Max 80 Standard для рентгеноспектрального микроанализа. Использовано программное приложение INCAFeature Oxford Instruments, незаменимое для автопоиска нано-микрометровых частиц с заданными характеристиками в полиминеральных порошковых пробах. Проанализированы глубоководные илы и алевритовые фракции из псаммит-алевритовых осадков. Применялось ультразвуковое воздействие и отмывка в дистилляте воды. Перед Pt-напылением (для стока

заряда при съемке) высушенный зерновой материал навесок россыпью закреплялся углеродным скотчем на аналитических столбиках из алюминия диаметром 10 мм.

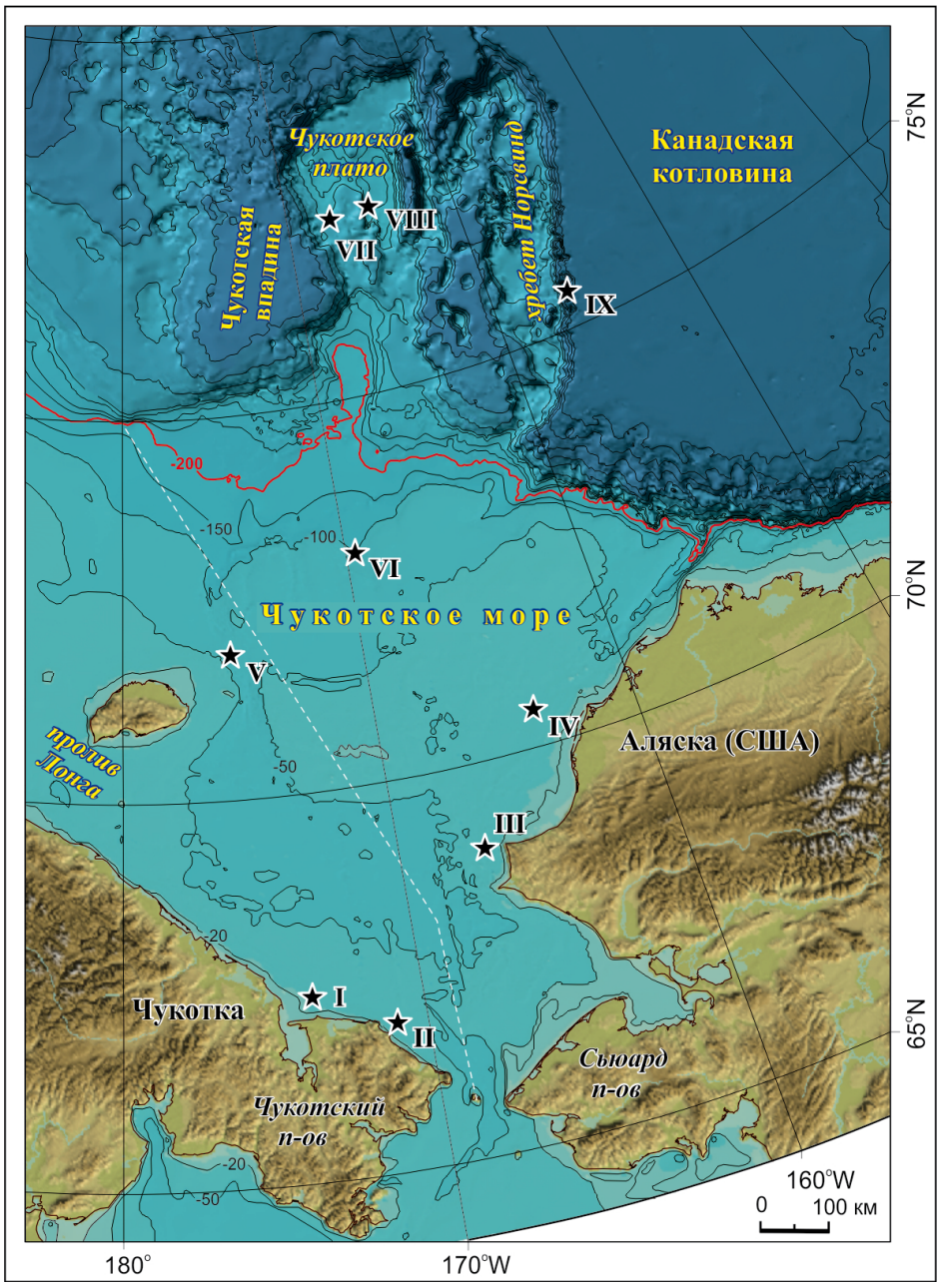


Рисунок 1. Местоположение станций отбора содержащих минералы золота проб поверхностных донных осадков в Чукотском море *(внутренний (I-IV) и центральный (V и VI) шельф)* и Чукотском приграничье – *Чукотское плато (VII, VII) и хребет Норсвинд (IX).*

Figure 1. Location of stations for collecting samples of surface bottom sediments containing gold minerals in the Chukchi Sea (inner (I-IV) and central (V and VI) shelf) and the Chukchi borderland – the Chukchi Plateau (VII, VII) and the Nordwind Ridge (IX).

Зерна минералов золота встречены нами на шести станциях в Чукотском море, а также на трех в Амеразийском суббассейне СЛО (см. рис. 1). По глубинам отбора обсуждаемые ПДО дифференцированы: 1) 43-49 м (станции I-IV – внутренняя зона шельфа Чукотского п-ва и Аляски); 2) 60-67 м (V и VI – центральная зона шельфа, юг желоба Геральд и север возвышенности

группы Геральдовских банок); 3) 320-562 м (VII иVIII – Чукотское плато и его склон в Чукотскую впадину); 4) 3050 м (IX – хребет Норсвинд, склон в Канадскую котловину).

Среди природных золотых сплавов Au–Cu–Ag и Au–Hg систем в осадках установлены зерна серебристого, медистого, ртутистого золота и беспримесного золота размером 0,5-10 до 130 мкм (таблица). Их разновидности различаются по соотношению главных компонентов, а также по содержанию микропримесей. Они присутствуют в различных ассоциациях между собой и с варьирующим набором сопутствующих минералов Ag (в т.ч. с Sb), Hg (с Te), Cu и Zn, Sn и др.

На шельфе доминируют частицы чистого золота и Au–Ag сплавов с разной пробностью, нередко с примесью Cu. Для Чукотского приграничья с выдвинутым в океан шельфовым выступом характерны преимущественно Au–Cu сплавы, в том числе с примесью Ag и Pb. Здесь и на шельфе их дополняют находки теллурида золота. Минералогия золота разнообразнее в осадках внутренней зоны шельфа (глубины 40-50 м) в 30-45 км от берега. На мелководном аляскинском шельфе в ПДО среди аутигенных минералов встречены также пиритовые фрамбоиды.

Таблица. Минералы золота характеризуемых поверхностных донных отложений Арктики.

Table. Gold minerals in the Arctic surface bottom sediments.

Станция (см. рис. 1)	Минерал	Система
Золото		
II, III, IV, V, VIII	*Чистое*	Au
I, II, VIII	*Cu-содержащее*	Au–(Cu)
Серебристое золото (Au–Ag сплав)		
II	Высокопробное	Au–Ag
II, VI	Среднепробное	
Cu-содержащее серебристое золото		
II	Весьма высокопробное	Au–Ag–(Cu)
I	Высокопробное	
I	Среднепробное	
V	Относительно низкопробное	
Медистое золото (Au–Cu сплав)		
IX	*Ag-содержащее*	Au–Cu–(Ag)
VII	*Pb-Ag-содержащее*	Cu–Au–(Ag–Pb)
Ртутистое золото (Au–Hg сплав)		
I	*Cu-содержащее*	Au–Hg–(Cu)

На более детальных, чем у предшественников, электронно-микроскопических BSE изображениях микрозолотин, явственно читается их весьма экзотичная морфология и скульптура поверхности (рис. 2). Золотины оказались без следов механических преобразований (сглаживания, уплощения, истирания, деформации), типичных для кластогенных зерен, перемещаемых с осадками в гидродинамических средах. Напротив, под СЭМ визуализированы морфологически весьма "свежие", несглаженные, золотые микрозерна, подчас с причудливо-занозистыми отростками. Встречены их перисто-щепковидная, пламевидно-лапчатая, уплощенно-трубчатая, дисковидно-конкреционная с радиально-лучистой поверхностью(!), хлопьевидная и гроздьевидная принципиально родственные разновидности. Ниже иллюстрируются отдельные, морфологически аномальные, зерна с новообразованной поверхностью. Некоторые из них специфичны наличием фрагментов углеродсодержащих(!), по-видимому, сохранившихся биогенных пленок (рис. 2 а, б). Из-за наноразмерной толщины они проницаемы для электронного зонда СЭМ при детектировании золотой основы зерен.

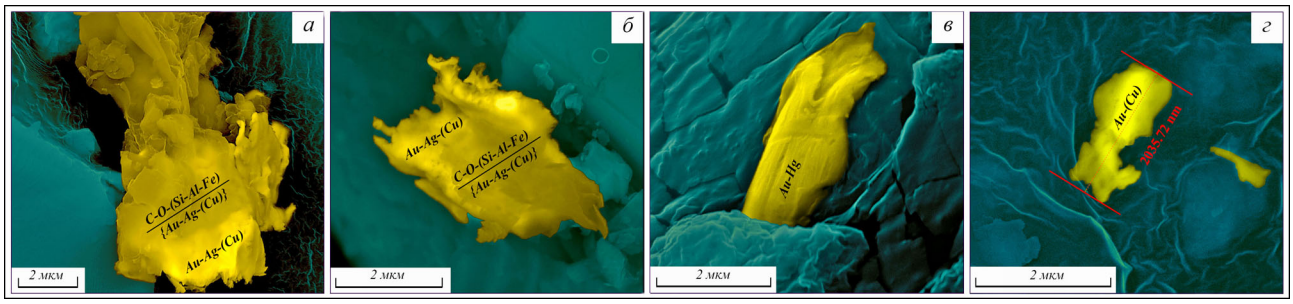


Рисунок 2. Морфология золотин из арктических поверхностных донных осадков.
Станция I – а) пламевидно-лапчатое Au–Ag–(Cu) зерно (желтый цвет), наполовину с С-содержащей пленкой (цвет хаки); б) занозисто-щепковидное Au–Ag–(Cu) зерно (желтое), частично с С-содержащей пленкой (хаки); в) уплощенно-трубчатое Au–Hg зерно. Станция VIII – г) хлопьевидное Cu-содержащее золото. Колорированные BSE-изображения.

Figure 2. Morphology of gold grains from Arctic surface bottom sediments.
Station I – a) flame-shaped-paw-shaped Au–Ag–(Cu) grain (yellow color), half with C-containing film (khaki color); b) splinter-splinter-shaped Au–Ag–(Cu) grain (yellow), partly with C-containing film (khaki); c) flattened-tubular Au–Hg grain. Station VIII – d) flake-shaped Cu-containing gold. Colored BSE images.

Многоплановые данные разнопрофильных специалистов по экологическим взаимоотношениям микроорганизмов с химическими элементами и по био-ассоциированному кристаллогенезу металлических фаз в различных средах, а также свой многолетний опыт по исследованию типоморфизма золота из разнотипных эндо- и экзогенных образований допускают, подобно [3], вывод о микроорганизм-зависимом перераспределении металлов при минерагенезе характеризуемых золотых сплавов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Астахов А.С., Колесов Г.М., Дударев О.В., Иванов М.В., Колесник А.Н.** Благородные металлы в донных осадках Чукотского моря // Геохимия, 2010. № 12. С. 1289-1301.

2. **Астахова Н.В., Колесник О.Н., Астахов А.С., Ши С., Ху Л., Алаторцев А.В.** Благородные металлы в голоценовых отложениях Чукотского моря // Геология и геофизика, Т 65. № 5. 2024. С. 710-726.

3. **Иванов В.В., Ханчук А.И., Михайлик П.Е.** Природа самородного золота в железомарганцевых корках северо-западной части Тихого океана // Докл. АН. 2021. Т. 497. № 1. С. 44-48.

4. **Иванов М.В.** Ртуть в донных осадках Чукотского и примыкающих районов Арктики // Геология и геоэкология континентальных окраин Евразии. Вып. 4. Моря М.: ГЕОС, 2012. С. 81-87.

5. **Колесник А.Н., Колесник О.Н., Карабцов А.А., Бондарчук Н.В.** Минеральные зерна цветных и благородных металлов в поверхностном слое донных осадков Чукотского моря // Докл. АН. 2018. Т. 481. № 1. С. 65-69.

6. **Сухорослов В.Л., Цопанов О.Х.** Фациальные типы и условия формирования прибрежно-морских россыпей // Геология россыпей золота Северо-Востока СССР / отв. редактор О.Х. Цопанов. Магадан; Магаданское книжное издательство, 1979. С. 168-191.

7. **Taoliang Zhang, Rujian Wang, Wenshen Xiao, Leonid Polyak, Astakhov A., Linsen Dong, Chunjuan Wang, Yanguang Liu, Xuefa Shi.** Characteristics of terrigenous components of Amerasian Arctic Ocean surface sediments: Implications for reconstructing provenance and transport modes // Marine Geology, 2021. V. 437. Iss. 11. Art. 106497.

U-PB ВОЗРАСТ ДЕТРИТОВЫХ ЦИРКОНОВ И ЛИТОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД РЕДКОМЕТАЛЛЬНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ СОБОЛИХА (ПРИМОРЬЕ)

В.В. Ивина[1,2], В.В. Ивин[1], И.А. Александров[1], С.Ю. Будницкий[1], Е.И. Медведев[1]

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: vlada.ivina@mail.ru, ivin_vv@mail.ru

[2]Дальневосточный федеральный университет (ДВФУ), г. Владивосток

Аннотация. Для реконструкции условий и выяснения источников сноса пожигинской толщи проведено комплексное изучение терригенных пород, включающее петрографический анализ шлифов, построение геохимических диаграмм, изучение распределения редкоземельных элементов и U-Pb датирование детритовых цирконов из песчаников. Установлено, что песчаники относятся к кварцевым грауваккам с пониженным содержанием кремнезёма, повышенными концентрациями железа и глинозёма, а также преобладанием натрия над калием. Спектры распределения редкоземельных элементов демонстрируют умеренную степень фракционирования с преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми и отсутствием европиевой аномалии. U-Pb датирование детритовых цирконов выявило пермские источники сноса (255, 266, и 296 млн лет), которые соответствуют кислым магматическим породам. Достаточно узкий диапазон возраста детритовых цирконов (около 45 млн лет) допускает возможность их формирования в пределах одной магматической дуги, хотя наиболее древний раннепермский пик может быть связан с другим источником.

U-PB AGE OF DETRITAL ZIRCONS AND LITHOCHEMICAL FEATURES OF HOST ROCKS OF THE SOBOLIKHA RARE METAL DEPOSIT (PRIMORYE)

V.V. Ivina[1,2], V.V. Ivin[1], A.I. Alexandrov[1], S.Yu. Budnitskiy[1], E.I. Medvedev[1]

[1]Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, e-mail: ivin_vv@mail.ru, vlada.ivina@mail.ru

[2]Far Eastern Federal University (FEFU), Vladivostok

Abstract. To reconstruct the conditions and identify the provenance areas of the Pozhiginskaya sequence, a comprehensive study of terrigenous rocks was conducted, including petrographic analysis of thin sections, construction of geochemical diagrams, study of the distribution of rare earth elements and U-Pb dating of detrital zircons from sandstones. It was found that the sandstones are quartz graywackes with a reduced silica content, increased concentrations of iron and alumina, and a predominance of sodium over potassium. The distribution spectra of rare earth elements demonstrate a moderate degree of fractionation with a predominance of light REE over heavy REE and the absence of a europium anomaly. U-Pb dating of detrital zircons revealed Permian provenance areas (255, 266, and 296 Ma), which correspond to acid igneous rocks. The relatively narrow age range of detrital zircons (about 45 million years) suggests that they may have formed within a single magmatic arc, although the oldest Early Permian peak may be related to another source.

Месторождение *Соболиха (Иденгу)* расположено в Самаркинском аккреционном террейне Сихотэ-Алинского орогенного пояса, на водоразделе р. Правая Соболиха и ее левых притоков — кл. Первого и Тихого. Оно было открыто в 1956 г. Б. Н. Марчуком (Иманская экспедиция Приморского геологического управления) в ходе летних поисковых работ, а в период 1956-1960 гг. детально изучено под руководством Н.П. Заболотной и Д.И. Ивлеева, что позволило оценить его как крупное комплексное редкометалльное месторождение.

Рудное поле находится на северо-восточном окончании крупной антиклинальной складки, сложенной породами пожигинской толщи [2], которые прорваны серией мелких интрузий щелочных сиенитов Кокшаровского комплекса [4]. Ниобиевая и редкоземельная минерализация приурочена к сиенитам и метасоматитам. Содержание Nb_2O_5 в ильменорутиле достигает 16.8%. Редкие земли концентрируются в апатите, монаците и ксенотиме [1].

Пожигинская толща ($J_{2-3}pz$) представлена олистостромовыми образованиями, преимущественно алевролитами и песчаниками, с подчиненным содержанием кремнисто-пепловых туффитов, кремней, кремнистых аргиллитов и редкими прослоями метабазальтов, глыбами и обломками песчаников, кремней, метабазальтов, а также единичными олистоплаками известняков. По находкам радиолярий толща датирована средней-поздней юрой, а контакты с более молодыми и более древними образованиями в большинстве случаев тектонические [3].

Для реконструкции условий и выяснения источников сноса пожигинской толщи проведено комплексное изучение терригенных пород, включающее петрографический анализ шлифов, построение геохимических диаграмм, изучение распределения редкоземельных элементов и U-Pb датирование детритовых цирконов из песчаников.

Песчаники пожигинской толщи характеризуются следующим породообразующими компонентами: кварц (49-62%), полевые шпаты (5-10%) и обломки пород (34-47%). Согласно классификации В.Д. Шутова, данные породы относятся к кварцевым граувакkам (рис. 1), что подтверждается их геохимическими особенностями: относительно низким содержанием SiO_2 (57.24-61.46%) при повышенных концентрациях $FeO+Fe_2O_3$ (6.21-9.37%) и Al_2O_3 (18.23-14.78%). Характерно преобладание Na_2O (3.34-4.62%) над K_2O (1.44-1.71%), типичное для граувакк, что дополнительно подтверждается плотной группировкой составов в соответствующем поле на диаграмме (рис. 2). Значения индекса химического изменения (CIA 59-63) указывают на интенсивность химического выветривания в областях сноса, обусловившего обогащение песчаников петрогенными элементами.

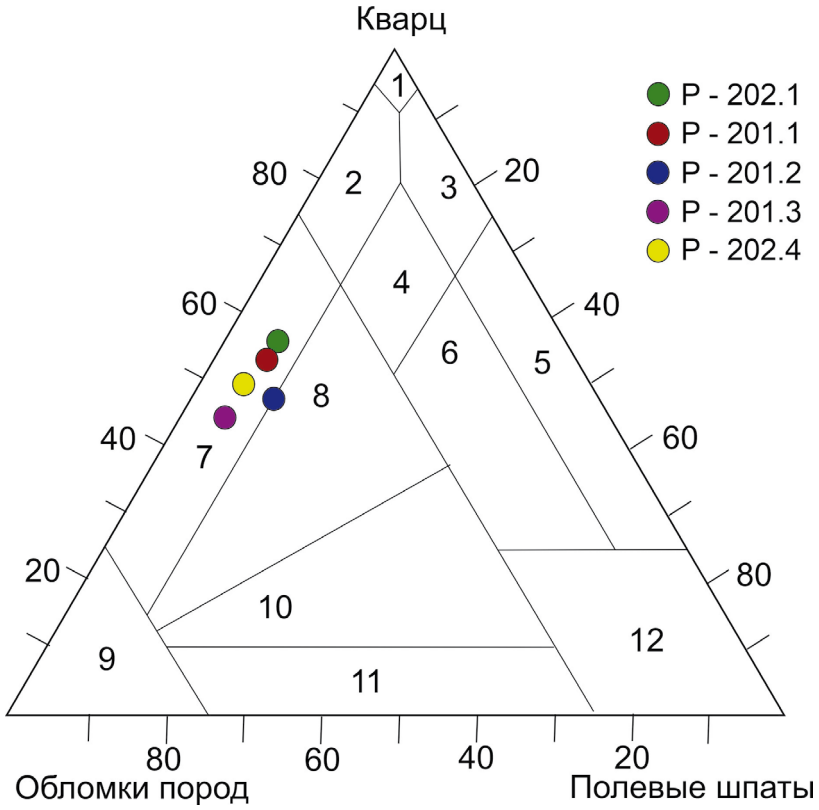


Рисунок 1. а – классификационная диаграмма песчаников по породообразующим компонентам [6]. Поля типов пород: 1–4 – кварцевые песчаники: 1 – мономиктовые кварцевые, 2 – кремнекластито-кварцевые, 3 – полевошпатово-кварцевые, 4 – мезомиктовые кварцевые; 5–6 – аркозовые песчаники: 5 – чистые или собственно аркозы, 6 – грауваккковые аркозы; 7–11 – грауваккковые песчаники: 7 – кварцевые граувакки, 8 – полевошпатово-кварцевые граувакки, 9 – собственно граувакки, 10 – кварцево-полевошпатовые граувакки, 11 – полевошпатовые граувакки; 12 – кристаллотуфы;

Figure 1. a – Classification diagram of sandstones based on rock-forming components [6]. Rock type fields: 1–4 – Quartzose sandstones: 1 – Quartz arenites (monomictic), 2 – Siliciclastic-quartzose, 3 – Feldspathic-quartzose, 4 – Mesomictic quartzose; 5–6 – Arkosic sandstones: 5 – Pure arkoses (proper arkoses), 6 – Graywacke-like arkoses; 7–11 – Graywacke sandstones: 7 – Quartz graywackes, 8 – Feldspathic-quartzose graywackes, 9 – Proper graywackes, 10 – Quartzofeldspathic graywackes, 11 – Feldspathic graywackes; 12 – Crystal tuffs

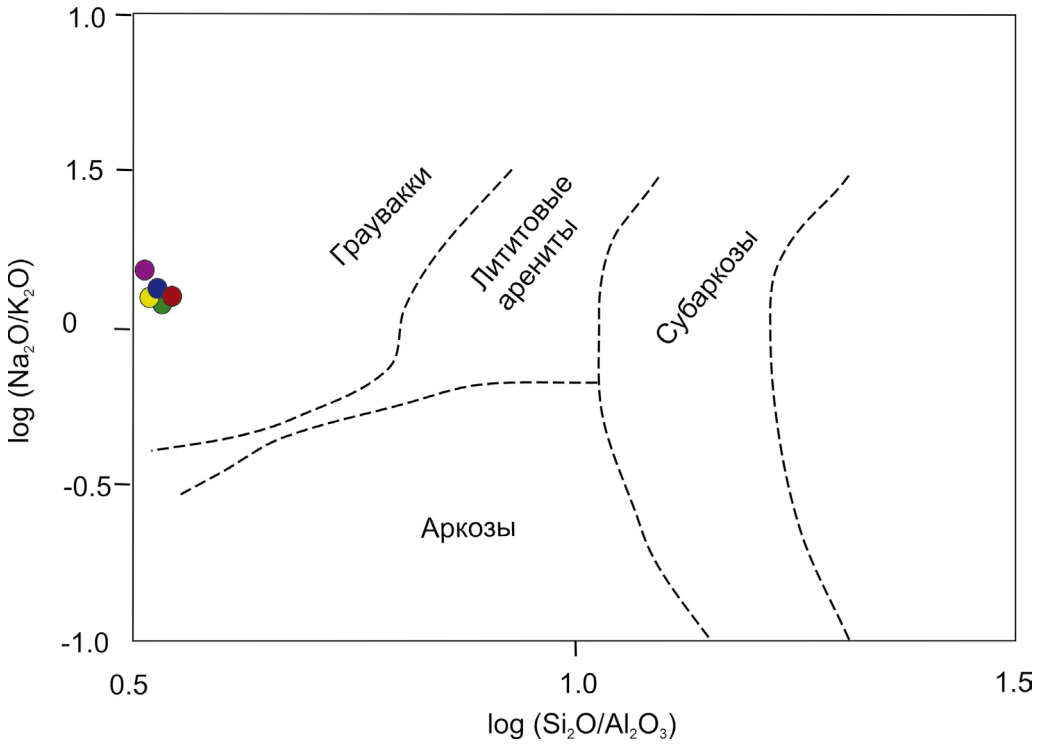


Рисунок 2. Классификационная диаграмма песчаников по химическому составу

Figure 2. Classification diagram of sandstones based on chemical composition.

Спектры распределения редкоземельных элементов (нормализованные к хондриту по Anders & Grevesse, 1989) в изученных пробах демонстрируют умеренную степень фракционирования (LaN /YbN=6.3 - 9.6) с преобладанием легких РЗЭ над тяжелыми и отсутствием европиевой аномалии (рис. 3).

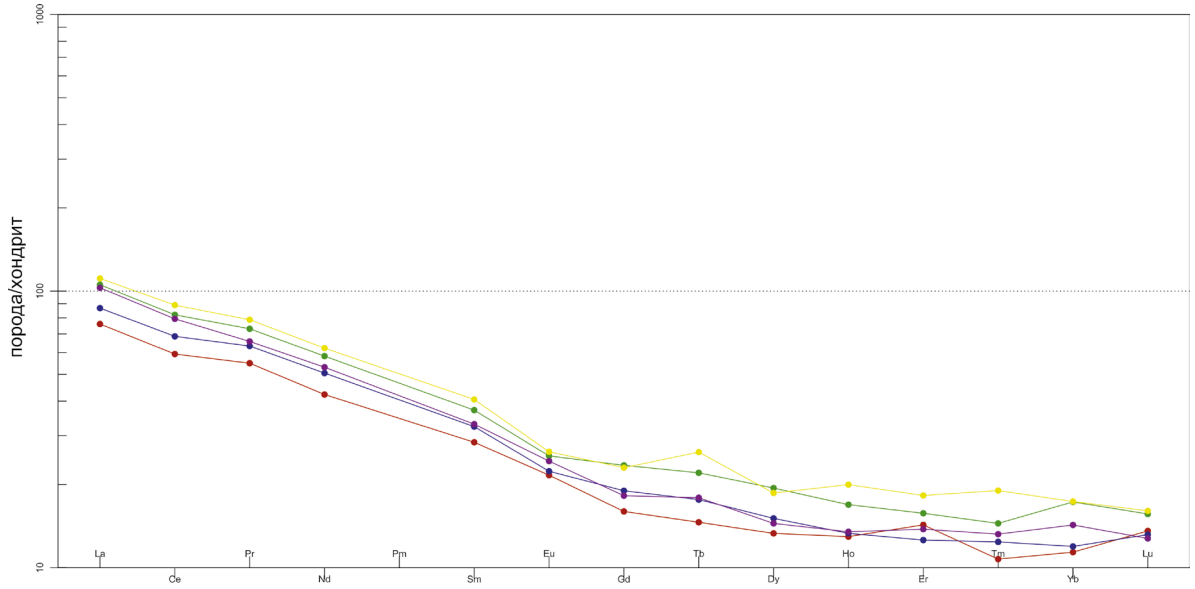


Рисунок 3. Спектры распределения РЗЭ, нормированных по хондриту (Anders & Grevesse, 1989).

Figure 3. Chondrite-normalized (Anders & Grevesse, 1989) REE distribution patterns.

В сочетании с положением точек на парных диаграммах (Hf–La/Th, La/Sc–Th/Co) эти особенности однозначно указывают на кислые магматические породы как основной источник терригенного материала (рис. 4).

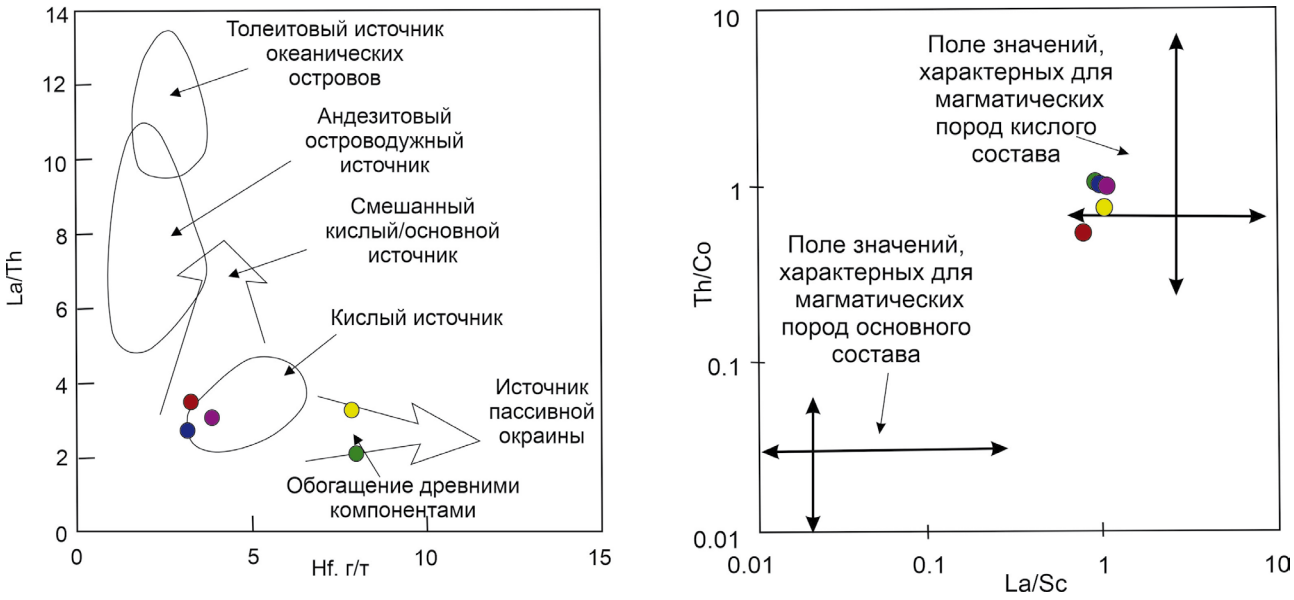


Рисунок 4. Вероятные источники питания для отложений пожигинской свиты по геохимическим данным на диаграммах: а– Hf–La/Th (Floyd, Leveridge, 1987); б - La/Sc–Th/Co (Cullers, 2002).

Figure 4. Likely provenance sources for the Pozhiginskaya Formation deposits inferred from geochemical discriminant diagrams: (a) Hf vs. La/Th (Floyd & Leveridge, 1987); (b) La/Sc vs. Th/Co (Cullers, 2002).

Анализ U/Pb возраста детритовых цирконов из песчаников пожигинской толщи выявил три статистически значимых пика, соответствующих верхнепалеозойским (пермским) источникам сноса: основной пик 266 млн лет (биармийский отдел 70% цирконов), а также подчиненные пики 296 млн лет (приуральский отдел) и 255 млн лет (татарский отдел). Наиболее молодая группа цирконов имеет возраст 254 млн лет, что существенно отличается от юрского стратиграфического возраста толщи. Возможно, данные песчаники относятся не к матриксу толщи, а представляют собой фрагменты олистолитов, сформированных задолго до образования аккреционной призмы.

Проведенные исследования установили, что основными источниками терригенного материала для пожигинской толщи явились кислые магматические породы пермского возраста (255, 266, и 296 млн лет). Отсутствие в составе пород допермских детритовых цирконов (в частности — кембрийского или палеопротерозойского возраста) не позволяет рассматривать в качестве источника сноса Бурея-Цзямусы-Ханкайский супертеррейн, с которым, главным образом, связывают происхождение кластики аккреционных комплексов Сихотэ-Алиня. Достаточно узкий диапазон возраста детритовых цирконов (около 45 млн. лет) допускает возможность их формирования в пределах одной магматической дуги, хотя наиболее древний раннепермский

пик может быть связан с другим источником. Ранее U-Pb методом по циркону возрастом 255 и 264 млн лет были датированы габброиды Бреевского массива Калиновского офиолитового комплекса [3], который авторы считают включенным в структуру юрской аккреционной призмы Самаркинского террейна фрагментом пермской островодужной системы. При этом, в надсубдукционных условиях могли также сформироваться магматические породы среднего и/или кислого состава, выходы которых на поверхность к настоящему времени не сохранились.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Беляевский Н.А.** Геология бассейна среднего течения реки Тудо-Ваки. Фонды ПГУ, 1948.

2. **Васильев Н.Ф. Шергин В.Н., Иванова А.Ф.** Отчет о результатах работ Вакской поисково-разведочной партии на месторождении Иденгу и в бассейнах кл. Малая Пожига и Падь Тодохова в 1960-61 гг., пос. Рощино, 1961.

3. **Государственная** геологическая карта Российской Федерации. Масштаб: 1:1000000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Листы L-(52),53; (K-52,53) (оз. Ханка): Объясн. Зап. СПб: Изд-во СПб картфабрика ВСЕГЕИ, 2011. 684 + 8 вкл.

4. **Добридень С.П.** Геолого-съёмочные работы в пределах района L-53-XXI (Рощинская площадь), Хабаровск, 2022.

5. **Залищак Б.Л.** Петрология ниобий-редкоземельного месторождения Иденгу, Владивосток, 1976.

6. **Шутов В.Д.** Классификация песчаников // Литология и полезные ископаемые. 1967. № 5. С. 86-102.

7. **Anders E., Grevesse N.** Abundances of the elements: Meteoritic and solar // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1989. V. 53. P. 197–214.

8. **Cullers R.L.** Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // Chemical Geology. 2002. V. 191. Iss. 4. P. 305– 327. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X

9. **Floyd P.A., Leveridge B.E.** Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones // Journal of the Geological Society. 1987. V. 144. N 4. P. 531–542. https://doi. org/10.1144/gsjgs.144.4.0531

МОНГУГАЙСКАЯ СВИТА ЮГО-ЗАПАДНОГО ПРИМОРЬЯ: ЛИТОЛОГИЯ, ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ

А.И. Малиновский

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: malinovsky@fegi.ru

Аннотация. Представлены результаты изучения и палеогеодинамической интерпретации вещественного состава верхнетриасовых отложений монгугайской свиты Юго-Западного Приморья. Интерпретация полученных данных показала, что седиментация происходила в обстановке активной континентальной окраины в бассейнах, осложненных сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам. Область питания объединяла континентальную сушу, сложенную кислыми изверженными породами, и, вероятно, зрелую глубоко эродированную энсиалическую дугу.

MONGUGAI FORMATION OF SOUTH-WESTERN PRIMORYE: LITHOLOGY, FORMATION SETTINGS

A.I. Malinovsky

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: malinovsky@fegi.ru

Abstract. The results of the study and paleogeodynamic interpretation of material composition of Upper Triassic deposits of Mongugai formation of South-Western Primorye are presented. Interpretation of the obtained data showed that sedimentation occurred in an active continental margin environment in basins complicated by shear dislocations along transform faults. The sources area combined the continental land, composed of acidic igneous rocks and, probably, a mature deeply eroded encyanic arc.

Триасовые отложения достаточно широко развиты на территории Приморского края. В его юго-западной части они представлены верхнетриасовыми (карнийскими) континентальными, часто угленосными, отложениями монгугайской свиты. Свита характеризуется небольшой мощностью, преобладанием песчаных пород, обилием остатков растений, присутствием пластов каменного угля.

В структурном отношении монгугайская свита входит в состав Лаоелин-Гродековского террейна, являющегося фрагментом восточного окончания Центрально-Азиатского складчатого пояса [1]. Террейн расположен в западной части Приморского края, продолжаясь на прилегающую территорию Китая, где он выделен в ранге складчатой зоны Яньбянь [4]. Террейн

сложен нижнесилурийскими и пермскими терригенными и вулканогенными образованиями, пронизанными интрузиями позднепермских-раннетриасовых гранитов и с угловым несогласием перекрытыми верхнетриасовыми терригенными отложениями монгугайской свиты. В южной части террейна, где свита наиболее широко распространена, нижняя ее часть сложена переслаиванием разнозернистых песчаников, алевролитов и аргиллитов. Иногда, в самом основании, встречаются прослои и линзы мелко- и среднегалечных конгломератов. Верхняя часть разреза состоит из разнозернистых песчаников, алевролитов, аргиллитов, конгломератов, углей и углистых аргиллитов, редко туфов. Общая мощность свиты оценивается в 380-600 м.

Для выяснения обстановок формирования и определения источников питания отложений свиты изучался вещественный состав песчаных пород, а также U-Pb возраст отобранных из них детритовых цирконов.

Песчаники свиты однородны, являются полимиктовыми и относятся к кварцево-полевошпатовым грауваккам. Они состоят из кварца (33-40%), полевых шпатов (21-33%) и обломков пород (31-41%). Среди обломков чаще всего встречаются фрагменты осадочных, а также средних и кислых магматические пород. Тяжелые обломочные минералы песчаников свиты разделяются на две ассоциации. Наиболее распространена циркон–турмалин–апатит–рутиловая ассоциация, связанная с разрушением кислых изверженных и метаморфических пород. В среднем сумма содержаний ее минералов составляет 91%. В ней доминирует циркон — в среднем 76%. Других минералов значительно меньше: турмалина 11%, апатита 4%, а рутила не более 1%. Вторая, хромит–пироксен–амфиболовая ассоциация, происходящая из основных и ультраосновных магматических пород, находится в подчиненном количестве, в сумме составляя 9%. Больше всего среди них хромита – в отдельных пробах до 30%. Остальные минералы обычно находятся в знаковых количествах.

По химическому составу песчаники монгугайской свиты близки. Содержание SiO_2 в них варьирует в диапазоне от 70.07% до 80.81%, TiO_2 0.28–0.85%, Al_2O_3 10.54–16.13%, FeO 0.25–3.18%, Fe_2O_3 0.10–1.67%, MgO 0.12–1.18% и CaO 0.03–7.88%. По классификации Ф. Петтиджона [2], песчаники соответствуют в основном грауваккам и, частично, лититовым аренитам – породам, промежуточным между аркозами и граувакками. Вместе с тем, наблюдающееся в песчаниках незначительное преобладание K_2O над Na_2O (1.13–2.80% и 0.05–1.93%) сближает их с аркозами.

Геохимические особенности обломочных пород определяются во многом степенью их "зрелости", т.е. интенсивностью процессов химического выветривания материнских пород областей питания. Степень выветривания исходных пород устанавливается по ряду геохимических индексов: гидролизатному ГМ (0.17-0.29), химического изменения CIA (60-90) и

выветривания WIP (10–52). Полученные данные позволяют говорить о том, что область питания была сложена достаточно «зрелыми», подвергшимися заметному химическому выветриванию породами, что, в целом, отражает доминирование в позднетриасовое время в юго-западной части Приморья процессов химического выветривания, происходивших в условиях умеренно жаркого и влажного климата. Такие климатические условия благоприятствовали накоплению достаточно мощной толщи угленосных отложений монгугайской свиты.

В песчаных породах свиты концентрации редкоземельных элементов (РЗЭ) относительно невелики, суммарные их содержания варьируют от 89 до 179 г/т. Спектры их распределения характеризуются нормальными трендами с умеренной степенью фракционирования и сравнительно невысоким отношением легких лантаноидов к тяжелым (La_N/Yb_N от 5.36 до 11.17), а также хорошо выраженной отрицательной европиевой аномалией (Eu/Eu* от 0.56 до 0.85). По сравнению с постархейским австралийским средним глинистым сланцем (PAAS) [3], породы в большинстве случаев незначительно обеднены всеми элементами (до 2.2 раза) и лишь в отдельных пробах они находятся в равных либо несколько более высоких концентрациях.

Полученные в результаты изучения вещественного состава песчаников монгугайской свиты данные позволяют реконструировать палеогеодинамические обстановки их формирования, а также определить тектонический тип и состав материнских пород вероятных источников питания.

Анализ и палеогеодинамическая интерпретация всей совокупности данных по вещественному составу песчаных пород свиты свидетельствуют, что в позднетриасовое время в юго-западной части Приморья седиментация происходила в бассейнах, связанных с обстановкой активной континентальной окраины и, вероятно, осложненных сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам типа Калифорнийского залива.

Судя по преобладанию в песчаниках сиалической ассоциации тяжелых минералов, относительно высокому содержанию кварца и кремнекислоты, незначительному преобладанию K_2O над Na_2O, умеренной обогащенности легкими РЗЭ элементами по сравнению с тяжелыми, отчетливо выраженной отрицательной Eu аномалии, а также положению фигуративных точек состава пород на ряде дискриминантных диаграмм, доминирующим источником вещества была размывавшаяся континентальная суша — кратоны и поднятые блоки основания, представлявшие собой выступы кристаллического фундамента в обрамлении рифтовых зон или вдоль трансформных разломов. Отложения формировались, главным образом, за счет разрушения кислых гранитно-метаморфических комплексов при участии обогащенных древними обломочными компонентами осадочных пород. Второстепенным источником обломочного вещества была глубоко расчлененная, практически полностью разрушенная, окраинно-

континентальная магматическая дуга, в которой эрозия вскрыла батолиты гранитоидов ее основания.

U-Pb геохронологические исследования детритовых цирконов из песчаников свиты позволили установить возраст и возможное положение магматических пород источников питания. Было установлено, что конкордантные U-Pb изотопные возраста изученных цирконов варьируют в диапазоне от 1781 до 240 млн лет. Среди них наиболее многочисленную популяцию (70% всех зерен) образуют зерна с пермскими–среднетриасовыми возрастами (293–240 млн лет). Возраст самых «молодых» цирконов этой популяции (240–251 млн лет) достаточно близок, но не моложе биостратиграфического возраста свиты. В подчиненном количестве находятся цирконы с кембрийскими и ордовикскими возрастами, а девонские, силурийские и протерозойские встречаются в виде единичных зерен. Источниками малочисленных цирконов с протерозойскими (1781 и 612 млн лет) возрастами могли быть достаточно удаленные кристаллические комплексы Северо-Китайского кратона либо Бурея-Цзямусы-Ханкайского супертеррейна. Источником кембрийско-ордовикской популяции (510–447 млн лет), вероятно, были раннепалеозойские коллизионные гранитоиды Ханкайского, а также других широко распространенных в регионе одновозрастных террейнов и массивов. Гранитные массивы, являвшиеся поставщиками малочисленных зерен силурийских (434 млн лет) и девонских (395 млн лет) цирконов, вероятно, имели небольшие размеры, к позднетриасовому времени были уже практически полностью размыты. Источниками наиболее многочисленной пермско-среднетриасовой (293–240 млн лет) популяции цирконов были широко распространенные вдоль восточной окраины Евразии массивы пермских и пермско-среднетриасовых гранитоидов. Эти источники, очевидно, часто располагались в непосредственно в близости от бассейнов седиментации, в том числе входя в состав самого Лаоелин-Гродековского террейна. В целом же, U–Pb геохронологические исследования детритовых цирконов из отложений монгугайской свиты позволили установить популяции, возраст которых согласуется с этапами проявления гранитоидного магматизма, хорошо известными в восточной части Центрально-Азиатском складчатого пояса.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России: В 2 кн.** / Под ред. Ханчука А.И. Владивосток: Дальнаука, 2006. 981 с.

2. **Петтиджон Ф.Дж., Поттер П., Сивер Р.** Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 535 с.

3. **Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.** Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.

4. **Ханчук А.И., Аленичева А.А., Голозубов В.В., Кандауров А.Т., Юрченко Ю.Ю., Сергеев С.А.** Ханкайский массив: гетерогенность фундамента и региональные корреляции // Тихоокеанская геология. 2022. Т. 41. № 4. С. 3–22.

СТРАТИГРАФИЯ И ПАЛЕОГЕОГРАФИЯ СРЕДНЕГО САХАЛИНА В ПОЗДНЕЛЕДНИКОВЬЕ–ГОЛОЦЕНЕ

Ю.А. Микишин, И.Г. Гвоздева, Т.И. Петренко

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: yurimikishin@fegi.ru

Аннотация. Результаты палинологического и радиоуглеродного изучения четырех разрезов торфяников на побережье зал. Терпения позволили детально рассмотреть стратиграфию и палеогеографию позднеледниковья–голоцена средней части о. Сахалин. Наиболее древние отложения, обнаруженные в основании разрезов, формировались в Аллерёде, 12100–10850 л.н. / 14200–12800 к.л.н. Спорово-пыльцевые спектры отразили растительность лиственнично-берёзовых лесов, развивавшихся в климатических условиях, прохладнее и суше современных. Суровый, близкий к ледниковому, климат позднего Дриаса (дата 10200 л.н. / 11 900 к.л.н.) привел к замене лесов лесотундровыми зарослями из фригидных кустарников. В предбореальном периоде голоцена, около 9600 л.н. / 10900 к.л.н., произошло восстановление лесной растительности. В середине бореального периода (даты 8750–8000 л.н. / 9800–8900), в более сухих условиях, по сравнению с современными, но близких к ним по теплообеспеченности, в горах впервые появились темнохвойные леса, уступавшие место в растительности смешанным фитоценозам с преимуществом берез. Наступление более теплого и влажного климата в атлантическом периоде голоцена, нежели в бореале, вызвало активное накопление торфа на прибрежной террасе, в отличие от почвенных горизонтов, преобладавших в раннем голоцене. Началась эпоха господства елово-пихтовых лесов с участием широколиственных пород. Термический максимум голоцена проявился в среднюю фазу атлантического периода, 6400–6300 л.н. / 7300–7200 к.л.н., отметившись возросшей ролью пыльцы *Quercus, Ulmus, Juglans* (в сумме в среднем 9–15%,), превышающей таковую в субфоссильных спектрах юга Сахалина. В позднюю фазу периода, 5800–4700 л.н. / 6600–5400 к.л.н. она лишь приближалась к ней (7–11%).

STRATIGRAPHY AND PALEOGEOGRAPHY MIDDLE PART OF SAKHALIN IN THE LATE GLACIAL PERIOD TO HOLOCENE

Yu.A. Mikishin, I.G. Gvozdeva, T.I. Petrenko

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: yurimikishin@fegi.ru

Abstract. The results of palynological and radiocarbon studies of four peat bog sections on the coast of Terpeniya Bay allowed for a detailed examination of

the stratigraphy and paleogeography of the Late Glacial–Holocene Period in the central part of Sakhalin Island. The oldest deposits found at the base of the sections were formed during the Allerød period, 12,100–10,850 yr. BP / 14,200–12,800 Cal. yr. BP. Pollen spectra reflected the vegetation of larch-birch forests that developed in climatic conditions cooler and drier than modern ones. The harsh, near-glacial climate of the Younger Dryas (dated 10,200 yr. BP / 11,900 Cal. yr. BP) led to the replacement of forests by forest-tundra thickets of frigid shrubs. In the Preboreal Period of the Holocene, around 9,600 yr. BP / 10,900 Cal. yr. BP, forest vegetation was restored. In the middle of the Boreal Period (dates 8,750–8,000 yr. BP / 9,800–8,900 Cal. yr. BP), in conditions similar to modern ones in terms of heat supply but drier, dark coniferous forests appeared in the mountains for the first time, giving way to mixed phytocenoses with a predominance of birch. The onset of a warmer and wetter climate in the Atlantic Period of the Holocene caused active peat accumulation on the coastal terrace, in contrast to the soil horizons in the early Holocene. The era of spruce-fir forests dominated by broad-leaved species began. The Holocene thermal maximum occurred in the middle phase of the Atlantic Period, 6,400–6,300 yr. BP / 7,300–7,200 Cal. yr. BP, marked by an increased role of *Quercus, Ulmus, and Juglans* pollen (a total of 9–15% on average), exceeding that in the subfossil spectra of southern Sakhalin. In the late phase of the Period, 5,800–4,700 yr. BP / 6,600–5,400 Cal. yr. BP, it approached it (7–11%).

Стратиграфия отложений и палеогеографическое развитие средней части о. Сахалин в позднеледниковое-голоценовое время рассмотрены на основе исследования спорово-пыльцевых спектров и радиоуглеродного датирования древних торфяников, залегающих на верхнеплейстоценовой (возраст 26 100–33 800 л.н.) аллювиальной террасе побережья зал. Терпения. Детальному изучению подверглись разрезы «Туманово-II» и «Лермонтовка-II», а также основания близлежащих разрезов «Туманово-III» и «Лермонтовка-I», чаще представленные погребенными почвами. Спорово-пыльцевым анализом изучено 120 образцов отложений, хронология выявленных палеособытий базируется на 27 датировках, полученных в радиоуглеродных лабораториях России (ИГиМ СО РАН, ГИН РАН, СПбГУ) и Японии (Shirakawa Institute of Accelerator Analysis). Расчленение отложений разрезов проведено в соответствии со схемой периодизации голоцена Блитта-Сернандера, модифицированной для Северной Евразии [4]. Всего в отложениях изученных разрезов выделено 13 стратиграфических горизонтов, сопоставленных с палеособытиями позднеледниковья-голоцена.

Наиболее древние отложения, вскрытые в основаниях разрезов, сопоставляются со временем позднеледникового потепления климата «Аллерёд» (AL), что подтверждается серией из 5 дат, заключенных в рамках 12100–10850 радиоуглеродных л.н. (далее л.н.), отвечающих 14200–12800

календарным л.н. (далее к.л.н.). Спорово-пыльцевой комплекс характеризуется преобладанием пыльцы мелколиственных деревьев (53–70%), почти полностью принадлежащей берёзам. Содержание пыльцы лиственницы в нем (3–14%) значительно выше, а ели (до 2%), напротив, намного ниже, чем в субфоссильных спектрах на территории распространения лиственничных лесов Северного Сахалина [1]. Комплекс отражает растительность лиственничных и лиственнично-берёзовых лесов, развивавшихся в климатических условиях прохладнее и суше современных.

Слои торфяников, накапливавшиеся в наиболее суровых климатических условиях палеособытия «Поздний Дриас» (DR-3), содержат спорово-пыльцевые спектры с преобладанием пыльцы фригидных кустарников (65–78%). Этому заключению не противоречит полученная дата: 10200 л.н./ 11900 к.л.н. Растительность была представлена лесотундровыми зарослями из кустарниковых берёз, ольховника и кедрового стланика. Современные аналоги их развиты лишь на северо-восточном побережье Сахалина, имеющем наиболее суровый климат на острове [1, 3]. Не исключено, что климат события соответствовал существующему побережью Охотского моря, лежащему на 900–1200 км севернее, где формируются схожие субфоссильные спорово-пыльцевые спектры. Снижение среднегодовых температур воздуха, по сравнению с современными в данном районе (0 °С), могло достигать 5–8°, уменьшение суммы осадков (ныне около 800 мм) — на 300–400 мм.

Горизонты торфяников, сформировавшиеся в начале голоцена, отнесены ко второй фазе предбореального периода, что подтверждается датой 9600 л.н./ 10900 к.л.н. Как и отложения Аллерёда, они характеризуется преобладанием (56–76%) пыльцы мелколиственных пород, в основном принадлежащей берёзам. Содержание пыльцы тёмнохвойных пород (только *Picea*), близко к 3%. Климат был прохладнее и суше современного, близкий к нынешним условиям севера острова.

Бореальный период голоцена представлен нижне- и среднебореальными отложениями. Пыльцевые спектры первых фиксирует ослабление в растительности роли берёзово-лиственничных лесов и усиление – лиственничников и фригидных кустарников с преимуществом *Betula* sect. Nanae. Климат, по-прежнему, был прохладнее и суше современного. Вторые (радиоуглеродные даты 8750 л.н./ 9800 к.л.н. и 8000 л.н./ 8900 к.л.н.) отличаются значительным ростом пыльцы тёмнохвойных пород, впервые с начала голоцена достигающих содержания 9–33%, и мелколиственных деревьев, в основном берез, до 42–67%. Климатические условия приближались к современным по теплообеспеченности, по-прежнему оставаясь суше. Палеособытие отвечает средней, наиболее теплой, фазе бореального периода голоцена [2].

Атлантический период голоцена представлен отложениями, накапливавшимися в среднюю и позднюю фазы. Среднеатлантические

горизонты торфяников (даты 6400–6300 л.н. / 7300–7200 к.л.н) содержат спорово-пыльцевые спектры с близким содержанием пыльцы темнохвойных и мелколиственных пород (30–45%), а также широколиственных деревьев с преобладанием *Quercus, Ulmus, Juglans*. Максимальное количество их пыльцы достигает 14–21%, среднее — 9–15%, что существенно превышает роль в субфоссильных спектрах даже юга Сахалина [1]. Спектры свидетельствуют о преобладании в растительности елово-пихтовых лесов в горах и смешанных ассоциаций с участием разнообразных широколиственных деревьев на прибрежной равнине. Теплообеспеченность климата достигала наибольших значений, отвечая термическому максимуму голоценового оптимума. Она превышала уровень температур (3–4.5 °С), существующий ныне на юге острова [3]. Влажность климата существенно превышала показатели бореального периода и находилась в рамках, близких к современным, учитывая аналогичную субфоссильным спектрам роль пыльцы темнохвойных пород. Верхнеатлантические горизонты торфяников (даты 5800–4700 л.н. / 6600–5400 к.л.н.) накапливались в сходных климатических условиях, принимая во внимание однотипный состав пыльцевых спектров, но несколько прохладнее, близких к нынешним на юге острова, что подтверждается меньшей ролью пыльцы широколиственных пород (7–11%).

Суббореальный период голоцена представлен отложениями, также образовавшимися в среднюю и верхнюю фазы. Первые из них (даты 4100–3800 л.н. / 4700–4300 к.л.н.) характеризуются стремительным ростом участия пыльцы тёмнохвойных пород (54–84, в среднем 62%), происходящим, по-прежнему, за счёт ели, а не пихты. Роль мелколиственных и широколиственных пород деревьев снижается, соответственно, в среднем до 21 и 4%. Состав пыльцевых спектров отразил развитие елово-пихтовых лесов с меньшим участием широколиственных пород, чем во время предыдущего события. Теплообеспеченность климата была ниже современной на юге острова. Вторые горизонты (дата 2700 л.н. / 2800 к.л.н.) фиксируют максимальный рост содержания пыльцы тёмнохвойных пород (в среднем почти 80%), отразивший растительность с наибольшим в голоцене распространением елово-пихтовых лесов, в которых широколиственные деревья отмечались реже, чем во время предыдущего палеособытия. Теплообеспеченность климата была близка к современной, а влажность – достигала наивысшего уровня за весь голоцен. Не исключено, что годовая сумма осадков могла составлять 1000–1200 мм, как и ныне в горах Сахалина [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г.** Субфоссильные спорово-пыльцевые комплексы Сахалина и прилегающих территорий. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2009. 162 с.

2. **Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г., Петренко Т.И.** Ранний голоцен Сахалина // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2010. Т. 12. № 14. С. 432–437.

3. **Научно-прикладной справочник по климату СССР.** Серия 3. Многолетние данные. Ч. 1–6. Вып. 34. Сахалинская область. Л.: Гидрометеоиздат, 1990. 352 с.

4. **Хотинский Н.А.** Радиоуглеродная хронология и корреляция природных и антропогенных рубежей голоцена. Новые данные по геохронологии четвертичного периода. К XII конгрессу ИНКВА (Канада, 1987 г.). М.: Наука, 1987. С. 39–45.

СОСТАВ И УСЛОВИЯ НАКОПЛЕНИЯ НЕОПРОТЕРОЗОЙСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД АНГАРО-ЛЕНСКОГО РАЙОНА ЮГА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

З.Л. Мотова, Т.В. Донская, Д.П. Гладкочуб, А.Г. Вахромеев

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск,
e-mail: motova@crust.irk.ru

Аннотация. Представлены результаты петрографических и литогеохимических исследований неопротерозойских терригенных пород тыптинской и чорской свит, изученных по керну глубоких скважин, пробуренных в пределах Чиканского газоконденсатного месторождения центральной части Ангаро-Ленского района юга Сибирской платформы. В результате проведенных исследований были выявлены различия в минеральном составе, литогеохимических характеристиках, а также степени постседиментационных преобразований пород изученных стратоподразделений. Сделан вывод о формировании изученных терригенных отложений в различных седиментационных обстановках за счет за разрушения существенно отличающихся источников питания.

COMPOSITION AND ACCUMULATION CONDITIONS OF NEOPROTEROZOIC TERRIGENOUS ROCKS OF THE ANGARA-LENA REGION OF THE SOUTHERN SIBERIAN PLATFORM

Z.L. Motova, T.V. Donskaya, D.P. Gladkochub, A.G. Vakhromeev

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk,
e-mail: motova@crust.irk.ru

Abstract. We presents the results of petrographic and lithogeochemical studies of Neoproterozoic terrigenous rocks of the Typta and Chora formations, studied from the core of deep wells drilled within the Chikanskoye gas condensate field in the central part of the Angara-Lena region of the south of the Siberian platform. As a result of the studies, differences in the mineral composition, lithogeochemical characteristics, and the degree of post-sedimentation transformations of the rocks of the studied formations were revealed. Based on the data obtained, a conclusion was made about the formation of the studied terrigenous deposits in different sedimentation settings due to the destruction of significantly different sources area.

Территория Восточной Сибири является одной из наиболее перспективных регионов для нефте- и газодобычи в России. На территории Ангаро-Ленского внутреннего района юга Сибирской платформы (ЮСП) выделяется

одноименная нефтегазоносная область (Ангаро-Ленская НГО), в пределах которой сосредоточены значительные запасы углеводородов (УВ), в том числе гигантское Ковыктинское газоконденсатное месторождение с сателлитами, приуроченное к Ангаро-Ковыктинской зоне нефтегазонакопления (ЗНГН) [4]. Основная доля ресурсов УВ Ангаро-Ковыктинской ЗНГН сосредоточена в неопротерозойских терригенно-карбонатных породах, несогласно залегающих на породах кристаллического фундамента платформы и перекрытых мощными кембрийскими галогенно-карбонатными толщами [1]. В Ангаро-Ленском внутреннем районе ЮСП породы неопротерозоя и раннего кембрия подразделяются на непский, тирский, даниловский и усольский региональные стратиграфические горизонты [3]. По данным геологоразведочных работ, в центральной части Ангаро-Ленского района наиболее продуктивными на УВ являются терригенные породы непского и тирского региональных стратиграфических горизонтов, в которых, в свою очередь, выделяются базальный, боханский, шамановский и парфеновский перспективные горизонты [4]. Изученность перспективных на УВ неопротерозойских терригенных пород центральной части Ангаро-Ленского района ЮСП ограничивается геолого-геофизическими, литолого-фациальными и петрофизическими исследованиями наиболее продуктивного парфеновского горизонта [4]. В то же время, применение современных петрографических и литогеохимических методов исследований терригенных пород может способствовать более детальной реконструкции условий осадконакопления, а также выяснению степени постседиментационных преобразований, что позволит более подробно оценить коллекторские свойства пород и снизить геологические риски, связанные с поисками новых месторождений. Кроме того, данный подход актуален для более глубоко залегающих и наименее изученных перспективных горизонтов — базального, шамановского и боханского, где традиционные методы геологоразведки оказываются недоступными или недостаточно эффективными.

В работе рассмотрены петрографические и литогеохимические характеристики неопротерозойских терригенных пород тыптинской и чорской свит, изученных по керну глубоких скважин, пробуренных в пределах Чиканского газоконденсатного месторождения Ангаро-Ленского района ЮСП.

Терригенные породы тыптинской свиты относятся к базальному перспективному горизонту непского регионального стратиграфического горизонта. Они с размывом залегают на породах фундамента и представлены грубозернистыми песчаниками с маломощными прослоями алевролитов и аргиллитов. Мощность отложений варьируется от 30 до 250 м [3].

Породы чорской свиты с угловым несогласием и размывом залегают на терригенных отложениях тыптинской свиты. Свита подразделена на две подсвиты. Нижняя относится к боханскому продуктивному горизонту непского

регионального стратиграфического горизонта и сложена грубозернистыми песчаниками с прослоями алевролитов. Мощность подсвиты варьируется от 100 до 180 м. Верхняя подсвита чорской свиты относится к парфеновскому продуктивному горизонту тирского регионального стратиграфического горизонта. Подсвита сложена песчаниками с прослоями алевролитов, в основании отмечаются конгломераты. Мощность подсвиты составляет от 15 до 65 м [3].

Изученные образцы тыптинской свиты представлены разнозернистыми песчаниками, сложенными плохо отсортированным, неокатанным и полуокатанным обломочным материалом. Цемент смешанный, контактово-поровый, карбонатно-глинистый, глинисто-железистый, регенерационный кварцевый. В составе песчаников преобладает кварц (83–96%). Второстепенные минералы: полевые шпаты, биотит, мусковит и рудный минерал. Акцессорные минералы: турмалин, циркон, сфен-лейкоксен. Среди обломков пород (4–10%) диагностируются кварциты, гранитоиды и микросланцы. Вторичные изменения проявлены пелитизацией полевых шпатов, гидратацией и регенерацией биотита, а также карбонатизацией глинисто-железистого цемента и образованием стилолитовых швов.

Нижняя подсвита чорской свиты представлена разнозернистыми песчаниками и алевропесчаниками, сложенными неокатанным и полуокатанным, плохо отсортированным обломочным материалом. Цемент смешанный, базально-поровый, контактово-поровый, глинисто-карбонатный, глинисто-железистый, регенерационный кварцевый. В составе преобладает кварц (70–95%). Второстепенные минералы: полевые шпаты, мусковит, биотит, рудный минерал. Акцессорные минералы: турмалин, циркон, сфен. Обломки пород (3–20%): аргиллиты, микросланцы, алевролиты, кварциты, гранитоиды. Вторичные преобразования выражены регенерацией кварца. Повсеместно отмечается карбонатизация.

Породы верхней подсвиты чорской свиты по составу относятся к полевошпат-кварцевым песчаникам и грауваккам. Полевошпат-кварцевые песчаники сложены полуокатанными и неокатанными зернами различной степени сортировки. Цемент смешанный, контактово-поровый, коррозионный, глинисто-карбонатный, пленочный, железистый. В этих песчаниках преобладает кварц (70–80%) и полевые шпаты (7–8%). Второстепенные минералы: мусковит, биотит, рудный минерал, ангидрит. Акцессорные минералы: апатит, турмалин, циркон. Обломки пород (9–17%) представлены кремнями, аргиллитами, кварцитами, микросланцами, гранитоидами и кислыми эффузивами. Вторичные изменения проявлены пелитизацией полевых шпатов, хлоритизацией биотита, лимонитизацией и ангидритизацией карбонатного цемента.

Грауваккковые алевропесчаники верхней подсвиты чорской свиты сложены полуокатанным и неокатанным, плохо отсортированным обломочным материалом. Цемент базально-поровый, контактово-поровый, глинистый,

глинисто-карбонатный. В составе преобладают кварц (37–52%) и полевые шпаты (18–28%). Второстепенные минералы: биотит, мусковит, рудный минерал, кальцит. Акцессорные минералы: циркон, турмалин, сфен-лейкоксен. Обломки пород (20–25%) представлены микросланцами, алевролитами, кварцитами, гранитоидами и кислыми эффузивами. Эпигенетические преобразования проявлены хлоритизацией, пелитизацией, карбонатизацией и лимонитизацией.

Установленные постседиментационные преобразования изученных пород, вероятно происходившие за счет литостатического давления, демонстрируют определенную зональность, смена которой происходит снизу вверх по разрезу. Песчаники тыптинской свиты обнаруживают вторичные преобразования, характерные для позднего (глубинного) катагенеза. Преобразования вышележащих пород нижней подсвиты чорской свиты соответствуют стадии среднего катагенеза. Песчаники верхней подсвиты чорской свиты обнаруживают преобразования, характерные для раннего (начального) катагенеза [5].

В ходе реконструкции состава источников обломочного материала с использованием литогеохимических данных для песчаников тыптинской свиты, а также нижней подсвиты чорской свиты установлен кислый состав пород источника. В качестве основных источников обломочного материала для верхней подсвиты чорской свиты установлены породы смешанного (кислого–среднего) состава. Литолого-фациальные данные демонстрируют эволюцию осадочного бассейна, выраженную в постепенной смене фаций, а именно: тыптинская свита представлена отложениями континентального склона, нижняя подсвита чорской свиты сложена отложениями континентального склона, постепенно сменяющимися прибрежно-морскими отложениями, верхняя подсвита чорской свиты представлена аллювиальными-дельтовыми отложениями, сменяющимися в верхних частях разреза мелководно-морскими отложениями [2].

Совокупность полученных данных свидетельствует о различных условиях седиментации изученных пород. Предполагается, что накопление песчаников тыптинской свиты происходило на континентальном шельфе, преимущественно за счет разрушения пород кислого состава. Нижняя подсвита чорской свиты накапливалась сначала в континентальных, а затем в прибрежно-морских обстановках, также преимущественно за счет разрушения пород кислого состава. Вещественные характеристики пород верхней подсвиты чорской свиты, наряду с их литолого-фациальными особенностями, указывают на изменение обстановки седиментации, выраженное в смене речных отложений мелководно-морскими, а также изменением состава пород в области источника.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00196, https://rscf.ru/project/23-17-00196/

ЛИТЕРАТУРА

1. **Галимова Т.Ф., Пермяков С.А., Бобровский В.Т., Пашкова А.Г. и др.** Государственная геологическая карта Российской федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Лист N-48 (Иркутск). Объяснительная записка, 2009, 490 с.

2. **Мельников Н.В., Якшин М.С., Шишкин Б.Б. и др.** Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления. Новосибирск: Академическое издательство «Гео», 2005. 428 с.

3. **Решения** Четвертого межведомственного регионального стратиграфического совещания по уточнению и дополнению стратиграфических схем венда и кембрия внутренних районов Сибирской платформы / Ред. Н.В. Мельников, Л.Н. Репина. Новосибирск: СНИИГГиМС, 1989. 64 с.

4. **Скузоватов М.Ю.** Ресурсы природного газа и конденсата Ангаро-Ленской газоносной области // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 3–4. С. 614–627.

5. **Япаскурт О.В.** Стадиальный анализ литогенеза. М.: Изд-во МГУ, 1994. 142 с.

ОСАДОЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ В СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ЗОНЕ ВОСТОЧНОГО САЯНА: НА ПРИМЕРЕ ДОЛИНЫ РЕКИ СЕНЦА

В.А. Пеллинен, А.А. Светлаков

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск,
e-mal: vadim.a.pellinen@ya.ru

Аннотация. В работе исследуются особенности осадконакопления в долине реки Сенца (Восточный Саян) в контексте структурно-тектонических особенностей региона. Рассмотрено влияние каледонско-герцинской складчатости, разломно-блокового строения и неотектонических движений на формирование аллювиальных, пролювиальных, ледниковых и озерных отложений. Особое внимание уделено гранулометрическому и минералогическому составу осадков, отражающему динамику палеогидрологических условий. Установлено, что тектоническая активность контролирует пространственное распределение осадочных фаций. Физическое разрушение пород в разломных зонах обеспечивает поступление обломочного материала и в совокупности с процессом выветривания создает условия для аккумуляции тонкозернистых толщ во впадинах. Климатические колебания голоцена и криогенные процессы дополнительно осложняют седиментационную картину. Результаты исследования важны для понимания взаимодействия эндогенных и экзогенных факторов в горных речных системах.

SEDIMENTARY DEPOSITS IN THE STRUCTURAL-TECTONIC ZONE OF THE EASTERN SAYAN: A CASE STUDY OF THE SENTSA RIVER VALLEY

V.A. Pellinen, A.A. Svetlakov

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk,
e-mail: vadim.a.pellinen@ya.ru

Abstract. The study examines sedimentation patterns in the Sentsa River valley (Eastern Sayan) within the structural-tectonic framework of the region. The influence of the Caledonian-Hercynian folding, fault-block structure and neotectonic movements on the formation of alluvial, proluvial, glacial and lacustrine deposits is considered. Particular attention is paid to the granulometric and mineralogical composition of sediments, reflecting the dynamics of paleohydrological conditions. It was found that tectonic activity controls the spatial distribution of sedimentary facies. Physical destruction of rocks in fault zones ensures the supply of detrital material, together with the weathering process, creates conditions for the accumulation

of fine-grained strata in depressions. Climatic fluctuations of the Holocene and cryogenic processes additionally complicate the sedimentation picture. The results of the study are important for understanding the interaction of endogenous and exogenous factors in mountain river systems.

Осадконакопление в долине реки Сенца, расположенной на Окинском плоскогорье в Восточном Саяне, представляет собой сложный процесс, сформированный взаимодействием ледниковых, флювиальных, озерных и криогенных факторов. Восточный Саян представляет собой горную систему, сформированную в результате длительных тектонических процессов. Породы, расположенные в зоне действия этой системы, характеризуются различным составом и прочностными характеристиками, что обуславливает их разную устойчивость к процессу выветривания. Все это способствует поступлению осадочного материала в долину. Долина реки Сенца, расположенная в пределах этой зоны, является уникальным объектом для изучения процессов осадконакопления, поскольку здесь хорошо выражены различные типы отложений, связанные с тектонической активностью, климатическими изменениями и эрозионно-аккумулятивными процессами [2]. Цель данной работы – рассмотреть особенности осадконакопления в долине реки Сенца в контексте структурно-тектонических обстановок Восточного Саяна.

Восточный Саян относится к области каледонско-герцинской складчатости и испытывал активные тектонические движения в палеозое и мезозое. В пределах долины реки Сенца выделяются разломные зоны, определяющие блоковое строение территории, складчатые структуры, влияющие на распределение осадочных толщ, а также интрузивные массивы, создающие локальные геоморфологические особенности. Тектоническая активность способствует интенсивному разрушению горных пород, формированию грубообломочного материала и его переотложению в речных долинах [3].

Тектонические движения в Восточном Саяне играют ключевую роль в осадконакоплении. Они определяют дифференцированное опускание и поднятие блоков, что приводит к изменению базиса эрозии и перераспределению осадков. Формирование тектонических впадин способствует накоплению мощных толщ осадочных пород, а активизация склоновых процессов увеличивает поставку обломочного материала в речную систему [2]. В настоящее время в долине реки Сенца преобладают процессы эрозии и переноса материала в условиях усиления ливневой активности. Аккумуляция отложений в низовьях долины происходит за счет снижения энергии потока изменяющего скорости процесса седиментации.

В долине реки Сенца встречаются различные генетические типы осадков. Аллювиальные отложения включают русловой аллювий (галечники, пески, формирующиеся в условиях активного течения), пойменный аллювий (суглинки, супеси с прослоями песка, накапливающиеся в периоды половодий)

и старичные отложения (тонкозернистые илы, торфяники, образующиеся в отмерших руслах). Пролювиальные и коллювиальные отложения представлены конусами выноса временных потоков (пролювий) – грубообломочным материалом у подножий склонов, а также обвально-осыпными отложениями (коллювий) – продуктами физического выветривания на крутых склонах. В верхних частях долины присутствуют ледниковые и флювиогляциальные отложения, такие как морены и водно-ледниковые пески, свидетельствующие о четвертичном оледенении.

Исследования гранулометрического, минералогического и геохимического состава отложений позволяют восстановить палеогеографические условия голоцена, включая динамику оледенения, образование подпрудных озер и последующую дегляциацию.

Гранулометрический состав и минералогия аллювиальных песков отражают динамику осадконакопления и энергетические условия водного потока. Крупнозернистые пески (0.5–0.25 мм) с высокой степенью сортировки (S_0=1.34–1.40) и преобладанием кварца (55%) формируются в условиях высокоэнергетических потоков, способных транспортировать и откладывать преимущественно устойчивые к абразии минералы. По мере снижения энергии потока накапливаются более мелкие фракции: мелкозернистые пески (0.25–0.05 мм), сохраняющие хорошую сортировку (S_0=1.56–1.71), но содержащие меньше кварца (40%) и больше полевых шпатов (25%). Тонкозернистые пески (0.05–0.01 мм) со средней сортировкой (S_0=2.04–2.32) и повышенным содержанием полевых шпатов (40%) и глинистых минералов (20–35%) отражают низкоэнергетические условия осадконакопления. Наличие плохо отсортированных пылеватых отложений с высоким содержанием глинистого материала может указывать на влияние мерзлотных процессов, способствующих накоплению тонкодисперсных частиц.

Таким образом, распределение гранулометрических фракций и минерального состава аллювиальных песков служит индикатором палеогидродинамических условий и постседиментационных процессов в речных системах [1].

Моренные отложения представлены валунно-галечным материалом с песчаным заполнителем, отличающимся плохой сортировкой и неоднородностью. В разрезах отмечается чередование грубообломочных слоев и перемытых водно-ледниковых песков. Минералогически эти отложения содержат 40–45% полевых шпатов, 30–40% кварца и 5–10% амфиболов, а также тяжелые минералы (гранат, сфен, эпидот). Стадиальные морены включают песчаные толщи с прослоями погребенных почв, радиоуглеродный возраст которых указывает на их формирование 4–5 тыс. лет назад [1].

Озерные отложения, связанные с подпрудными озерами, представлены глинами, суглинками, супесями и песками. Гранулометрический анализ показывает чередование хорошо сортированных песков (формировавшихся в

условиях энергичного потока) и плохо сортированных глин (накапливавшихся в спокойных условиях). Радиоуглеродные датировки (3510±120 лет) подтверждают существование озер в позднем голоцене, а скорость осадконакопления оценивается в 0.4 мм/год [1].

На формирование отложений в долине реки Сенца повлияли климатические изменения, гидродинамические условия, криогенные и тектонические процессы.

Климатические колебания в позднем плейстоцене и голоцене привели к чередованию фаз оледенения и дегляциации, что обусловило формирование подпрудных озер и переотложение моренного материала. Периоды потепления сопровождались активным таянием ледников и увеличением водного стока.

Гидродинамические условия отражаются в изменении гранулометрического состава отложений: крупнозернистые пески свидетельствуют о высокой энергии потока, а тонкозернистые илы — о стоячих водоемах. Наличие косой слоистости и завихрений указывает на турбулентное течение.

Криогенные процессы играли значительную роль в преобразовании отложений после дегляциации. Протаивание мерзлых пород (льдистость до 50%) приводило к образованию полостей и оползней, а также формированию характерных криогенных текстур (шлиры, линзы льда) в суглинках и супесях.

Таким образом, структурно-тектоническая зона Восточного Саяна выступает ключевым фактором, определяющим пространственное распределение, литолого-минералогические особенности и условия формирования осадочных отложений в долине реки Сенца. Тектоническая активность данного региона формирует перепады высот, что определяет энергию водного потока. В зонах активного течения реки Сенци накапливаются крупнозернистые, хорошо отсортированные пески с высоким содержанием кварца, тогда как в понижениях и расширенных участках долины осаждаются тонкозернистые илы и глины.

Комплексное изучение этих процессов позволяет не только реконструировать историю геологического развития региона, но и выявить закономерности взаимодействия эндогенных и экзогенных факторов в формировании речных долин горных областей.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Васильчук Ю.К., Пеллинен В.А., Светлаков А.А.** Строение, гранулометрический и минералогический состав рыхлых отложений в долине р. Сенца (Восточный Саян) // Арктика и Антарктика. 2024. № 3. С. 1-29.

2. **Добрецов Н.Л.** О покровной тектонике Восточного Саяна // Геотектоника. 1985. № 1. С. 46-49.

3. **Федотова А.А., Хаин Е.В.** Тектоника юга Восточного Саяна и его положение в Урало-Монгольском поясе. М.: Научный мир, 2002. 200 с.

КОЛЕБАНИЯ УРОВНЯ ЯПОНСКОГО МОРЯ В ГОЛОЦЕНЕ ПО ДАННЫМ ДИАТОМОВОГО АНАЛИЗА

Е.А. Элбакидзе

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: ekato21@mail.ru

Аннотация. На основе изменения таксономического состава и экологической структуры диатомовых сообществ из донных отложений пойменной террасы р. Раздольной и оз. Птичье были выделены диатомовые зоны, выявлена сложная палеоклиматическая и связанная с ней трансгрессивно-регрессивная ритмика Японского моря в голоцене.

FLUCTUATIONS IN THE LEVEL OF THE SEA OF JAPAN IN HOLOCENE ACCORDING TO DIATOM ANALYSIS

E.A. Elbakidze

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: ekato21@mail.ru

Abstract. Based on changes in the taxonomic composition and ecological structure of diatom communities from the sediments of the Razdolnaya River terrace and Lake Ptichye, diatom zones were identified, revealing the complex paleoclimatic and associated transgressive-regressive rhythms of the Sea of Japan during the Holocene.

Отложения прибрежных водоемов и речных долин являются надежным источником информации о палеоклиматических и трансгрессивных циклах. Диатомеи чувствительны к изменениям солености, глубины, гидрологическим условиям бассейна и поэтому служат надежными индикаторами морских трансгрессий. Целью данной работы было определение глубины проникновения морских вод в нижние части речных долин и прибрежного озера в Южном Приморье, а также масштабов их затопления во время колебаний уровня моря на основе комплексного анализа диатомовой флоры. Материалом для исследования послужили образцы, отобранные из отложений пойменной террасы (4005 Б-24) высотой 3 м на правом берегу р. Раздольной (23 км от морского побережья) и из колонки ТБ-5, поднятой в северо-восточной части оз. Птичье. Отложения террасы представлены песками, супесью и суглинком. Методом диатомового анализа изучено 20 проб из разреза, по остаткам древесины получены радиоуглеродные датировки, свидетельствующие о том, что осадки сформировались во время оптимума голоцена [3]. Из колонки ТБ-5 изучено 40 проб. По раковинам моллюсков из осадков получены

радиоуглеродные датировки, свидетельствующие о том, что отложения накапливались в среднем голоцене [2].

Обработку образцов проводили по стандартной методике [4]. В работе использована систематика диатомей согласно Algaebase (https://www.algaebase.org/). Идентификация видов диатомей осуществлялась с помощью определителей. С целью обобщения данных об изменениях в палеосообществах диатомей использовался метод главных компонент (PCA) [7].

Изученная диатомовая флора из отложений пойменной террасы представлена 226 видами и внутривидовыми разновидностями, принадлежащими к 39 родам, относящимся к экологическим группам: болотные (БЛ), пресноводные бентосные (ПБ), пресноводные планктонные (ПП), солоноватоводные (СЛ), морские бентосные (МБ), переотложенные (ПР). Диатомовый комплекс rDZ1 (3–1.75 м) характеризуется преобладанием болотных (33%) и пресноводных планктонных видов (27%), при доминировании переотложенных форм (87%). Из отложений зоны по древесине получена радиоуглеродная датировка 7240±120 л. ^{14}C (Ки-2365), что соответствует переходу от бореала к атлантику. В интервале комплекса rDZ1 выделены две подзоны. Доминирующую группу подзоны rDZ1.1 (3–2.8 м) составляют переотложенные виды (52%), высокие оценки обилия имеет *A. praegranulata* var. *praeislandica* (50.8%). Также отмечается участие пресноводных бентосных видов (27%) *P. borealis* (10.9%) на фоне постепенного увеличения числа болотных (22%) – *H. amphioxys* (20.8%). Комплекс rDZ1.2 (2.8-1.75 м) характеризуется доминированием представителей переотложенной группы (87%) на фоне увеличения числа болотной группы (33%). Для отложений данного комплекса получена радиоуглеродная датировка 6530±75 л. ^{14}C (Ки-2359). Комплекс rDZ2 (1.75-1.3 м) фиксирует доминирование групп пресноводные планктонные (67.5%) и болотные (27%) на фоне резкого сокращения численности ПР-группы (9%). Из этих отложений получена радиоуглеродная датировка 4600 ± 60 л. ^{14}C (Ки-3679). Комплекс rDZ3 (1.3–0.45 м) характеризуется уменьшением, но еще преобладанием группы ПП (53%), на фоне увеличения численности групп МБ (42%) и СВ (23%), при доминировании ПР-группы (80%). В данной зоне также выделено две подзоны. Подзона rDZ3.1 (1.3–1.1 м) отмечается максимальным ростом численности видов МБ (43%). Доминирующую группу подзоны rDZ3.2 (1.1-0.45 м) составляет ПР-группа (75%) *A. praegranulata* var. *praeislandica* (73%) на фоне роста численности СВ-группы (20%) *C. pusilla* (4.7%). Комплекс rDZ4 (0.45-0 м) характеризуется преобладанием ПР-группы (95%) на фоне сокращения участия остальных групп. Формирование этих отложений относится к фазе похолодания на границе суббореал-субатлантик, чему не противоречит и датировка 1930 ± 40 л. ^{14}C (Ки-3678).

Изученная диатомовая флора оз. Птичье представлена 135 видами и внутривидовыми таксонами. Анализ изменений процентного содержания таксонов и представителей экологических групп позволил выделить три

диатомовых зоны и четыре подзоны, фиксирующие этапы развития озера. Изучение современных диатомей оз. Птичье показало присутствие, помимо пресноводных таксонов, солоноватоводно-морских *Cocconeis scutellum* и морских форм – *Tryblionella granulata, Tabularia fasciculata, Cocconeis distans* [2]. Эти же виды обнаружены нами при изучении диатомей в голоценовых осадках озера, что, очевидно, свидетельствует о воздействии наступающего моря и отражается на осадконакоплении в озере. В интервале 1330-1005 см выделена tDZ1 зона. Ее особенностью является преобладание (60%) таксонов морской сублиторально-бентосной группы, среди которых наибольшую численность имеют представители рода *Diploneis-D. smithii* и *D. subcincta.* В формировании комплекса участвуют также и переотложенные древние диатомеи, доминант – пресноводная *A. praegranulata*. Изменения участия представителей морской сублиторально бентосной и морской неретической групп, а также отдельных доминирующих таксонов, позволили выделить в интервале зоны tDZ1 две подзоны. Осадки tDZ1.1 подзоны, выделенной в интервале 1330-1190 см, отражают палеоэкологические обстановки, фиксирующие доминирование группы сублиторальных бентосных видов, в которой наиболее разнообразен род *Diploneis*, а также присутствие спор рода *Chaetoceros* из морской неритической группы. Это указывает на образование осадков во время ещё не самого высокого стояния уровня моря в период трансгрессии и более прохладного климата. Тенденция повышения уровня моря отражается в подзоне tDZ1.2 (1190-1005 см), поскольку формирование данных осадков могло происходить во время активных гидродинамических процессов в бассейне озера в конце голоцена, на что указывают изменения в соотношении доминирования морских неритических и сублиторальных бентосных групп. Скорее всего, осадки данной подзоны зафиксировали начало морской трансгрессии. В интервале 1005-460 см выделена зона tDZ2, характеризующаяся самыми высокими показателями обилия таксонов морской неритической группы (до 70%), в которой преобладает *A. senarius, P. glacialis*. Изменения количества представителей морской неретической и солоноватоводно-планктонной групп, а также отдельных доминирующих таксонов, позволили выделить в интервале зоны tDZ2 две подзоны. Экологическая структура комплекса подзоны tDZ2.1 (1005-780 см) отражает переходный момент, фиксирующий тенденцию к потеплению и повышению уровня моря. На это указывает увеличение численности неритических таксонов и уменьшение участия сублиторально бентических форм. Выводы о палеообстановках подтверждаются увеличением численности таксонов сублиторально-планктонной группы, с доминированием мезогалобной *O. aurita.* Экологическая структура подзоны tDZ2.2 (780-460 см) представлена преобладанием представителей морской неритической группы, доминанты *A. senarius, P. glacialis* и северо-бореально океаническая *Thalassiosira tenera* [4]. Рост планктонных и сублиторальных планктонных форм отражает период

климатического потепления, повышения уровня моря, изменения солености, увеличение разнообразия пресноводной группы за счет крупностворчатых видов *E. adnata, A. praedistans, P. brevicostata.* Осадки подзоны фиксировали период морской трансгрессии. В интервале 460-165 см выделена диатомовая зона tDZ3. Экологическая структура зоны свидетельствует о понижении уровня моря, похолодании климата и увеличении воздействия речного стока на водоем. Отмечается снижение количества таксонов морской неритической группы и увеличение обилия сублиторальной бентосной группы. Постепенно снижается обилие таксонов пресноводной и переотложенной групп. В осадках зоны обнаружен солоноватоводный сублиторальный бентосный вид *Terpsinoë americana*, являющийся тропическим эпифитом, обитающим в соленых прибрежных водах до 45° с. и ю.ш. [2]. Можно предположить, что осадки данной зоны фиксируют регрессию Японского моря.

Исследование показало, что диатомовые сообщества изменялись в ответ на колебания палеоклиматических условий и уровня моря в течение голоценового оптимума. Исследуя лагунно-морской, озерно-аллювиальный и болотный диатомовые комплексы, можно говорить о степени колебаний уровня Японского моря и масштабе проникновения морских вод в долину р. Раздольной. Глубина вторжения морской воды составила до 23 км вглубь от побережья и зафиксирована в период оптимума голоцена, когда уровень моря мог быть на 2-3 м выше современного, что отражалось на процессах формирования берегов.

На основе изменения таксономического состава и экологической структуры изученых диатомей из колонки ТБ-5 было выделено три диатомовых зоны, соответствующие разным этапам голоценового трансгрессивно-регрессивного цикла Японского моря. Установлена реакция диатомей на изменения гидрологического режима озера в среднем голоцене в условиях завершающей стадии трансгрессии и последовавшей за ней регрессии моря. Полученные результаты способствуют лучшему пониманию взаимодействия между климатом, уровнем моря и диатомовыми сообществами в прошлом.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гири М.Д., Гири Г.М.** AlgaeBase. World-wide electron. (Nat. Univ. Ireland, Galway, 2024) https://www.algaebase.org.

2. **Микишин Ю.А., Гвоздева И.Г., Элбакидзе Е.А.** Морское осадконакопление на побережье юго-западной окраины Приморья в среднем голоцене // Тихоокеанская геология. 2024. Т. 43. № 5. С. 39–53.

3. **Павлюткин Б.И., Белянина Н.И.** Четвертичные отложения Приморья: некоторые итоги систематизации и дальнейшие перспективы изучения // Тихоокеанская геология. 2002. Т. 21. № 3. С. 80-93.

4. **Прошкина-Лавренко А.И.** Диатомовые водоросли СССР (ископаемые и современные). Т. 1. Л.: Наука, 1974. 403 с.

5. **Пушкарь В.С., Черепанова М.В.** Диатомовые комплексы и корреляция четвертичных отложений северо-западной части Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2008. 174 с.

6. **Черепанова М.В., Лепская Е.В., Андерсон П., Ложкин А.В.** Диатомовые водоросли из голоценовых осадков оз. Нерпичье (Камчатка) // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и Северо-западной части Тихого океана. 2013. Вып. 31. С. 89-106.

7. **Элбакидзе Е.А., Романова А.В.** Использование метода главных компонент при интерпретации данных диатомового анализа голоценовых осадков оз. Птичье (Южное Приморье) // Вестник Северо-восточного научного центра ДВО РАН. 2024. С. 124-135.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ И УСЛОВИЯ ПРОЯВЛЕНИЯ РУДООБРАЗУЮЩИХ СИСТЕМ В РАЗЛИЧНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ОБСТАНОВКАХ

METALLOGENY AND CONDITIONS FOR ORE-FORMING SYSTEMS INITIATION IN DIFFERENT GEODYNAMIC SETTINGS

ЦВИТТЕР-ТУРМАЛИНИТОВЫЙ МЕТАСОМАТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС, СВЯЗАННЫЙ С ЛИТИЙ-ФТОРИСТЫМИ ГРАНИТАМИ СЕВЕРНОГО МАССИВА (ЧУКОТКА)

В.И. Алексеев

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, e-mail: alekseev_vi@pers.spmi.ru

Аннотация. Выделен цвиттер-турмалинитовый метасоматический комплекс Северного массива на Чукотке. Комплекс характеризуется пространственным сопряжением и зональным размещением относительно интрузий литий-фтористых гранитов, общностью акцессорной минерализации метасоматитов и жил, закономерной петролого-геохимической эволюцией и последовательностью образования метасоматитов.

ZWITTER-TOURMALINITE METASOMATIC COMPLEX ASSOCIATED WITH LITHIUM-FLUORIC GRANITES OF THE SEVERNYI MASSIF (CHUKOTKA)

V.I. Alekseev

Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, e-mail: alekseev_vi@pers.spmi.ru

Abstract. Zwitter-tourmalinite metasomatic complex of the Severnyi massif in Chukotka was identified. The complex is characterized by spatial conjugation and zonal arrangement relative to intrusions of lithium-fluoric granites, commonality of accessory mineralization of metasomatites and veins, natural petrological-geochemical evolution and sequence of metasomatite formation.

Северный гранитный массив расположен на восточном побережье Чаунской губы (Чукотка) и входит в состав Куйвивеем-Пыркакайского рудного района, включающего группу крупных месторождений олова Пыркакайского рудного узла с запасами 231.6 тыс.т [2]. Пыркакайские штокверки, локализованные в южном экзоконтакте Северного массива, относятся к касситерит-кварцевому типу, а месторождения самого массива (Северного рудного узла) принадлежат на первый взгляд к касситерит-силикатному типу, так как представляют собой оловорудные жилы турмалинитов. Турмалиниты ассоциируют с высокофтористыми циннвальдитовыми грейзенами – цвиттерами. Цель доклада: обсудить состав и происхождение метасоматического цвиттер-турмалинитового комплекса Северного массива.

В районе выделены гидротермально-метасоматические образования пяти стадий: 1) альбитовые метасоматиты, 2) цвиттеры, 3) турмалиниты, 4)

хлоритовые метасоматиты, 5) аргиллизиты. Наиболее распространенными метасоматитами на месторождениях и рудопроявлениях олова в центральной части Северного массива являются цвиттеры и турмалиниты. Здесь в биотитовых лейкогранитах чаунского комплекса залегают пластовые интрузии Li-F гранитов пыркакайского комплекса, сопровождаемые онгонитами и пегматитами [1].

Цвиттеры – топаз-циннвальдит-кварцевые метасоматиты с редкометалльной акцессорной минерализацией: иттрофлюорит, (монацит-(Ce), Sn-Nb-W-содержащий рутил, вольфрамоиксиолит, W-содержащий колумбит-(Mn), вольфрамит, W-содержащий ильменит, берилл, ксенотим-(Y), уранополикраз, ишикаваит, арсенопирит, висмут, висмутин. Установлены две формы проявления цвиттеров: слабые цвиттеровые изменения лейкогранитов в сводовой части батолита и метасоматические тела в висячем эндо-экзоконтакте силлов Li-F гранитов. Слабая цвиттеризация (1–15% новообразованных минералов) развита на площади более 200 км^2 и на глубину до 400 м. Вблизи малых интрузий Li-F гранитов залегают пластовые залежи и крутопадающие зоны цвиттеров мощностью до 4.5 м и протяженностью до 70 м.

Турмалиниты представляют собой крутозалегающие кварц-турмалиновые жилы с околожильными турмалинсодержащими метасоматитами мощностью до 2.5 м и протяженностью до 200 м. В состав турмалинитов входят мусковит, альбит, адуляр, серицит и акцессорные минералы: флюорит, касситерит, монацит-(Ce), висмутопирохлор, ксенотим-(Y), апатит-(CaF), флюоцерит-(Ce), иттрофлюорит, алланит-(Ce), алланит-(Y), черновит-(Y), агардит-(Y), халькопирит, пирит. По составу и зональности околожильных ореолов выделены фации турмалин-кварц-мусковитовых, альбит-турмалиновых и адуляр-турмалиновых метасоматитов. Жилы турмалинитов рассекают тела цвиттеров. Турмалин-кварц-мусковитовые метасоматиты, замещающие цвиттеры, представлены специфическими "телескопированными грейзенами" турмалин-флюорит-топаз-мусковитового состава.

В генеральной совокупности из 1200 геохимических проб были отобраны петрологические выборки гранитоидов, цвиттеров и турмалинитов. Факторный анализ методом главных компонент позволил установить генеральный тренд геохимической эволюции цвиттер-турмалинитового метасоматического комплекса Северного рудного узла, зафиксированный главным фактором F_1. На этапе становления Li-F гранитов и стадии формирования цвиттеров (нагрузка на F_1 +0.62 ÷ 0.93) зарождается редкометалльная ассоциация: F, Nb, W, Bi, Y, REE, Li, Be, As, Ge. На стадии турмалинизации эта ассоциация частично наследуется и трансформируется в области (F_1 –0.34 ÷ 0,77): B, Sn, As, REE, Y, W, Cu, Zn, Ag, Sb, Ge (рис. 1).

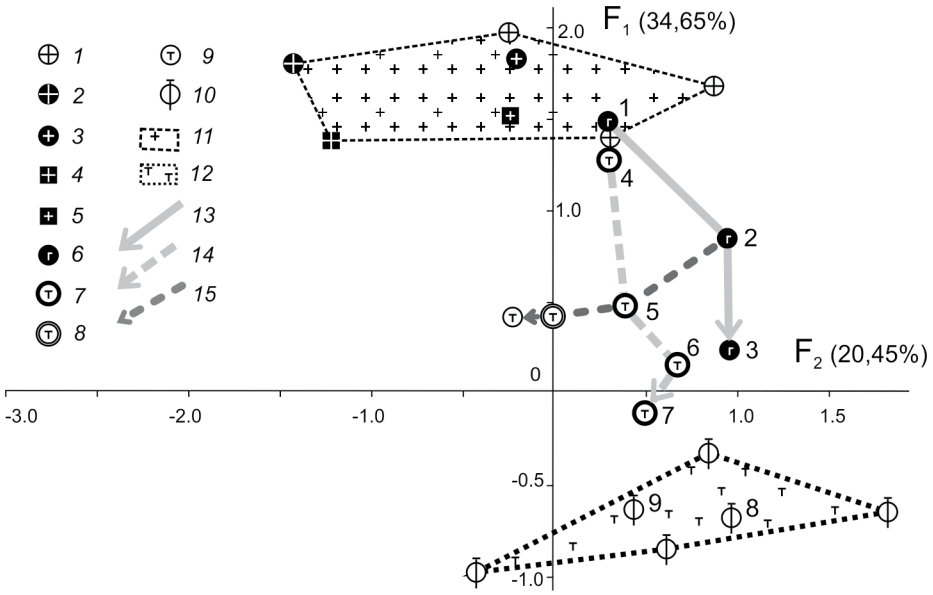


Рисунок 1. Петролого-геохимическая эволюция цвиттер-турмалинитового метасоматического комплекса Северного массива на диаграмме значений первого (F_1) и второго (F_2) факторов (в скобках вес фактора).

1 – вмещающие лейкограниты чаунского комплекса, 2 – Li-F граниты, 3 – онгониты, 4 – пегматиты, 5 – штокшайдеры, 6 – цвиттеры, 7 – турмалин-кварц-мусковитовые метасоматиты, 8 – альбит-турмалиновые метасоматиты, 9 – адуляр-турмалиновые метасоматиты, 10 – жилы турмалинитов, 11 – поле гранитов, 12 – поле жил турмалинитов, 13-14 – геохимические тренды эволюции метасоматитов: 13 – цвиттеров, 14 – турмалин-кварц-мусковитовых метасоматитов, 15 – разностадийных метасоматитов по вертикали (снизу вверх).

Цифры на диаграмме: 1 – слабо цвиттеризированные лейкограниты, 2 – цвиттеры, 3 – "телескопированные грейзены", 4-7 – изменения турмалин-кварц-мусковитовой фации: 4 – слабые, 5 – умеренные, 6 – сильные, 7 – полные; 8 – жилы турмалинитов с касситеритом, 9 – жилы турмалинитов с редкоземельными минералами.

Figure 1. Petrology-geochemical evolution of the zwitter-tourmalinite metasomatic complex of the Severnyi massif on the diagram of the values of the first (F_1) and second (F_2) factors (factor weight in brackets).

1 – containing leukogranites of the Chaun complex, 2 – Li-F granites, 3 – ongonites, 4 – pegmatites, 5 – stockscheiders, 6 – zwitters, 7 – tourmaline-quartz-muscovite metasomatites, 8 – albite-tourmaline metasomatites, 9 – adular-tourmaline metasomatites, 10 – tourmalinite veins, 11 – granite field, 12 – tourmalinite veins field, 13-14 – geochemical trends of metasomatite evolution: 13 – zwitters, 14 – tourmaline-quartz-muscovite metasomatites, 15 – vertical differential metasomatites (from bottom to top).

Numbers on the diagram: 1 – weakly zwitterized leukogranites, 2 – zwitters, 3 – "telescopic greisen", 4-7 – changes in tourmaline-quartz-muscovite facies: 4 – weak, 5 – moderate, 6 – strong, 7 – complete; 8 – tourmalinite veins with cassiterite, 9 – tourmalinite veins with rare earth minerals.

Фактор F_2 фиксирует вертикальную зональность Северного рудного узла: подрудное сечение с цвиттерами – рудное сечение с турмалин-кварц-мусковитовыми метасоматитами – верхнерудное сечение с турмалин-альбитовыми и турмалин-адуляровыми метасоматитами (рис. 1). Цвиттеры и турмалиниты Северного массива образуют генетически единую ассоциацию с Li-F гранитами:

1. Метасоматиты локализованы в ареалах развития Li-F гранитов и размещаются зонально относительно интрузий.

2. Цвиттеры и турмалиниты образованы последовательно на стадиях кислотного выщелачивания и нейтральной щелочности гидротермальных растворов одного цикла развития метасоматической системы [4].

3. Метасоматиты и Li-F граниты обладают сходством акцессорной минерализации и геохимической специализации.

4. Установлена единая петролого-геохимическая эволюция цвиттеров и турмалинитов.

5. Разностадийные метасоматиты закономерно размещены по вертикали.

Таким образом, в Северном массиве установлен цвиттер-турмалинитовый метасоматический комплекс, связанный с Li-F гранитами и характерный для крупных редкометалльно-оловорудных месторождений, таких как Правоурмийское (Приамурье) [2], Кугарок (Аляска) [7], Эренфридерсдорф (Германия) [6], Кестер (Якутия) и др. [1, 5].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Алексеев В.И.** Рудоносные метасоматиты, сопряженные с литий-фтористыми гранитами Северного массива (Чаун-Чукотка) // Тихоокеанская геология. 2025. Т. 44. № 3. С. 18-32.

2. **Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России:** в 2 кн. / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. 981 с.

3. **Гоневчук В.Г.** Оловоносные магматические системы Дальнего Востока: магматизм и рудогенез. Владивосток: Дальнаука, 2002. 295 с.

4. **Петрографический кодекс. Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования.** Изд-е третье, испр.и доп. СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. 199 с.

5. **Томсон И.Н., Тананаева Г.А.** Базовая формация оловорудных цвиттеров и их соотношение с сопутствующими жильными месторождениями // Этапы образования рудных формаций. М.: Наука, 1989. С. 72-78.

6. **Seifert Th., Kempe U.** Sn-W-Lagerstatten und spatvariszische Magmatite des Erzgebirges // Beih. z. Eur. J. Mineral. 1994. V. 6. N 2. P. 125-172.

7. **Soloviev S.G., Kryazhev S., Dvurechenskaya S.** Geology, igneous geochemistry, mineralization, and fluid inclusion characteristics of the Kougarok tin-tantalum-lithium prospect, Seward Peninsula, Alaska, USA // Mineralium Deposita. 2020. V. 55. P. 79-106.

ПОДОЛЬСКОЕ КОЛЧЕДАННОЕ МЕСТОРОЖДЕНИЕ (ЮЖНЫЙ УРАЛ): ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ МЕТАЛЛОВ В РУДАХ И В ОТДЕЛЬНЫХ РУДНЫХ МИНЕРАЛАХ

Е.Е. Амплиева[1], Е.В. Ковальчук[1,2], В.Б. Комаров[1,3], В.Д. Абрамова[1]

[1]Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, e-mail: Amplieva@igem.ru

[2]Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе, г. Москва

[3]Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы, г. Москва

Аннотация. Подольское месторождение уральского типа локализовано в восточной части Бурибайского рудного района, в Западно-Магнитогорской зоне Южного Урала. Главные рудные минералы — пирит, халькопирит, сфалерит; второстепенные — теннантит, галенит, марказит, борнит и др. Впервые сфалерит из руд Подольского месторождения был изучен методом LA-ICP-MS. Исследование состава сфалерита этим методом выявило зерна с разным содержанием Fe: 260 – 530 ppm и 1100 – 5150 ppm; содержание Mn — от 4 до 43 ppm; содержание Cd — от 2000 до 3166 ppm; In– от 10 до 86,5 ppm. Ag обнаружен в очень незначительных количествах, до 50 ppm. Содержания Co, As, Bi, Mn, Pb, Sb, Se, Sn, Ru, Te и Au находятся на переделе обнаружения метода LA-ICP-MS либо ниже его.

THE PODOLSKOEVMS DEPOSIT (SOUTHERN URALS): DISTRIBUTION OF STRATEGIC METALS IN SULPHIDE ORES AND SULPHIDES

E.E. Amplieva[1], E.V. Kovalchuk[1,2], V.B. Komarov[1,3], V.D. Abramova[1]

[1]Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, e-mail: Amplieva@igem.ru

[2]Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow

[3]Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russia

Abstract. The Podolsk VMS deposit of the Ural type is localized in the eastern part of the Buribay ore district, in the West Magnitogorsk zone of the Southern Urals. Pyrite, chalcopyrite, sphalerite are the major ore minerals, tennantite, galena, marcasite, bornite are less abundant. Sphalerite is the main Zn mineral of ores. Sphalerite of the Podolskoe and Vostochno-Podolskoye deposits was investigated using LA-ICP-MS. Sphalerite grains are divided into two groups according to Fe content: 260 – 530 ppm and 1100 – 5150 ppm. The Mn content varies from 4 to 43 ppm; the Cd content from 2000 to 3166 ppm; In – from 10 to 86.5 ppm. The contents of Co, As, Bi, Mn, Pb, Sb, Se, Sn, Ru, Te and Au are below of the detection limit of the LA-ICP-MS method.

Крупное Подольское медно-цинковоколчеданное месторождение уральского типа открыто в 1971 г. [2]. Месторождение локализовано в восточной части Бурибайского рудного района, в пределах Тубинско-Гайского пояса, расположенного в Западно-Магнитогорской зоне Южного Урала. Массивные и прожилково-вкрапленные рудные тела Подольского месторождения расположены на нескольких рудоносных уровнях. Главная залежь месторождения сложена массивными рудами пиритового, халькопирит-пиритового, сфалерит-халькопирит-пиритового и сфалерит-пиритового минеральных типов. Главные рудные минералы — пирит, халькопирит, сфалерит; второстепенные — теннантит, галенит, марказит, борнит, германит, рутил, ковеллин, гематит, магнетит, висмутин, пирротин, самородное золото. Нерудные минералы — кварц, барит, кальцит, хлорит, диккит, серицит, гипс, ангидрит [1, 3, 4, 5].

Сфалерит является основным цинксодержащим минералом руд. Также сфалерит является важным минералом-носителем широкого спектра попутных элементов-примесей. В ряде месторождений сфалерит может содержать значимые концентрации Cd, Ga, Ge, In и Ag [7]. Выделения этого минерала в рудах месторождений Подольского месторождения разнообразны как по размерам, так и по морфологии. Сфалерит встречается в виде тонких и сложных срастаний с рудообразующими сульфидами, в виде самостоятельных ксеноморфных зерен и их скоплений, а также образует прожилки. Обнаружена цинковая вкрапленная руда, сложенная преимущественно сфалеритом, который представлен отдельными относительно крупными зернами (~1-1,5 мм) и их агрегатами. При микроскопическом изучении установлено, что эти зерна трещиноваты, границы зерен извилистые, местами зубчатые. Характерной особенностью сфалерита являются эмульсиевидные включения халькопирита. Такие включения по размерам редко превышают 1 мкм. Они разнообразны по формам и типам распределения. Распределение включений халькопирита часто носит закономерный характер — они образуют полосы, распределяющиеся параллельно зонам роста, подчеркивая внутреннее строение кристаллов сфалерита. Наряду с зональным, в

некоторых сфалеритовых зернах отмечается равномерное распределение мельчайших включений халькопирита.

Сфалерит из руд Подольского и Восточно-Подольского месторождений был изучен методом РСМА. Определение химического состава образцов проводилось в ЦКП ИГЕМ РАН, аналитик — Е. В. Ковальчук. Химический состав сульфидных минералов изучался на электронно-зондовом микроанализаторе JEOL JXA-8200, оснащенном пятью волновыми и одним энергодисперсионным кристаллами при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе зонда 20 нА и диаметре пучка 1 мкм. Анализ проводился по профилям, проходящим через «чистые» и «зараженные» халькопиритом участки сфалерита, а также в зернах без эмульсиевидных включений халькопирита.

Исследование состава различных зерен сфалерита Подольского месторождения показало, что содержание железа составляет 0.04 – 3.29 мас. % (90% всех анализов находится в интервале до 1 мас. %). Содержание Cu незначительное: большая часть всех анализов находится в интервале до 1 мас. %. Содержание Cd от 0.03 мас. % до 0.65 мас. %. Содержание In не превышает 0.10 мас. % (предел обнаружения метода — 0.05 мас. %). Примесей Mn, Hg, Sn не обнаружено.

Впервые сфалерит Подольского месторождения был изучен методом LA-ICP-MS для определения содержания и распределения Ag, As, Bi, Cd, Co, Cu, Fe, In, Mn, Ni, Pb, Sb, Se, Sn, Ru, Te и Au. Определение химического состава образцов проводилось в ЦКП ИГЕМ РАН по методике [6].

Fe присутствует во всех проанализированных выделениях сфалерита. Исследование состава сфалерита этим методом выявило в сфалеритовых агрегатах присутствие зерен с разным содержанием Fe: 260 – 530 ppm и 1100 – 5150 ppm.

Содержание Mn в сфалерите колеблется от первых до нескольких десятков ppm (4 – 43ppm), что в целом характерно для природного сфалерита различных месторождений; каких-либо закономерностей в распределении марганца не обнаружено.

По данным метода LA-ICP-MS, содержание Co в различных типах руд Подольского месторождения ниже предела обнаружения.

Содержание Cd в сфалерите составляет от 2000 до 3166 ppm. In обнаружен во всех исследованных образцах, содержание его в сфалерите Подольского месторождения составляет от 10 до 86,5 ppm. Ag также обнаружено во всех исследованных образцах, но в очень незначительных количествах, 90% всех анализов колеблется в интервале до 50 ppm. Содержания As, Bi, Mn, Pb, Sb, Se, Sn, Ru, Te и Au находятся на переделе обнаружения метода LA-ICP-MS либо ниже его.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.24.44 (Соглашение № 075-15-2024-641 от 12 июля 2024 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Косарев А.М., Серавкин И.Б., Шафигуллина Г.Т.** Субщелочной и известково-щелочной вулканизм раннеэйфельского возраста и связанное с ним колчеданное полиметаллическое оруденение в Магнитогорской мегазоне Южного Урала // Литосфера. 2017. Т. 17. № 3. С. 29—58.

2. **Прокин В.А.** Открытие медноколчеданных месторождений в Башкортостане // Геология. Известия Отделения наук о Земле и природных ресурсов АН Республики Башкортостан. 2010. № 15. С. 96—99.

3. **Прокин В.А., Болотин Ю.А., Шигарев В.Г., Исмагилов М.И.** Подольское медноколчеданное месторождение на Южном Урале // Геология рудных месторождений. 1979. Т. 21. № 5. С. 3—17.

4. **Салихов Д.Н., Холоднов В.В., Пучков В.Н., Рахимов И.Р.** Субдукция, коллизия и плюмы в эпоху позднепалеозойского магматизма Магнитогорской зоны Южного Урала // Литосфера. 2019. Т. 19. № 2. С. 191–208.

5. **Серавкин И.Б., Косарев А.М.** Палеовулканическая история формирования Подольского рудного поля и месторождения (Южный Урал) // Геология рудных месторождений. 1983. Т. 25. № 5. С. 72—86.

6. **Тонкачеев Д.Е., Чареев Д.А., Абрамова В.Д., Ковальчук Е.В., Викентьев И.В., Тагиров Б.Р.** Механизм вхождения Au в In-, Fe- и In-Fe-содержащие синтетические кристаллы сфалерита по данным РСМА и ЛА-ИСП-МС //Литосфера. 2019. Т. 19. № 1. С. 148–161.

7. **Cook N.J., Ciobanu C.L., Pring A., Skiner W., Shimizu M., Danushevsky L., Melcher F.** Trace and minor elements in sphalerite // Geochim. Cosmohim. Acta. 2009. V. 73. P. 4761-4791.

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЦИРКОНА РУДОНОСНЫХ ЛЕЙКОГРАНИТ-АЛЯСКИТОВЫХ АССОЦИАЦИЙ ПОРОД РЕДКОМЕТАЛЛЬНЫХ ПРОВИНЦИЙ ФАНЕРОЗОЯ И ЕГО ПЕТРОГЕНЕТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ (НА ПРИМЕРЕ ЦЕНТРАЛЬНОГО И ВОСТОЧНОГО ЗАБАЙКАЛЬЯ)

Е.В. Баданина, Л.Ф. Сырицо, А.Ю Кухта

Санкт-Петербургский государственный Университет, СПбГУ, г. Санкт-Петербург, e-mail: e.badanina@spbu.ru

Аннотация. Рудоносные формации лейкогранит-аляскитовых пород, слагающих мезозойские интрузивы Забайкалья, характеризуются особенностями строения кристаллов циркона, составом и степенью их обогащения изоморфными и несовместимыми элементами. Геохимический состав циркона определяется составом субстрата плавления, условиями кристаллизации расплава и степенью воздействия ювенильного вещества.

GEOCHEMICAL FEATURES OF ZIRCON OF ORE-BEARING LEUCOGRANITE-ALASKITE ASSOCIATIONS OF ROCKS OF RARE-METAL PROVINCES OF THE PHANEROZOIC AND ITS PETROGENETIC SIGNIFICANCE (ON THE EXAMPLE OF CENTRAL AND EASTERN TRANSBAIKALIA)

E.V. Badanina, L.F. Syritso, A.Yu. Kukhta

St. Petersburg State University, SPbSU, St. Petersburg, e-mail: e.badanina@spbu.ru

Abstract.The ore-bearing formations of leucogranite-alaskite rocks composing the Mesozoic intrusions of Transbaikalia are characterized by the structural features of zircon crystals, the composition and degree of their enrichment with isomorphic and incompatible elements. The geochemical composition of zircon is determined by the composition of the melting substrate, the crystallization conditions of the melt, and the degree of exposure to juvenile matter.

Мезозойские полиформационные гранитоидные интрузивы Забайкалья — источник оловянно-вольфрамового и редкометалльного оруденения представлены двумя главными рудоносными формациями и соответствуют «стандартному» и Li-F геохимическим типам гранитов. В каждой провинции биотитовые граниты подобных интрузивов относятся к одному известному и в большинстве случаев хорошо изученному интрузивному комплексу, соответствующему геохимическому типу плюмазитовых редкометалльных

гранитов: кукульбейский и шумиловский комплексы в Забайкалье, вознесенский в Приморье, калгутинский на Горном Алтае, яньшанский в юго-восточном Китае, рудогорский в Чехии и др.

В Забайкалье основной объём этих интрузивов слагают стандартные биотитовые граниты с тенденцией к образованию ряда соответствующих дифференциатов лейкогранит-аляскитовой формации: от крупно-среднезернистых биотитовых гранитов до мелкозернистых мусковитовых микроклин-альбитовых гранитов и кварц-мусковитовых грейзенов с вольфрамовой минерализацией. В то время как Li-F тип гранитов представлен лишь фрагментарно в виде секущих более поздних фаз – даек или штоков, «оторванных от корневых частей» так называемых материнских гранитов. Биотитовые граниты этих интрузивов отдельными исследователями рассматривались как исходные породы для ряда вольфрамоносных дифференциатов лейкогранит-аляскитовой формации, завершающиеся вольфрамовым оруденением; другими — как материнские для дифференциатов обеих формаций.

Для изучения характера взаимоотношения обеих формаций и оценки различий их в исходном расплаве в пределах единого интрузива нами используются известные петрогенетические индикаторы геохимии циркона. Модельными объектами послужили цирконы пород мезозойских рудоносных полиформационных Ханилайского, Шумиловского и Тургинского интрузивов, лейкогранит-аляскитовой формации Саханайского и Дурулгуевского интрузивов, а также, для сравнения, палеозойского батолитового даурского комплекса диорит-гранодиоритовой формации. Кроме того, получены первые результаты изучения циркона Сандуганского и Куйбышевского массивов в Южном Приморье, представляющих собой редкометалльные граниты U-Th-РЗЭ специализации.

Результаты исследования сводятся к следующему.

Для циркона Li-F формации Забайкалья характерна значительная обогащённость совместимыми с кристаллической структурой тугоплавкими элементами, прежде всего Hf, содержание которого достигает 12 масс.% HfO_2, а также U, Th, РЗЭ, максимальная концентрация которых устанавливается в рудоносных амазонитовых гранитах Этыкинского массива (до 73080 ppm U, 10982 ppm Th, 16498 ppm РЗЭ). При этом Hf отличается максимальной подвижностью накопления в процессе роста кристаллов. Циркон Li-F отличается единообразием мотива распределения РЗЭ как в Забайкалье, так и в других регионах, что проявляется в величине La/Yb-отношения, наличии контрастной отрицательной Eu-аномалии, являющейся показателем высокой степени дифференцированности расплава. Для циркона этих пород характерно слабое проявление или даже отсутствие положительной Ce-аномалии, рассматриваемой как признак магматогенного происхождения циркона. На общепринятых дискриминационных диаграммах La_N — Sm_N/La_N[6] циркон

Li-F гранитов занимает промежуточное положение между полями состава магматического и гидротермального генезиса, при этом состав зональных кристаллов наиболее дифференцированных рудоносных объектов (Орловка, Этыка) иногда образует непрерывный тренд перехода из магматогенного поля в гидротермальное, что находится в согласии с моделью происхождения Li-F гранитов и их кристаллизации из флюидонасыщенного расплава. Такое представление подтверждает насыщенность расплава примесными компонентами с накоплением во внешних зонах характерной ассоциации редких элементов и летучих компонентов — Li, Cs, Ta, Nb, F, H_2O, отражающих металлогеническую специализацию этих пород. Единообразие примесного состава циркона Li-F гранитов, наблюдаемое при сопоставлении с цирконом Приморья [4], Дальнего Востока [2], Рудных Гор Чехии [5] является следствием сходного механизма и условий кристаллизации флюидонасыщенного расплава, обогащённого флюсовыми и редкими элементами, с низкими величинами коэффициентов распределения минерал-расплав.

В отличие от Li-F гранитов циркон «стандартного» геохимического типа гранитов многообразен как по составу примесных элементов, так и по уровням их концентрации и тенденциям распределения в процессе роста кристалла. Здесь по геохимическому составу выделяются три типа циркона. (I) Циркон биотитовых гранитов классического петротипа лейкогранит-аляскитовой формации (без Li-F гранитов) Саханайского и Дурулгуевского массивов Агинского террейна характеризуется примитивным внутренним строением, крайне низкой концентрацией совместимых элементов. Тем не менее, при низкой концентрации РЗЭ, спектры их распределения характеризуются выраженной отрицательной Eu-аномалией, свидетельствующей о высокой степени фракционирования W-носного расплава. В Агинском террейне в качестве субстрата плавления рудоносных массивов кукульбейского комплекса рассматриваются терригенно-осадочные толщи девона-карбона [1]. Однако, в этих же породах залегает уникальный Хангилайский полиформационный интрузив, в биотитовых гранитах которого кристаллизуется принципиально иной зональный циркон (II), фиксирующий контрастную возрастную (254.7+5.1 Ma, 140.6+2.9 Ma) и геохимическую последовательность дорастания ксеногенного ядра циркона, бедного примесными элементами до уровня концентраций в цирконе Li-F гранитов. Вероятность воздействия ювенильного вещества на обогащение расплава этих пород (и циркона) примесными элементами определяется приуроченностью этого интрузива к глубинному региональному разлому (структурное несогласие вмещающих толщ). Реальность такого воздействия фиксируется нарушениями Rb-Sr и Sm-Nd изотопных систем пород и минералов, в том числе рудных, относительно исходных биотитовых гранитов [1, 3].

(III) Третий тип циркона характерен для «стандартных» биотитовых гранитов Шумиловского полиформационного интрузива в Даурском террейне,

представляющем собой структуру «купол в куполе», залегающего в поле развития батолитового магматизма диорит-гранодиорит-гранитовой формации. Этот циркон характеризуется сложным зональным строением, аномальной обогащённостью его ядерной части совместимыми элементами: прежде всего U (до 43527 г/т), Hf (23672 г/т), в меньшей мере Th (до 4374 г/т), тяжёлыми РЗЭ (8132 г/т), Y (до 13313 г/т), а также рядом несовместимых элементов — Nb, H_2O, F. Содержание указанных примесных элементов резко падает в последующей зоне роста. Своеобразие состава центральной зоны, её пористая структура, обилие минеральных включений, в составе которых установлены монацит и ксенотим, позволяют предполагать заимствование этой части циркона из пород протолита — гранитов поздней фазы вмещающего палеозойского даурского комплекса. Циркон из этих пород характеризуется сходной ассоциацией преобладающих совместимых (U, Hf) и несовместимых (Nb, H_2O, F, Li, Cs) элементов и аналогичной закономерностью распределения РЗЭ, однако концентрация их значительно ниже (урана в 5 раз) содержания в цирконе Шумиловского массива. Очевидно, именно состав субстрата плавления определяет геохимическое различие циркона аляскит-лейкогранитовой формации Даурской зоны от состава циркона этой формации в пределах Агинской зоны, субстратом плавления для которой послужили терригенно-осадочные толщи девон-карбона. Аномально высокое содержание урана в ядерных частях зёрен циркона биотитовых гранитов Шумиловского массива (до 43527 ppm) и резкое уменьшение его содержания во внешних зонах (до 9147ppm) создаёт весьма благоприятные условия для концентрации урана на послемагматическом этапе. В зонах окисления метасоматических пород ареала Шумиловского массива прослеживается обилие яркоокрашенного зеленовато-жёлтого отенита, что допускает концентрацию урана на более низкотемпературном этапе развития метасоматоза.

Получены первые результаты изучения состава циркона редкометалльных гранитов Сандуганского и Куйбышевского массивов, расположенных в юго-восточной части Приханкайского срединного массива Южного Приморья, известного уникальными редкометалльными гранитами. Интерес к изучаемым массивам определяется сложной металлогенической специализацией U-Th-РЗЭ (±Li) типа, высокой концентрацией урана в цирконе (до 4.7 мас. % UO_3) и длительностью формирования рудно-магматической системы. Возраст редкометалльных гранитов, определённый по составу Li-Fe фенгитов-мусковитов, укладывается в два временных интервала — 444.9 ± 2.4 Ma и 396.2 ± 2.2 Ma (Ar-Ar метод).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Абушкевич В.С., Сырицо Л.Ф.** Изотопно-геохимическая модель формирования Li-F гранитов Хангилайского рудного узла в Восточном Забайкалье. СПб: Наука, 2007. 147 с.

2. **Алексеев В.И., Марин Ю.Б.** Редкометальные оболочки циркона в литий-фтористых гранитах Дальнего Востока // Докл. АН. 2013. Т. 451. № 3. С. 314-317.

3. **Баданина Е.В., Сырицо Л.Ф., Иванова А.А., Ризванова Н.Г.** Возрастные и изотопно-геохимические характеристики Ta, Nb, W, Sn-минерализации, связанной с редкометальными гранитами (Хангилайский рудный узел, Восточное Забайкалье) // Петрология. 2023. Т. 31. № 4. С. 376-387.

4. **Руб А.К., Руб М.Г.** Редкометальные граниты Приморья. М: ВИМС, 2006. 86 с.

5. **Breiter K., Förster H.-J., Škoda R.** Extreme P-, Bi-, Nb-, Sc-, U- and F-rich zircon from fractionated perphosphorous granites: The peraluminous Podlesi granite system, Czech Republic // Lithos. 2006. V. 88. P. 15-34.

6. **Hoskin P.W.O.** Trace-element composition of hydrothermal zircon and the alteration of Hadean zircon from the Jack Hills, Australia // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2005. V. 69. P. 637–648.

МЕДНО-ПОРФИРОВОЕ ОРУДЕНЕНИЕ ТЫРСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ, РОССИЯ)

Р.В. Бадридинов, В.Е. Кириллов

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск, e-mail: rustam.badridinov@yandex.ru

Аннотация. Тырское рудное поле в настоящее время рассматривается как одно из перспективных на выявление медно-порфировых месторождений на Дальнем Востоке России. На основании данных, полученных в ходе поисково-оценочных работ, проведен анализ геологического строения, структуры гидротермально-метасоматических образований, минералогии и основных особенностей металлогении Тырского рудного поля. Сделан вывод о связи оруденения с зонами березитизации в экзо-эндоконтактовых зонах субвулканических интрузий диоритов и аналогичности Тырского объекта с крупным месторождением Малмыж.

COPPER-PORPHYRY MINERALIZATION OF THE TYRSKOE ORE FIELD (KHABAROVSK TERRITORY, RUSSIA)

R.V. Badridinov, V.E. Kirillov

Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk, e-mail: rustam.badridinov@yandex.ru

Abstract. The Tyrskoe ore field is currently considered one of the most promising sites for copper-porphyry mineralization in the Russian Far East. Based on data obtained during exploration and evaluation works, an analysis of the geological structure, hydrothermal-metasomatic formations, mineralogy, and key metallogenic features of the Tyrskoe ore field has been conducted. It is concluded that the mineralization is associated with beresitization zones in the exo- and endocontacts of subvolcanic diorite intrusions, and the Tyrskoe deposit shows significant similarities to the large Malmyzh copper-porphyry deposit.

Тырское рудное поле (ТРП) находится на территории Ульчского района Хабаровского края на правом берегу р. Амур в 2 км к север-северо-западу от поселка Тыр (рис. 1). Рудное поле изучалось с 1950-х годов, в 2012-2016 гг. в его пределах был осуществлен комплекс поисково-оценочных работ. В настоящее время работы в пределах ТРП проводит ООО «Тырская Горно-Геологическая Компания».

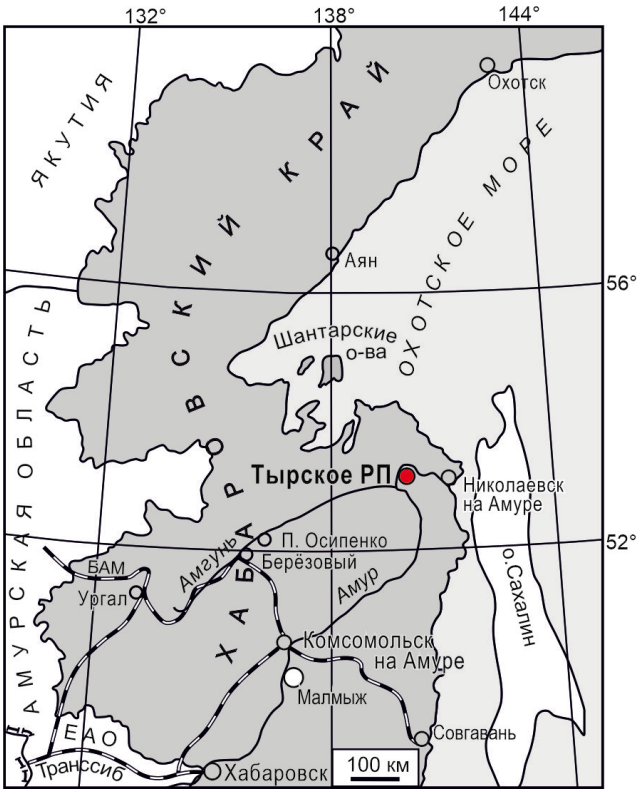


Рисунок 1. Положение Тырского рудного поля на карте Хабаровского края

Figure 1. Location of the Tyrskoye ore field on the map of Khabarovsk Krai

Район расположен в зоне сочленения Амуро-Охотской складчатой системы и Сихотэ-Алинского складчатого пояса, в Приамурской подзоне Западно-Сихотэ-Алинской структурно-формационной зоны (СФЗ), в северо-восточной части Журавлевско-Амурского террейна. Терригенные породы перекрыты вулканитами Восточно-Сихотэ-Алинского вулкано-плутонического пояса, магматические формации которого рассматриваются как благоприятные для локализации оруденения золото-медно-порфирового типа [1].

Стратифицированные образования ТРП представлены двумя верхнемеловыми комплексами пород: 1) терригенными породами ларгасинской свиты (мелко- и тонкозернистые песчаники с прослоями алевролитов и линзами конгломератов, с примесью туфогенного материала, (рис. 2)); 2) залегающими на них вулканогенными породами больбинской свиты сенонского возраста (туфы андезитов, андезибазальтов мощностью до нескольких сотен метров).

Из разрывных нарушений преобладают диагональные разломы северо-восточного и северо-западного простираний, связанные с сенонским этапом вулканической активности. Эти структуры характерны для многих рудных районов юга Дальнего Востока и часто контролируют, наряду с более молодыми субширотными разломными системами, размещение интрузивных тел и связанных с ними рудных зон. Амплитуды смещения по этим разломам достигают нескольких сотен метров, а зоны дробления могут иметь мощность до первых десятков метров [1].

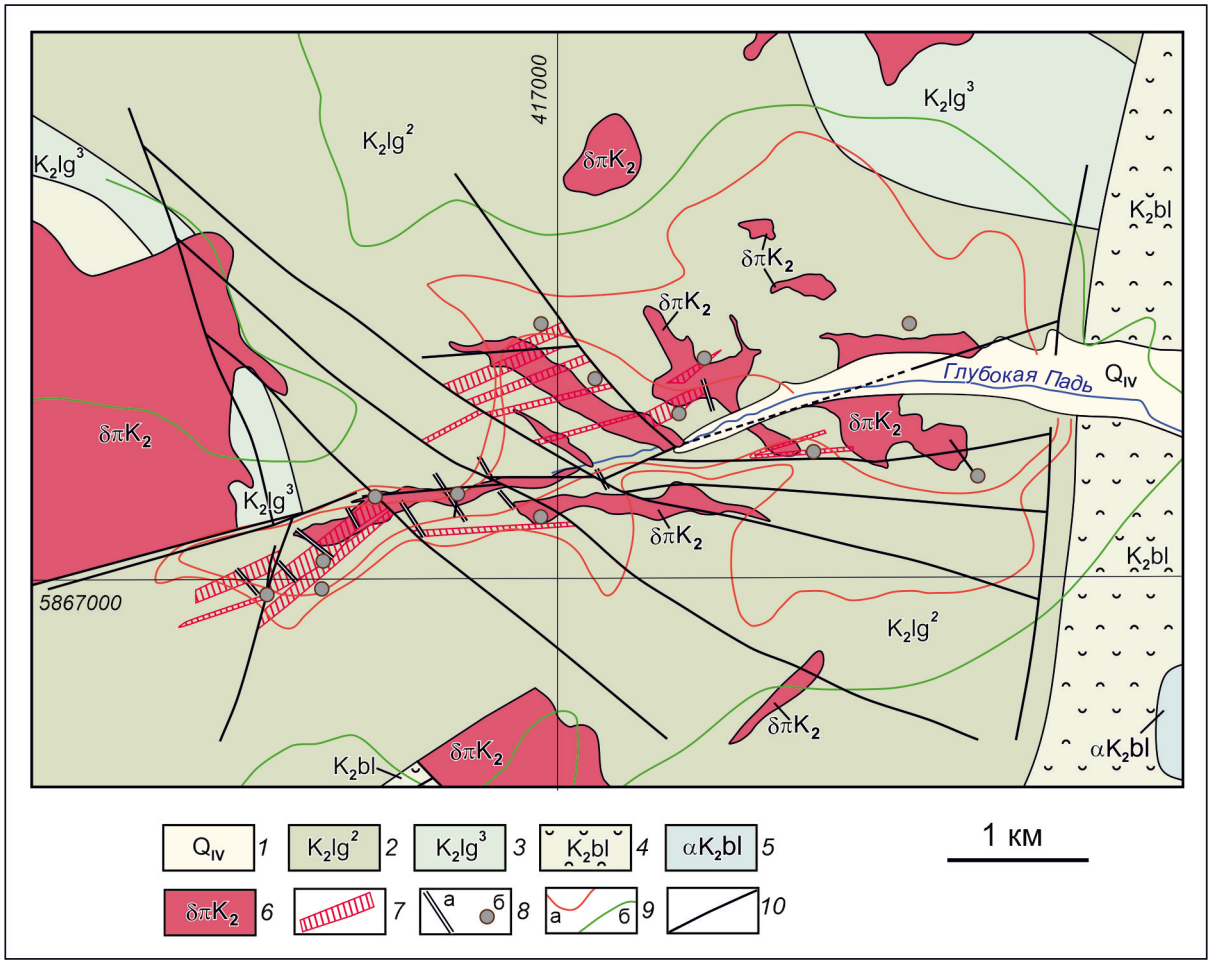


Рисунок 2. Геологическая карта Тырского рудного поля.
1 – верхнечетвертичные аллювиальные образования; 2-3 – ларгасинская свита: 2–переслаивающиеся песчаники и алевролиты, 3 – песчаники с линзами гравелитов и конгломератов; 4-5 – больбинская свита: 4 – туфы андезитов, туфогенные конгломераты и песчаники, 5 – андезиты; 6 – диоритовые порфириты нижнеамурского комплекса; 7 – рудные тела; 8 – канавы (а), скважины (б); 9 – ореолы аномальных содержаний золота (а), меди (б); 10 – разрывные нарушения.

Figure 2. Geological map of the Tyrskoye ore field.
1 – Upper Quaternary alluvial formations; 2-3 – Largasinskaya suite: 2 – interbedded sandstones and siltstones, 3 – sandstones with lenses of gravelstones and conglomerates; 4-5 – Bolbinskaya suite: 4 – andesite tuffs, tuffaceous conglomerates and sandstones, 5 – andesites; 6 – diorite porphyrites of the Lower Amur complex; 7 – ore bodies; 8 – trenches (a), bore halls (b); 9 – halos of anomalous gold (a), copper (b) contents; 10 – faults.

Возраст интрузивных пород нижнеамурского комплекса калий-аргоновым методом определен как позднемеловой (82 млн. лет). В состав комплекса входят кварцевые диориты, гранодиориты субвулканической и гипабиссальной фаций и дайки спессартитов, контролируемые разломными зонами восток-северо-восточного простирания.

Интрузивные образования комплекса принадлежат известково-щелочной и известковой магматическим сериям, с положительной корреляцией халькофильных (Cu, Pb, Zn) и литофильных (K, Rb, Ba) элементов.

Гидротермально-метасоматические преобразования пород на ТРП характеризуются латеральной зональностью. Внешняя зона шириной в 200-400 метров представлена пропилитизированными породами, в которых первичные

минералы замещены хлоритом, эпидотом, карбонатами и серицитом. Во внутренней зоне (до 50-100 м) проявлена березитизация с полным замещением первичных минералов вторичными (кварцем, серицитом, карбонатом). Интенсивность изменений возрастает по мере приближения к рудным телам.

Основными типами оруденения являются: 1) линейные штокверковые зоны кварцевого прожилкования с сульфидной минерализацией на контактах интрузивных тел; 2) вкрапленные и прожилково-вкрапленные сульфидные руды в субвулканических породах.

Протяженность рудоносных зон варьирует от сотен метров до километра. Вместе они образуют ветвящуюся систему, контролируемую разрывными нарушениями северо-восточного простирания.

По характерным взаимоотношениям рудных минералов фиксируется стадийность рудообразующего процесса, с появлением пирита в его первый этап. Среди рудных минералов преобладают пирит (5-15% объема руды); халькопирит (1-3%); молибденит (0.01-0.1%); сфалерит (0.1-0.5%). Для рудных минералов характерны вкрапленные, прожилковые и гнездовые выделения. Вторичные минералы (лимонит, малахит, азурит, борнит) развиты преимущественно в зоне окисления, мощность которой достигает 30 м. Пространственное распределение элементов определяется накоплением Cu-Mo-Au в центральных частях рудоносных зон, Pb-Zn-Ag на их периферии.

Основными полезными компонентами руд ТРП являются медь (среднее содержание по скважинам составляет 0.08%, максимальное 1.2%) и золото (среднее содержание по скважинам 0.13 г/т, максимальное 13.6 г/т).

Приамурская подзона Западно-Сихотэ-Алинской СФЗ вмещает золото-меднопорфировое оруденение (Тырский, Болоньский, Пони-Мулинский рудные узлы) и рассматривается как перспективная на выявление новых рудных объектов этого типа [1, 2].

Перспективы Тырского рудного поля определяются: 1) наличием специализированных на медь интрузий среднего состава; 2) наличием протяженных зон гидротермально-измененных пород (мощность до 1.8 км, протяженность до 3.5 км); 3) установленными ресурсами в 0.4 млн т меди при прогнозируемых перспективах их увеличения.

Оруденение Тырского рудного поля сходно в части общих геологических и минерагенических особенностей с известным крупным месторождением Малмыж Болоньского РУ (связь с малыми порфировыми интрузиями K2 возраста; контроль интрузий и оруденения СВ системой разломов; березитовый тип околорудных изменений; схожая геохимическая специализация). Это делает актуальным продолжение его изучения с целью выявления масштабных рудных объектов золото-меднопорфирового типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петров О.В., Киселев Е.А., Шпикерман В.И., Змиевский Ю.П. Прогноз размещения золото-медно-порфирового типа в вулкано-плутонических поясах восточных районов России // Региональная геология и металлогения. 2019. № 80. С. 50-74.

2. Петров О.В., Шатов В.В., Ханчук А.И. и др. О перспективах открытия новых золото-медно-порфировых месторождений на территории Нижнего Приамурья / Владивосток: ДВГИ, 2020. 145 с.

ТЕКСТУРНО-СТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ РУДНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ — ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ ГЕНЕЗИСА И ТЕХНОЛОГИИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ НА ПРИМЕРЕ МАЛИНОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЮЖНЫЙ СИХОТЭ-АЛИНЬ)

В.Н. Бахтина[1,3], А.А. Гребенникова[1,3], К.Н. Доброшевский[2]

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: bakhtina@fegi.ru

[2]ООО «Малиновское», Приморский край

[3]Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

Аннотация. Получены данные о текстурно-структурных особенностях руд Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь). Наиболее распространенными текстурами являются прожилково-вкрапленная, массивная и вкрапленная; среди выделенных видов структур – аллотриоморфно- и гипидиоморфнозернистая, гипидиоморфнометазернистая и порфирокластическая, а также их комбинации. Проведенные исследования подтверждают, что рудообразование на Малиновском месторождении протекало в условиях гидротермально-метасоматического процесса, осложненного интенсивными тектоническими деформациями. Перспективными для обогащения являются руды с массивными и прожилково-вкрапленными текстурами. Наличие катакластических и тонковкрапленных структур, а также вредных примесей требует комбинированных методов переработки и обязательный контроль содержания вредных примесей.

TEXTURAL AND STRUCTURAL FEATURES OF ORE MINERALIZATION — SIGNIFICANCE FOR GENESIS AND EXTRACTION TECHNOLOGY ON THE EXAMPLE OF MALINOVSKOYE DEPOSIT (SOUTH SIKHOTE-ALIN)

V.N. Bakhtina[1,3], A.A. Grebennikova[1,3], K.N. Dobroshevsky[2]

[1]Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, e-mail: bakhtina@fegi.ru

[2]Malinovskoe LLC, Primorsky Krai

[3]North-Eastern Integrated Research Institute named after N.A. Shilo FEB RAS, Magadan

Abstract. Data on textural and structural features of ores of the Malinovskoye deposit (Southern Sikhote-Alin) have been obtained. The most common textures are vein-embedded, massive and disseminated, among the identified types of structures - allotriomorphic and hypidiomorphic-grained, hypidiomorphic-metaserrine and porphyroclastic, as well as their combination. The studies confirm that ore formation at the Malinovskoye deposit took place in the conditions of hydrothermal-metasomatic process complicated by intensive tectonic deformations. Ores with massive and vein-embedded textures are promising for beneficiation. The presence of cataclastic and thinly disseminated structures, as well as harmful impurities requires combined processing methods and mandatory control of harmful impurities content.

Изучение текстурно-структурных особенностей руд играет важную роль в определении генезиса месторождений, их технологических свойств и условий формирования, поскольку они отражают процессы кристаллизации, метасоматоза, тектонических деформаций и пострудных преобразований. Результаты исследования имеют практическое значение в оптимизации схем обогащения и эксплуатации месторождения.

Малиновское месторождение расположено в Дальнереченском районе Приморского края в пределах Журавлевско-Амурского террейна [2, 3]. Оно находится в зоне влияния Центрального Сихотэ-Алинского разлома [4]. Месторождение относится к золото-сульфид-кварцевой формации золото-висмутового геохимического типа [4]. Рудные тела представлены линейными штокверковыми зонами и жилами сульфид-кварцевого, сульфид-карбонат-кварцевого, сульфидного состава. Они локализованы в монцонитах Водораздельного интрузива татибинского комплекса и песчано-сланцевых отложениях журавлевской свиты [2]. Основными рудными минералами являются халькопирит, пирит, арсенопирит, пирротин, реже встречаются сфалерит, висмутин, самородный висмут, мальдонит, самородное золото [2, 3]. Золото преимущественно тонкодисперсное, свободное или в сростках с висмутовыми минералами. Пробность варьирует от 620 до 960‰.

Исследования текстурно-структурных особенностей руд выполнены в ДВГИ ДВО РАН при помощи микроскопического (микроскоп Nikon E-600 POL), рентгеноспектрального (микроанализатор JEOL JXA-8100) анализов и сканирующей электронной микроскопии (SEM TescanLyra 3, JCM-6000). В качестве основы для классификации использован «Определитель текстур и структур руд» [5].

При макроскопическом изучении образцов нами установлено, что наиболее распространенными текстурами руд Малиновского месторождения являются прожилковая и вкрапленная текстуры, реже массивная и гнейсовидно-полосчатая, редко встречаются руды с пятнистой, полосчатой, брекчиевой, брекчиевидной и друзовой текстурами. Стоит отметить, что

вышеуказанные текстуры часто встречаются в комбинации, например, прожилково-вкрапленная, прожилково-брекчиевая, прожилково-полосчатая и другие.

При микроскопическом изучении полированных шлифов выделены следующие группы структур: зернистые (аллотриоморфнозернистые, гипидиоморфнозернистые), коррозионные (скелетная структура и реакционно-каемочная микротекстура), метазернистые (гипидиоморфнометазернистые), кристаллобластические (структуры распада твердых растворов: эмульсионная, ориентированно-эмульсионная, звездчатая, каплевидная, пламеневидная) и катакластические.

Преобладание прожилково-вкрапленных, прожилковых и массивных текстур свидетельствует о кристаллизации минеральных ассоциаций из насыщенных гидротермальных растворов при заполнении трещин и пустот. Наличие полосчатых и гнейсовидно-полосчатых текстур подчеркивает процессы дифференциации, перекристаллизации и ориентированного роста минералов под воздействием высоких температур и давлений.

Развитие зернистых, метазернистых и коррозионных структур отражает условия кристаллизации и последующих метасоматических изменений минералов в изменяющихся физико-химических условиях (температура, давление, состав флюидов).

Структуры распада твердых растворов (эмульсионные, эмульсионно-ориентированные, звездчатые, каплевидные) служат геологическими термометрами. Их наличие в совокупности с ранее изученным минеральным составом руд [3, 4] и термобарогеохимическими исследованиями [6] указывает на широкий температурный диапазон (от 275 до 500 °С) формирования Малиновского месторождения.

Широкое распространение катакластических текстур и структур, часто наблюдаемых в разновременных кристаллах и минералах, подчеркивает длительность тектонических деформаций, которые сопровождали весь период рудообразования.

Анализ текстур и структур рудных образований показал, что наиболее благоприятными для обогащения являются массивные текстуры (пирротин-халькопиритовые, пиритовые). Их наличие способствует эффективной флотации и гравитационному обогащению. Прожилково-вкрапленные текстуры с равномерным распределением рудных минералов в кварцевой массе обеспечивают хорошее раскрытие зерен при дроблении. Аллотриоморфные зернистые структуры, в которых присутствуют крупные зерна сульфидов (пирит, халькопирит), легко отделяются от жильных минералов.

К неблагоприятным относятся катакластические (брекчиевидные) текстуры, которые требуют тонкого измельчения из-за сильного дробления минералов. Это увеличивает энергозатраты и снижает выход концентратов. Тонковкрапленные структуры с размерами зерен менее 10 мкм затрудняют

извлечение даже при тонком помоле. Реакционно-каемочные микротекстуры (например, замещение халькопирита ковеллином) ухудшают флотационные свойства минералов вследствие изменения их поверхностных характеристик [5]. Также неблагоприятное влияние при переработке руд оказывают вредные примеси, на Малиновском месторождении к ним относятся мышьяксодержащие (арсенопирит), сурьмяные (тетраэдрит, бурнонит), глинистые (хлорит, карбонаты) и окисленные минералы (лимонит, ковеллин) [1].

Таким образом, установлено преобладание прожилково-вкрапленной, массивной и вкрапленной текстур руд. Среди структур наиболее распространены аллотриоморфнозернистая, гипидиоморфнозернистая, гипидиоморфнометазернистая и порфирокластическая. Характерной чертой является широкое развитие комбинированных текстур и структур. Проведенные исследования подтверждают, что рудообразование на Малиновском месторождении протекало в условиях гидротермально-метасоматического процесса, осложненного интенсивными тектоническими деформациями.

С технологической точки зрения для обогащения наиболее перспективны руды с массивными и прожилково-вкрапленными текстурами, где преобладают крупнозернистые сульфиды (халькопирит, пирит) и свободное золото. Наличие катакластических и тонковкрапленных структур, а также вредных примесей (мышьяк, сурьма, глинистые минералы) требует комбинированных методов переработки (флотация + цианирование) и обязательный контроль содержания вредных примесей на всех стадиях технологического процесса.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-47-00064.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бахтина В.Н., Гребенникова А.А., Доброшевский К.Н., Федосеев Д.Г., Горячев Н.А.** Физико-химические условия формирования рудной минерализации Малиновского месторождения (Южный Сихотэ-Алинь) // Материалы III Молодежной научной конференции-школы с международным участием "Геология на окраине континента". ДВГИ ДВО РАН. Владивосток. 2024. С. 119–122.

2. **Доброшевский К.Н, Горячев Н.А.** О возрасте и геодинамических факторах формирования золотого оруденения Малиновского месторождения (Сихотэ-Алиньская золотоносная профинция, Россия) // Тихоокеанская геология. 2021. Т. 40. № 3. С. 28–40.

3. **Доброшевский К.Н., Гвоздев В.И., Шлыков С.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г.** Вещественный состав и геохимические особенности руд Малиновского золоторудного месторождения (Приморский край) // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 5. С. 59–74.

4. **Гвоздев В.И., Доброшевский К.Н., Вах А.С., Горячев Н.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г.** Малиновское месторождение — новый тип золоторудной минерализации в Приморском крае, Россия (геология, минералогия, генезис) // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35. № 1. С. 37–53.

5. **Исаенко М.П.** Определитель текстур и структур руд. М.: Недра, 1983. 261 с.

МИНЕРАЛЬНЫЕ ПАРАГЕНЕЗИСЫ В РУДАХ АСАЧИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

А.У. Бойко, Е.Д. Скильская, К.О. Шишканова, А.В. Сергеева

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский, e-mail: kimau05@gmail.com

Аннотация. Камчатский край — один из перспективных горнорудных районов Дальнего Востока России. Это связано, в том числе, с наличием уникальных эпитермальных золоторудных месторождений адуляр-серицитового (low-sulfidation) типа. Асачинское месторождение, открытое в 1973 г., принадлежит к числу наиболее крупных и хорошо изученных золото-серебряных объектов Южной Камчатки. Это типичное вулканогенное эпитермальное низко-сульфидное месторождение адуляр-серицитового типа. Самородное золото ассоциирует с селенидами, сульфосолями Ag, сульфидами, обладает мелкими размерами, разнообразием форм, сложным неоднородным строением по структуре (преимущественно дендритовидным) и составу (вариации пробности — 475-890). Среди редких минералов диагностированы ютенбогардит (Ag_3AuS_2), галогениды Ag (AgBr, AgI, AgCl), сложные оксиды, содержащие Au, Ag, S, Fe, Pb. Галенит, образующий срастания с самородным золотом, содержит до 4-5% вес. Se.

MINERAL PARAGENESES IN ORES OF THE ASACHISKOE DEPOSIT

A.U. Boiko, E.D. Skilskaya, K.O. Shishkanova, A.V. Sergeeva

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: kimau05@gmail.com

Abstract. The Kamchatka region — is one of the promising mining regions of the Russian Far East, which is due, among other things, to the presence of epithermal gold deposits of adulyar-sericite type (Low sulfidation). The Asachinskoye deposit, discovered in 1973, is one of the largest and relatively well-studied gold and silver objects in the Kamchatka region. This is a typical volcanogenic epithermal, LS-class vein (low-sulfide, quartz-sericite-adular type according to the European classification). Native gold is associated with selenides, Ag sulfosalts, and sulfides and has small sizes, a variety of shapes, and a complex heterogeneous structure (mostly dendritic) and composition (variations in purity — 475-890). Among the exotic minerals associated with it, jutenbogardite (Ag_3AuS_2), Ag halides (AgBr, AgI, AgCl), complex oxides containing Au, Ag, S, Fe, Pb have been diagnosed. Galena, which forms accretions with native gold, contains up to 4-5% wt. Se.

Асачинское золото-серебряное вулканогенное эпитермальное месторождение — один из главных рудных объектов Южно-Камчатского горнорудного района находится в 160 км к югу от краевого центра, г. Петропавловска-Камчатского [1, 3, 4]. Это типичное вулканогенное эпитермальное низко-сульфидное месторождение адуляр-серицитового типа, локализованное в зоне наложения Южно-Камчатского плейстоцен-четвертичного вулканического пояса на Центрально-Камчатский олигоцен-плейстоценовый [2, 6].

Месторождение приурочено к эрозионно-тектонической кальдере площадью около 20 км^2, которая располагается в центральной части Асачинской вулкано-тектонической структуры (ВТС) с диаметром около 28 км. В геологическом строении месторождения участвуют эффузивно-пирокластические, вулканогенно-осадочные, субвулканические регионально пропилитизированные породы жировской толщи и асачинской свиты; верхнемиоцен-плиоценовые субаэральные отложения базальтов, андезитов и риолитов и верхнеплейстоцен-голоценовые базальты и андезиты.

В пределах месторождения установлено более 30 золотоносных жильных зон и жил, которые объединяются в две наиболее крупные жильные системы — № 1 и Восточная, простирающиеся в меридиональном направлении. Рудные тела сложены кварц-адуляровым агрегатом с незначительными количествами серицита, карбонатов, цеолитов. Содержат своеобразные ленты-струйки темно-коричневого цвета, состоящие из густой вкрапленности и срастаний самородного золота (электрума), селенидов, сульфосолей Ag, сульфидов и экзотических минералов: галогениды Ag, сложные оксиды, ютенбогардит [1].

Рудам месторождения свойственно значительное разнообразие текстур, что свидетельствует о длительном и сложном процессе рудообразования [1, 4]. Наибольшим распространением пользуются комбинированные, среди них выделяют: прожилковые, сетчатые, прожилково-сетчатые, полосчатые, колломорфные, колломорфно-полосчатые, гнездовые, кокардовые текстуры, обусловленные различными соотношениями кварца, карбонатов, адуляра и рудных минералов. Подчиненным распространением пользуются брекчиевые и брекчиевидные.

Самородное золото относится к главному рудному минералу, определяющему промышленную ценность месторождения. Оно характеризуется сложной неоднородной структурой, обусловленной дендритовидным и кристаллически-субблоковым строением. Дендриты представляют собой комбинации наносферических частиц и обладают исключительно мелкими размерами.

Основная часть самородного золота пространственно связана и образует срастания с халькопиритом, стибиопирсеит-арсенполибазитом ($(Ag,Cu)_{16}(As,Sb)_2S_{11}$), агвиларитом ($Ag_4SeS$), науманнитом ($Ag_2Se$), аргентитом ($Ag_2S$), значительно реже — галенитом, ютенбогардитом Ag_3AuS_2, сложными

оксидами Fe и Mn; кварцем, адуляром. Часть золота заключена в виде микровключений в селенидах, сульфосолях Ag, в единичных случаях — пирите. Кроме того, встречаются соединения, образующие тесные срастания, состоящие из самородного золота, окруженного каймами агрегатов гипергенных минералов, таких как эмболит (AgBrCl), бромаргирит (AgBr), хлораргирит (AgCl), а также сложных образований, в состав которых входят: S, O, Fe, Ag, Au, Te, Se и Pb. Таким образом, на основе выявленных минералов и их взаимоотношений выделены три минеральные ассоциации: золото-селенид-сульфосолевая, золото-сульфидная и золото-оксидная. При этом последняя минеральная ассоциация образована в условиях гипергенного окисления руд.

В докладе будут обсуждаться условиях формирования выявленных минеральных ассоциаций золото-серебряного месторождения Асачинского на основе минералогических, термобарогеохимических и изотопных данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Никитин М.И.** О ходе строительства Асачинского ГОК // Горный Вестник Камчатки. 2009. Вып. 2. № 8. С. 29-32.

2. **Округин В.М., Лоншаков Е.А., Евсеев Г.Н., Игнатов А.П., Коваль С.С., Матюшонок Н.Н., Чубаров В.М.** Некоторые особенности самородного золота рудных объектов // Геологическое строение и полезные ископаемые Камчатки. Петропавловск-Камчатский. 1983. С.132-136.

3. **Округин В.М.** О возрасте и генезисе эпитермальных месторождений зоны перехода контенент-океан (северо-западная Пацифика) // Современный вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы юбилейной сессии Камчатского научного центра ДВО РАН, посвященной 40-летию Института вулканологии. Петропавловск-Камчатский, 2004. С.106-108.

4. **Округин В.М., Ким А.У., Москалева С.В., Округина А.М., Чубаров В.М., Агаськин Д.Ф.** О рудах Асачинского золото-серебряного месторождения (Южная Камчатка) // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога «Вулканизм и связанные с ним процессы». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 330-334.

5. **Петренко И.Д.** Золото-серебряная формация Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Изд. Санкт-Петербургской картографической фабрики ВСЕГЕИ, 1999. 115 с.

ОСЛАБЛЕНИЕ ОЗОНОВОЙ ЗАЩИТЫ ЗЕМЛИ НА ГРАНИЦЕ ПЕРМИ И ТРИАСА ПО ДАННЫМ ИЗОТОПНОГО АНАЛИЗА СЕРЫ ИЗ АУТИГЕННЫХ СУЛЬФИДОВ СИБИРИ

С.В. Высоцкий[1], Т.А. Веливецкая[1], А.В. Игнатьев[1], В.В. Яковенко[1], Ю.Д. Захаров[1], А.С. Бяков[2], И.В. Брынько[2], И.Л. Ведерников[2], Р.В. Кутыгин[3]

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: svys@mail.ru

[2]Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

[3]Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск

Аннотация. Проведены исследования соотношений трёх стабильных изотопов серы (^{32}S, ^{33}S и ^{34}S) в фанерозойских аутигенных сульфидах из осадочных пород Восточной Сибири, образовавшихся в самом конце пермского- начале триасового периодов (~252 млн лет назад). Полученные результаты свидетельствуют об интенсивных УФ-потоках, пронизывавших атмосферу Земли в это время. Это может быть связано с ослаблением озоновой защиты в результате уменьшения интенсивности магнитного поля и выделения в атмосферу большого количества газообразных сернистых соединений и галогенов при массивных вулканических извержениях.

WEAKENING OF THE EARTH'S OZONE PROTECTION AT THE PERMIAN-TRIASSIC BOUNDARY ACCORDING TO ISOTOPIC ANALYSIS OF SULFUR FROM AUTHIGENIC SULFIDES OF SIBERIA

S.V. Vysotskiy[1], T.A. Velivetskaya[1], A.V. Ignatyev[1], V.V. Yakovenko[1], Yu.D. Zakharov[1], A.S. Biakov[2], I.V. Brynko[2], I.L. Vedernikov[2], R.V. Kutygin[3]

[1]Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, e-mail: svys@mail.ru

[2]North-East Scientific Research Institute n.a. N.A. Shilo FEB RAS, Magadan,

[3]Institute of Geology of Diamond and Precious Metals SB RAS, Yakutsk

Abstract. The ratios of three stable sulfur isotopes (^{32}S, ^{33}S, and ^{34}S) were studied in Phanerozoic authigenic sulfides from sedimentary rocks of Eastern Siberia formed at the very end of the Permian - beginning of the Triassic periods (~252 million years ago). The results indicate intense UV fluxes that penetrated the Earth's atmosphere at that time. This may be due to the weakening of ozone protection as a result of a decrease in the intensity of the magnetic field and the release of large amounts of gaseous sulfur compounds and halogens into the atmosphere during massive volcanic eruptions.

Почти во всех физических, химических и биологических процессах фракционирование (разделение) изотопов серы зависит от массы изотопа, и разницы между расчетным и фактическими значениями (обозначается как $\Delta^{33}S$, $\Delta^{36}S$) близки к нулю [3]. Фотохимия серы является одним из немногих процессов, при котором происходит фракционирование, не зависящее от массы изотопа ***(MIF-S)***, и получаются ненулевые значения $\Delta^{33}S$ и $\Delta^{36}S$.

Считается, что с момента насыщения атмосферы Земли кислородом (2,3 млрд лет назад), сигналы масс-независимого фракционирования изотопов серы в аутигенных сульфидах должны исчезнуть. Это связано с тем, что появление молекулярного кислорода и озонового слоя экранирует проникновение УФ-излучения в нижние слои атмосферы и, следовательно, в этих слоях прекращаются фотохимические реакции SO_2, требующие коротковолнового УФ-излучения. С прекращением реакций фотолиза SO_2 должно прекратиться продуцирование MIF-S и его фиксация в аутигенных сульфидах.

Однако, исследования последних лет показали, что для некоторых районов мира, где сохранились осадочные породы фанерозоя, в аутигенных сульфидах наблюдаются значимые ненулевые значения $\Delta^{33}S$, $\Delta^{36}S$ (например, [4]). Т.е. в определенные периоды геологической истории Земли на некоторых ее территориях происходил процесс продуцирования ***MIF-S***, зафиксированный в сульфидных минералах. Причем формирование и сохранение аномалий MIF-S в атмосфере и последующий перенос в океаны и осадочные сульфиды требуют интенсивного и продолжительного облучения поверхности Земли солнечным УФ, что должно свидетельствовать о серьезном нарушении баланса озона в атмосфере и может привести к экологической катастрофе и гибели биоты (см. публ. в этом же томе - Захаров и др. 2025)

Проведенные нами исследования соотношений трёх стабильных изотопов серы (^{32}S, ^{33}S и ^{34}S) позволили получить первые данные о ее изотопном составе в фанерозойских аутигенных сульфидах, образовавшихся в самом конце пермского — начале триасового периодов (~252 млн лет назад) на Северо-Востоке Азии (разрез Суол, правобережье р. Сеторым в районе слияния ручьев Правый Суол и Левый Суол (63°08'43'' с.ш., 139°14'04'' в.д., Южное Верхоянье, Восточная Сибирь (рис.1)).

Доминирующими сульфидными рудными минералами в изученных образцах являются пирит и марказит, часто в совместных сростках. Характерны глобулярные агрегаты из тонкопластинчатых кристаллов марказита и пирита (рис. 1) Морфологически они представляют собой округлые, овальные, эллипсоидальные стяжения, с пористой текстурой, часто с выраженной концентрической зональностью. Эта зональность образована последовательной аккрецией мелких сферул и микрокристаллов к единому центру. Поры в глобулах заполнены углеродсодержащей смесью переменного состава, состоящей из глинисто-слюдистых минералов и кварца.

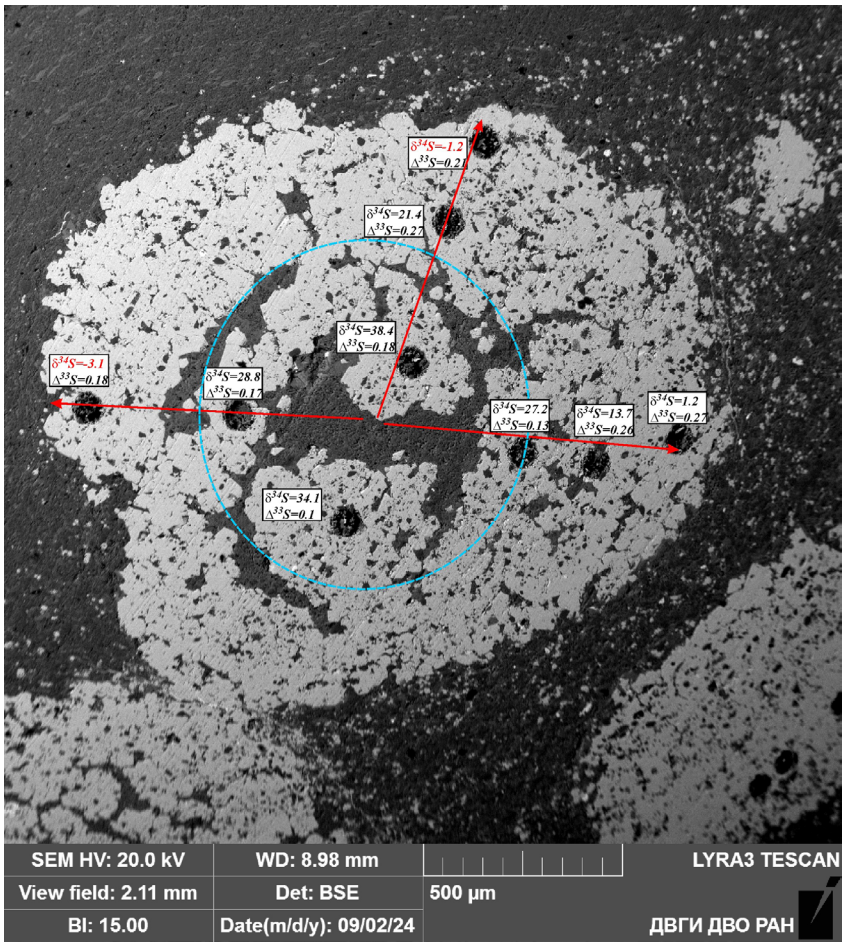


Рисунок 1. Фотографии (BSE) глобулярного агрегата аутигенного марказита и пирита обр. 9-40 из аргиллитов разреза р. Суол с кратерами лазерной абляции

Figure 1. Photographs (BSE) of a globular aggregate of authigenic marcasite and pyrite sample 9-40 from the mudstones of the Suol River section with laser ablation craters

В изученных образцах аутигенных сульфидов обнаружено отклонение величин $\Delta^{33}S$ от нулевых значений (минимальное 0.11‰; максимальное 0.46‰ (рис.2)). Также обнаружена высокая изменчивость величин $\delta^{34}S$. Например, общий диапазон вариаций $\delta^{34}S$ в сульфидном образце №9_8 достигает 65.3‰ (от -4.9‰ до +60.4‰). Такие вариации величин $\delta^{34}S$ с полной определённостью указывают на процессы биогенного сульфидогенеза, а происхождение ненулевых значений $\Delta^{33}S>0.15$‰ мы связываем с фотохимическими процессами. Таким образом, обнаруженные изотопные аномалии серы следует

рассматривать как свидетельство интенсивных УФ-потоков, пронизывающих атмосферу Земли ~252 млн лет назад. При этом надо принять во внимание, что формирование аномалий MIF-S в кислородной атмосфере с последующим переносом их в океаны и осадочные сульфиды предполагает долговременное и стабильное повышение УФ-фона, что возможно лишь при значительном снижении концентрации озона в атмосфере.

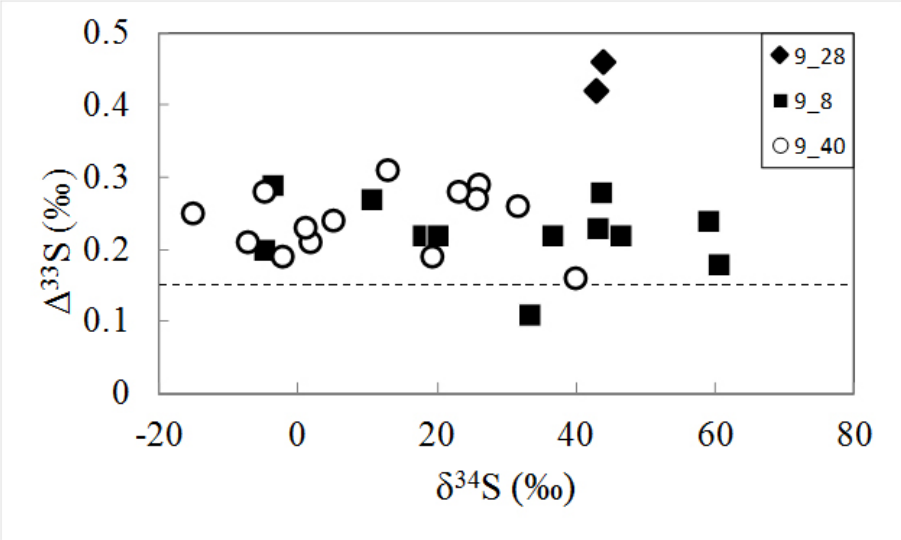


Рисунок 2 Значения $\delta^{34}S$ и $\Delta^{33}S$ для аутигенных сульфидов разреза р. Суол. Значения $\Delta^{33}S$ выше пунктирной линии 0.15‰ рассматриваются как изотопные аномалии серы.

Figure 2. $\delta^{34}S$ and $\Delta^{33}S$ values for authigenic sulfides of the Suol River section. $\Delta^{33}S$ values above the dotted line 0.15‰ are considered as sulfur isotope anomalies.

Непосредственную причину разрушения озонового слоя связывают, в основном, с выделением в атмосферу большого количества галогенов во время массивных вулканических извержений [4] или формирования больших магматических провинций, например, Сибирских траппов [4]. Однако, существуют другие, не связанные с вулканизмом процессы — это уменьшение интенсивности магнитного поля Земли. Имеющийся на сегодняшний день комплекс данных по палеонапряженности показывает последовательное изменение величин низкой и высокой напряженности геомагнитного поля в докембрии и палеозое. Периоды поздней перми и граница пермь-триас обнаруживают пониженные и ультранизкие значения палеонапряженности (например, [1]). Вполне вероятна связь между проявлением изотопных аномалий $\Delta^{33}S$ в аутигенных сульфидах из пограничных слоев пермь/триас и крайне низким в этот период магнитным полем, при котором ослабевает озоновая защита и, как следствие, увеличиваются УФ-потоки к поверхности Земли.

Активное жесткое УФ излучение, появляющееся в результате ослабления озонового экрана, несомненно, имело непосредственное смертельно опасное влияние как на наземную, так и морскую (преимущественно поверхностную планктонную) биоты, приводящее к глобальным экологическим

катастрофам. Поэтому важно располагать данными, напрямую или косвенно свидетельствующими о высоком уровне проникновения УФ-излучения к поверхности в истории Земли. Однако нестабильность озоновой защиты Земли и усиление УФ-потоков к её поверхности является одним из наименее изученных вопросов состояния окружающей среды прошлых геологических периодов и эпох.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Елисеев А.А., Щербакова В.В., Метелкин Д.В., Михальцов Н.Э., Жидков Г.В., Абашев В.В., Рогов А.М.** Низкая напряженность геомагнитного поля на рубеже перми и триаса по результатам исследования траппов Кузнецкого прогиба (Южная Сибирь) // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 2. С. 230—246.

2. **Beerling D.J., Harfoot M., Lomax B., Pyle J.A.** The stability of the stratospheric ozone layer during the end-Permian eruption of the Siberian Traps // Phil. Trans. R. Soc. A. 2007. V. 365. P. 1843–1866.

3. **Farquhar J., Wing B.A.** Multiple sulfur isotopes and the evolution of the atmosphere // Earth Planet. Sci. Lett. 2003. V. 213. P. 1-13.

4. **Li R., Shen S.-Z., Xia X.-P., Xiao B., Feng Y., Chen H.** Atmospheric ozone destruction and the end-Permian crisis: Evidence from multiple sulfur isotopes // Chemical Geology. 2024. V. 647. P. 121936.

ЗОЛОТО-ТЕЛЛУРИДНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ ХАПТАСЫННАХСКОЙ РУДНОЙ ЗОНЫ АНАБАРСКОГО ЩИТА

Б.Б. Герасимов, Л.А. Кондратьева

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, e-mail: bgerasimov@yandex.ru

Аннотация. Изучены минералогические особенности золотоносных метасоматитов Хаптасыннахской рудной зоны Анабарского щита. Выделена следующая последовательность образования рудных минеральных ассоциаций: пирит, пирротин → герсдорфит, молибденит → халькопирит, сфалерит, галенит → борнит, халькозин → теллуриды, самородное золото, антимонит, киноварь и самородный висмут. Самородное золото характеризуется широкой вариацией пробности (от 550 до 926‰) и примесью Cu (до 7.87%). Установлено, что его основная часть представляет собой симплектитовые срастания с теллуридами Au–калаверитом и креннеритом. Предполагается двухстадийнное формирование изученного золота: низкопробное золото было привнесено в систему во время раннего калиевого метасоматоза, а более высокопробное золото образовалось на поздней стадии формирования руд в результате кремнистого метасоматоза. Обнаружение низкотемпературной золото-теллуридной ассоциации в минеральных парагенезисах рудоносных пород и в качестве включений в самородном золоте позволяет выделить эпитермальный золото-теллуридный минеральный тип оруденения.

GOLD-TELLURID MINERALIZATION OF THE KHAPTASYNNAKH ORE ZONE OF THEANABAR SHIELD

B.B. Gerasimov, L.A. Kondratyeva

Diamondand Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: bgerasimov@yandex.ru

Abstract. Mineral characterization of gold bearing metasomatites in the Khaptasynnakhorezone of the Anabar Shield is provided in detail. The following ore formation sequence of mineral associations of the Khaptasynnakh zone was found: pyrite, pyrrhotine → gersdorffite, molybdenite → chalkopyrite, sphalerite, galenite → bornite, chalkosine → tellurides, native gold, antimonite, cinnabar and native bismuth. Native gold is characterized by varying fineness (550 to 926%) and Cu impurity (up to 7.87%). Most of it has been found to be represented by symplectite intergrowths with tellurides, Au-calaverite and krennerite.A two-stage formation process of the examined gold is suggested: low fineness gold was introduced into the system during the early potassium metasomatism, while higher fineness gold related to silica metasomatism resulted from its additional

mobilization by fluid during the late stage formation. Low temperature gold-telluride association in mineral paragenesis of ore-bearing rocks and as inclusions in native gold suggests epithermal gold-telluride mineralization.

Анабарский щит представляет собой мало исследованный выступ докембрийского кристаллического фундамента Сибирской платформы. До недавнего времени достоверные данные о рудной золотоносности щита были весьма скудными, хотя здесь известны россыпные проявления золота с неустановленными коренными источниками. Исследуемая территория находится в центральной части Билляхской зоны тектонического меланжа, основу которой создают системы сближенных разломов. Между ними заключены блоки в различной степени диафторированных и мигматизированных плагиогнейсов, гнейсов и кристаллических сланцев гранулитовой фации верхнеанабарской серии архея, а также блоки, сложенные биотит-амфиболовыми гнейсами амфиболитовой фации хапчанской серии раннего протерозоя [1]. В центральной части зоны расположен Билляхский массив, сложенный метаморфизованными в амфиболитовой фации порфировидными гранодиоритами, монцонитами и гранитами (билляхский комплекс), которые прорваны дайками аляскитов. Восточнее от массива встречаются дайковые тела биотитовых монцогаббро и амфибол-биотитовых кварцевых монцонитов (рис. 1).

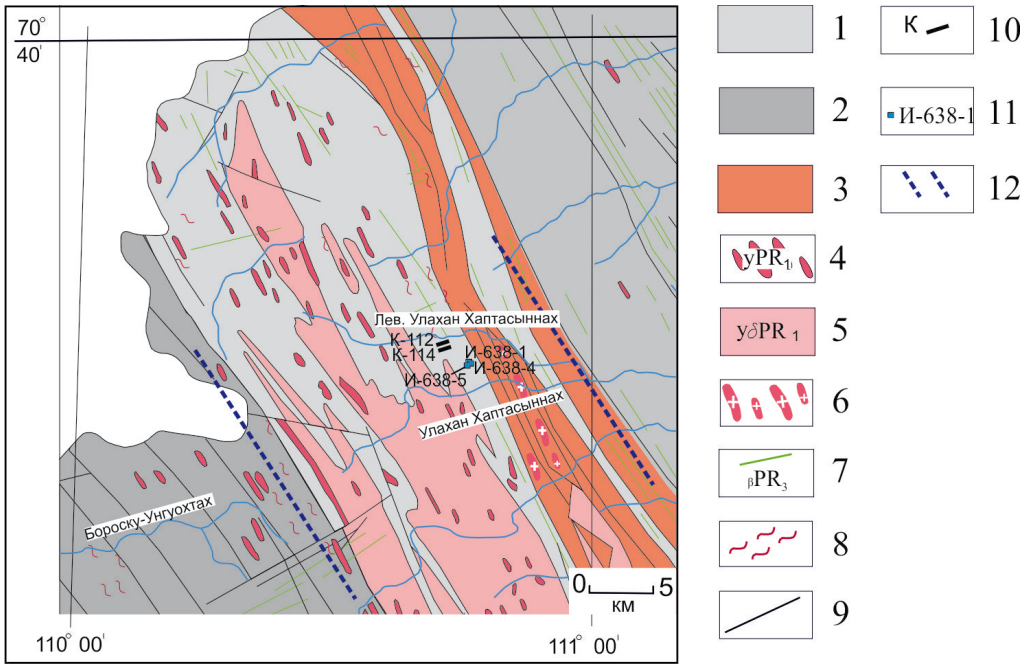


Рисунок 1. Схема геологического строения Билляхской зоны Анабарского щита.
1 – архейская верхнеанабарская серия, 2 – нерасчлененные метаморфические комплексы Далдынского и Хапчанского террейнов, 3 – протерозойская хапчанская серия, 4 – палеопротерозойские аляскитовые и лейкократовые граниты (γ_1-PR_1), 5 – палеопротерозойские порфировидные биотит-роговообманковые гранодиориты, монцониты, граниты и граносиениты билляхского комплекса (γ-δPR_1), 6 – палеопротерозойские биотитовые монцогаббро и амфибол-биотитовые кварцевые монцониты, 7 – мезо-неопротерозойские диабазы и габбро-диабазы (β-PR_3), 8 – зоны мигматизации игранитизации, 9 – тектонические контакты, 10 – поисковые канавы, 11 – точки отбора протолочных проб и их номера, 12 – границы Хаптасыннахской рудной зоны.

Figure 1. Scheme of the geological structure of the Billyakh zone of the Anabar shield.
1 – Archean Upper Anabar series, 2 – undivided metamorphic complexes of the Daldyn and Khapchan terranes, 3 – Proterozoic Khapchan series, 4 – Paleoproterozoic alaskite and leucocratic granites (γ_1-PR_1), 5 – Paleoproterozoic porphyric biotite-hornblende granodiorites, monzonites, granites and granosyenites of the Billyakh complex (γ-δPR_1), 6 – Paleoproterozoic biotite monzogabbro and amphibole-biotite quartz monzonites, 7 – Meso-Neoproterozoic diabases and gabbro-diabases (β-PR_3), 8 – zones of migmatization and granitization, 9 – tectonic contacts, 10 – prospecting trenches, 11 – points of collection of crushed samples and their numbers, 12 – boundaries of the Khaptasynnakh ore zone.

Хаптасыннахская рудная зона прослеживается в субмеридиональном направлении согласно простиранию Билляхской зоны тектонического меланжа, видимой протяженностью более 20 км, при ширине от 1 до 10 км. В данной публикации приводятся результаты изучения золотоносных штуфных проб, отобранных из коренных образований, вскрытых поисковыми канавами 112 и 114 (глубиной 3 м), пройденных вкрест простирания рудной зоны, а также из элювиальных отложений (рис. 1).

Канавами вскрыты сульфидизированные породы мощностью около 8 м. Они представлены гнейсами, преобразованными в процессе кремне-калиевого метасоматоза. Гидротермально-метасоматические изменения выражены в окварцевании, калишпатизаци, сульфидизации и реже в проявлении кварцевого и кальцитового прожилкования. Наиболее ранней является пирит-пирротиновая ассоциация. Средняя полиметаллическая ассоциация представлена халькопиритом, галенитом и сфалеритом. Поздняя теллуридная ассоциация наложена на более ранние минералы. Довольно часто в качестве весьма мелких микровключений (не более 20 мкм) в пирите, пирротине, и реже кальците встречаются теллуриды, образуя моно- и полиминеральные ансамбли. Наиболее распространен гессит, реже встречаются теллуровисмутит, хедлейит и алтаит. В ассоциации с хедлейитом в гессите обнаружен также самородный висмут.Также к поздним образованиям отнесены единичные зерна антимонита, киновари и самородного висмута. Гипергенные минералы представлены гетитом, ярозитом, малахитом и ковеллином. Самородное золото, с вариацией пробности от 550 до 613‰, обнаружено в виде микрочастиц (3-8 мкм) неправильной формы среди пирита и пирротина. Часто оно встречается в ассоциации с теллуридами, либо непосредственно в срастании с гесситом.

Золотоносные кварцевые метасоматиты из элювиальных отложений сложены среднезернистым серым кварцем с редкими зернами калиевого полевого шпата и плагиоклаза. Рудная минерализация представлена главным образом халькозином и в меньшей степени борнитом, халькопирит встречается весьма редко. Халькозин-борнитовый комплекс содержит многочисленные включения более поздней минерализации теллуридов Au, Ag, Cu, Pb, Bi (калаверит, сильванит, гессит, алтаит) и соединений теллура с кислородом. На данный момент исследований нам удалось выделить из трех протолочек кварцевых метасоматитов 574 частицы самородного золота общим весом 18.4 мг, в том числе: 34 зерна фракции 0.25-0.5мм (11.1 мг) и 540 знаков фракции -0.25 мм (7.3 мг). Изученное золото характеризуется

комковидными, угловато-комковидными и пластинчатыми формами. Пробность колеблется от относительно низкой (794‰) до высокой (908-926‰). Детальное изучение рудного золота показало, что основная его часть представлена симплектитовыми срастаниями с теллуридами Au–калаверитом и креннеритом. В качестве включений в самородном золоте и теллуридах Au обнаружены халькозин, борнит, алтаит, теллуровисмутит, риккардит, клаусталит, петцит, а также кварц, калиевый полевой шпат и плагиоклаз.

На основе анализа взаимоотношений минералов предлагается следующая последовательность формирования рудных минеральных ассоциаций: пирит, пирротин → герсдорфит, молибденит → халькопирит, сфалерит, галенит → борнит, халькозин → теллуриды, самородное золото, антимонит, киноварь и самородный висмут.

Как говорилось выше, пробность самородного золота в метасоматитах из канав варьирует от 550 до 613‰. Оно представлено весьма мелкими зернами и ассоциирует главным образом с гесситом. Кроме Ag, других примесей не обнаружено. Самородное золото в кварцевых метасоматитах из элювиальных отложений характеризуется вариацией пробности от 794 до 926‰. При этом относительная низкая пробность (<800‰) выявлена в единичных частицах, а средне- (800-900‰) и высокопробное (>900‰) золото составляет соответственно 49% и 51%. В них определена примесь Cu от 0.85 до 7.87%. Это золото ассоциирует с теллуридами Au, Pb, Bi и халькозин-борнитовым комплексом. На бинарной (Au и Ag) и тройной диаграмме (Ag-Au-Cu), а также кумулятивном графике содержаний Ag выделяется два кластера, по всей видимости, свидетельствующие о разновременном отложении самородного золота при формировании руд. Предполагается, что часть золота (низкопробного) была привнесена в систему во время раннего калиевого метасоматоза. Более высокопробное золото, связанное с кремнистым метасоматозом – это результат дополнительной его мобилизации флюидом поздних стадий формирования руд. При этом происходили процессы ремобилизации низкопробного золота, что приводило к выносу Ag. Подобная стадийная зависимость пробности золота ранее была отмечена на золото-меднопорфировом месторождении Bielyvrch в Словакии [2].

Результаты исследования минералогических особенностей рудных образований Хаптасыннахской рудной зоны дают основание впервые выделить эпитермальный золото-теллуридный минеральный тип оруденения на Анабарском щите.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Смелов А.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Березкин В.И., Кравченко А.А., Добрецов В.Н., Великославинский С.Д., Яковлева С.З.** Возраст и продолжительность формирования Билляхской зоны тектонического меланжа, Анабарский щит // Петрология. 2012. Т. 20. № 3. С. 315–330.

2. **Koděra P., Lexa J., Biroň A., Žitňan J.** Gold mineralization and associated alteration zones of the Bielyvrch Au-porphyry deposit, Slovakia // Mineralia Slovaca. 2010. V. 42. P. 33–56.

ВОСТОЧНО-СИБИРСКАЯ РУДОНОСНАЯ ПРОВИНЦИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ КОМПЛЕКСНОЙ МИНЕРАГЕНИИ В ВЕНДЕ-ПАЛЕОЗОЕ, В ЗОНЕ СОЧЛЕНЕНИЯ АТЛАНТИЧЕСКОГО И ТИХООКЕАНСКОГО СЕГМЕНТОВ ЗЕМЛИ

В.С. Гриненко, В.В. Баранов, Т.И. Васильева

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, e-mail: grinenkovs52@mail.ru

Аннотация. В зоне сочленения Атлантического и Тихоокеанского сегментов Земли, в осадочном чехле венда-палеозоя выделена Восточно-Сибирская рудоносная провинция нелинейной комплексной минерагении. Провинция является новым на северо-востоке Азии крупномасштабным перспективным поисковым объектом на стратегически важные полезные ископаемые, включающие продуктивные формы оруденения, выраженные высококонцентрированными углеводородами в погребенных резервуарах, россыпями алмазов и геохимическими аномалиями с металлами благородной, халькофильной, сидерофильной и редкоземельной групп.

EAST SIBERIAN ORE-BEARING PROVINCE OF NONLINEAR COMPLEX MINERAGENY IN THE VENDIAN-PALEOZOIC, IN THE JUNCTION ZONE OF THE ATLANTIC AND PACIFIC SEGMENTS OF THE EARTH

V.S. Grinenko, V.V. Baranov, T.I. Vasileva

Institute of Geology of Diamond and Precious Metals SB RAS, Yakutsk, e-mail: grinenkovs52@mail.ru

Abstract. In the junction zone of the Atlantic and Pacific segments of the Earth, in the sedimentary cover of the Vendian-Paleozoic, the East Siberian ore-bearing province of nonlinear complex minerageny is distinguished. The province is a new large-scale promising exploration object in northeast Asia for strategically important minerals, including productive forms of mineralization expressed by highly concentrated hydrocarbons in buried reservoirs, diamond placers and geochemical anomalies with metals of noble, chalcophile, siderophile and rare earth groups.

Из обзора специальной литературы [5, 7] следует, что в зоне сочленения Атлантического и Тихоокеанского сегментов Земли в докембрии и фанерозое установлена стационарность тектонических структур. Этот факт подтвержден и нами на северо-востоке и востоке Сибирской платформы, в процессе ранжирования и стратификации разреза мезозоя и прослеживания границы

триаса и юры в пространстве этой планетарной геоструктуры и сопредельной Аляски [4]. Также стационарность установлена в ходе планомерных работ по изучению на северо-востоке Азии зоны сочленения обозначенных сегментов Земли в интервале докембрия и фанерозоя при сводном мелкомасштабном государственном картосоставлении на листах R-52 и Q-52 [3], с выделением минерагенической специализации продуктивных стратифицированных и нестратифицированных местных стратонов [1]. В тектоническом плане Восточно-Сибирская рудоносная провинция располагается на кристаллическом фундаменте древней платформы (рис. 1). В её пределах установлены структуры I порядка, которые часто перекрыты разновозрастными осадочными толщами сплошного осадочного чехла (мощностью от первых сотен метров до 2 км и более). Состав фундамента и строение чехла охарактеризованы по материалам глубокого бурения [6].

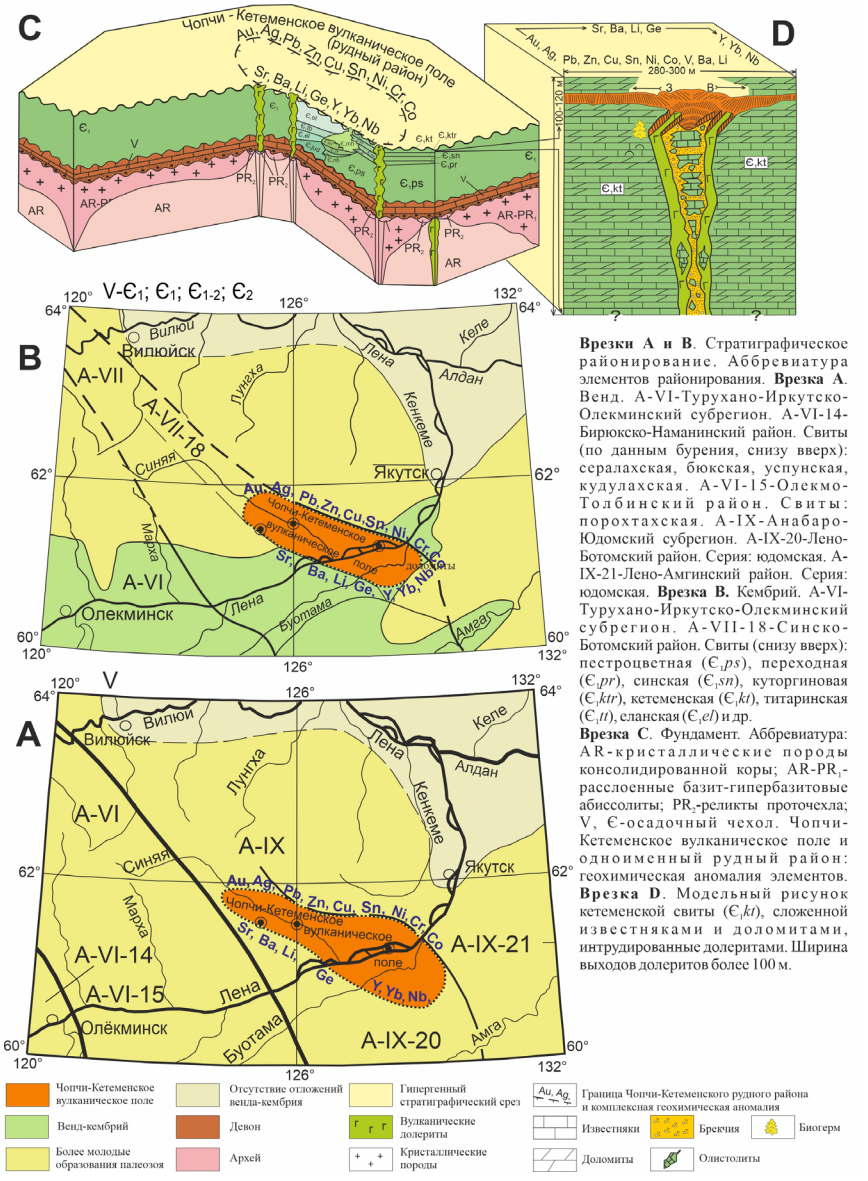


Рисунок 1. Модельный стратифицированный ряд (врезки A, B, C, D) глубинной ремобилизации и регенерации рудоносных комплексов кристаллического фундамента и их поярусного (от древних к молодым) телескопирования в осадочный слой с образованием суперконцентраций металлов в виде эквивалентных им по масштабу обособленных рудных районов.

Figure 1. A model of stratified series (insets A, B, C, D) showing deep remobilization and regeneration of ore-bearing complexes in the crystalline basement, followed by their belt-like telescoping (from oldest to youngest) into the sedimentary layer, resulting in the formation of metal superconcentrations as discrete ore districts of comparable scale.

Анализ аэрофотогеологического картирования м-ба 1:200 000 Лено-Алданского междуречья в совокупности с глубоким колонковым бурением

на нефть и газ позволяет установить и проследить в пространстве древней платформы на погребенном склоне Анабаро-Синского барьерного рифа границу западного и восточного флангов новой провинции (рис. 1, врезки А и В). Западный её фланг в венде и кембрии (аббревиатура A-VI) граничит с Турухано-Иркутско-Олекминским субрегионом; восточный – погребен под более молодыми образованиями и по данным бурения не определен. Биогермный риф специализирован на вкрапленное и линзовидно-пластовое свинцово-цинковое с серебром оруденение стратиформного типа [2]. В его пределах, в вертикальном разрезе и по площади распространения, модельно представлено Чопчи-Кетеменское вулканическое пое и одноименный рудный район с комплексной геохимической аномалией металлов благородной, халькофильной, сидерофильной и редкоземельной групп (рис.1, врезки A, B, C, D).

Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН и профинансирована Минобнауки России, проекты FUFG-2024-0005 и FUFG-2024-0007.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гриненко В.С., Баранов В.В.** Верхояно-Охотская черносланцевая рудоносноя провинция на северо-востоке Евразии и её перспективная минерагения // Сб. тезис. докл. XIII Междунар. науч.-практич. конф. "Научн.-метод. основы прогноза, поисков, оценке месторождений алмазов, благородных и цветных металлов" М.: ЦНИГРИ, 2024. С. 96–98.

2. **Гриненко В.С., Баранов В.В., Васильева Т.И.** Стратифицированный тренд рудоносной нелинейной металлогении в докембрии и фанерозое на северо-востоке Азии // Сб. тезис. докл. XIV Междунар. научн.-практич. конфер. «Геология, прогноз, поиски и оценка месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». М.: ЦНИГРИ, 2025. С. 95–97.

3. **Гриненко В.С., Баранов В.В., Девятов В.П.** Северо-Азиатская черносланцевая рудоносная мегапровинция на северо-востоке Евразии и её перспективная минерагения // Руды и металлы. 2022. № 2. С. 36–55.

4. **Гриненко В.С., Баранов В.В., Блоджетт Р.Б., Горячева А.А.** Палеогеография, палеобиогеография, геодинамика палеобассейнов Земли в позднем триасе и стратиграфия терминального триаса Бореальной надобласти // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. Т. 24. № 1. С. 5–17.

5. **Мишнин В.М., Бадарханов Ю.Н., Болознев В.И.** Якутский мегакратон: нетрадиционные аспекты тектоники и минерагении. Якутск: Якутское книж. изд., 1987. 150 с.

6. **Мишнин В.М., Истомин И.Н., Гриненко В.С.** Новая рудоносная провинция на востоке Сибирской платформы // Вестник Госкомгеологии РС (Я). Якутск: Якутский филиал изд-ва СО РАН, 2002. № 1 (2). С. 6–14.

7. **Щеглов А.Д.** Нелинейная металлогения: понятие и сущность проблемы // Металлогения Сибири. Т.1. Тез. докл. XI Всесоюз. металлоген. совещ. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1987. С. 242–246.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЗОЛОТОНОСНОСНЫХ ПЛОЩАДЕЙ, ПЕРЕКРЫТЫХ БАЗАЛЬТАМИ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЗАПАДНО–СИХОТЭ-АЛИНСКОЙ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ

Г.З. Гильманова[1], М.Ю. Носырев[1], А.Н. Диденко[1,2]

[1]Институт Тектоники и геофизики, ДВО РАН, г. Хабаровск,
e-mail: gigulya@yandex.ru, ns041ck@yandex.ru

[2]Геологический институт РАН, г. Москва

Аннотация. На основе расчетов трансформант и статистических характеристик данных космической радиолокационной съемки (SRTM03) проведен анализ цифровой модели рельефа северной части Западно-Сихотэ-Алинской металлогенической зоны. В исследуемом районе потенциально перспективные для выявления новых месторождений золота площади в значительной степени перекрыты неогеновыми базальтами, что определяет специфику применения дистанционных методов. Выявлен ряд закономерностей распределения потенциально золотоносных площадей в связи с особенностями рельефа. Намечен ряд как линейных элементов рельефа, которые могут соответствовать разломам, так и кольцевых, которые могут отвечать локальным интрузивно-купольным и вулкано-тектоническим структурам позднего мела-палеогена, являющимся для площади потенциально золотоносными.

A DIGITAL ELEVATION MODEL IN STUDYING GOLD-BEARING AREAS COVERED BY BASALTS IN THE NORTHERN PART OF THE WEST SIKHOTE-ALIN METALLOGENIC ZONE.

G.Z. Gilmanova[1], M.Yu. Nosyrev[1], A.N. Didenko[1,2]

[1]Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk,
e-mail: gigulya@yandex.ru, ns041ck@yandex.ru

[2]Geological Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow

Abstract. Based on the calculations of transformation and statistical characteristics of space radar survey data (SRTM03), the digital elevation model of the northern part of the West Sikhote-Alin metallogenic zone was analyzed. In the studied area, areas potentially promising for identifying new gold deposits are largely covered by Neogene basalts, which determines the specifics of the application of remote sensing methods. A number of patterns in the distribution of

potentially gold-bearing areas in connection with the relief features were identified. A number of both linear relief elements that may correspond to faults and ring elements that may correspond to local intrusive-dome and volcano-tectonic structures of the Late Cretaceous-Paleogene, which are potentially gold-bearing for the area, were outlined.

В ряде золоторудных районов Сихотэ-Алинского орогенного пояса (САОП) на больших площадях развиты неогеновые базальты, которые перекрывают потенциально перспективные для выявления новых месторождений золота площади. Отметим лишь некоторые из них: южная часть Усть-Амурской металлогенической зоны, Западно–Сихотэ–Алинская металлогеническая зона, район месторождения золота Салют и др. В связи с этим, изучение площадей с относительно небольшими мощностями базальтов представляется актуальным с точки зрения поисков новых месторождений коренного золота. Важная роль при этом принадлежит геофизическим методам, но они имеют ряд ограничений. Например, результаты магнитной съемки на площадях перекрытия базальтами сложны для интерпретации и выделения «подбазальтовой» составляющей в связи со сложным знакопременным полем от самих базальтов. Глубинная электроразведка имеет достаточно высокую стоимость и не всегда может быть использована при изучении больших площадей. Поэтому актуально дополнительно использовать другие методы, которые позволяют дистанционно получить какую-либо информацию о геологической ситуации под базальтами. Одним из таких направлений является анализ особенностей рельефа с задачей выделения «подбазальтовых» геологических структур. Этот подход был реализован нами в северной части Западно-Сихотэ-Алинской металлогенической зоны, где неогеновые базальты развиты на большой площади и покрывают до 30% исследуемой территории. Здесь в эрозионном окне известно месторождение золота Болотистое, к югу от него на расстоянии 90 км известны проявления золота Пунчи и Рыбачье, а вся большая территория между ними покрыта неогеновыми базальтами, хотя по ряду региональных признаков она может рассматриваться как перспективная на выявление месторождений коренного золота.

Изучаемая площадь характеризуется довольно сложной тектонической позицией. Ее восточная часть принадлежит Самаркинскому террейну юрской аккреционной призмы; западная часть, где фиксируются многочисленные выходы маноминской свиты, выделяется как фрагмент Киселевско-Маноминского террейна; центральная часть в пределах узкой полосы сложена осадками, относящимися к Журавлевско-Амурскому турбидитовому террейну [1]. Площадь ограничена глубинными разломами: в восточной части Центральным Сихотэ-Алинским, с запада – Маноминским. Здесь широко развит позднемеловой-палеогеновый магматизм, выделяются вулканогенные структуры (северянский, моадийский вулканические комплексы),

отдельные палеогеновые интрузии (аванский, левотормасинский комплексы), представленные в основном диоритами монцонитами, на заключительных стадиях лейкогранитами. Эти образования занимают большую площадь и, согласно [3] объединяются в Мухен-Анюйскую вулкано-тектоническую структуру (ВТС) размером 15–40 х 130 км, вытянутую в северо-восточном направлении. Значительная часть площади и практически вся ВТС перекрыты неогеновыми базальтами, которые относятся к острогорскому комплексу и на изучаемой территории имеют относительно небольшую мощность от первых десятков до 100 м [4].

Месторождение Болотистое расположено в эрозионном окне среди базальтов в экзоконтактовой зоне небольшой палеогеновой интрузии габбро-диоритов, прорывающей нижнемеловые алевролито-песчаниковые отложения. Интрузии отвечает хорошо выраженная кольцевая магнитная аномалия интенсивностью до 5000 нТл и размером 2.5х1.3 км. Этот участок достаточно определенно выражен и в рельефе: выделяются кольцевая аномалия, соответствующая эрозионному окну и кольцевые элементы, соответствующие диоритовой интрузии. Также видны линейные элементы северо-западной ориентировки, с которыми можно связывать разломы.

Таким образом, морфоструктурный анализ должен быть направлен на выявление как линейных элементов рельефа, которые могут соответствовать разломам, так и кольцевых, которые могут отвечать локальным интрузивно-купольным и вулкано-тектоническим структурам позднего мела-палеогена, являющимся для площади потенциально золотоносными.

В условиях относительно выположенного рельефа, где слабо просматриваются отдельные его элементы, важное значение приобретает компьютерная обработка. Для обработки цифровой модели рельефа (SRTM03) использовались собственные разработки ИТиГ ДВО РАН [6], программа автоматического поиска линейных элементов рельефа (в ряде случаев выделяются и кольцевые структуры, как результат интерполяции линейными элементами) и их статистической обработки Winlessa [6]. Применяемый комплекс позволяет максимально наглядно выделить или разделить те или иные тектонические структуры, границы блоков с разными характеристиками, получить ряд статистических характеристик, которые могут выявить неочевидные особенности изображений. Рассчитаны карты крутизны склона, модуля градиента рельефа с разными масштабными параметрами, вторая производная (Лапласиан на поверхности Гаусса), цветные RGB изображения, синтезированные из результатов расчетов различных операторов, примененных к исходной ЦМР, плотности элементарных линейных элементов (ЭЛЭ), линий преобладающей вытянутости роз-диаграмм (ЛВ), линеаментов.

Основные выводы проведенных исследований следующие.

Площадь находится в узле пересечения крупнейших разломов САОП (ЦСАР и Маноминского), имеющих СВ ориентировку с серией широтных разломов,

отвечающих одной из ранее выделявшихся «сквозных рудоконцентрирующих структур» [2]. Это является одним из региональных критериев перспективности. Широтные разломы хорошо проявлены в трансформантах рельефа, таких как синтезированные цветные изображения. Отчетливо видно, как они смещают отрезки ЦСАР и далее могут быть прослежены под базальты.

По данным анализа плотности элементарных линейных элементов субширотного направления выделяется крупная структура СВ ориентировки, скрытая под базальтами, отвечающая, очевидно, серии крупных разломов, которые могут иметь рудоконтролирующее значение. Она пространственно соотносится с важным элементом глубинного строения территории – линейной зоной повышенной плотности в нижней коре и верхней мантии и магнитным телом на глубинах 10-20 км, интерпретируемых как палеомагматические очаги. Мухен-Анюйская ВТС вытянута как раз вдоль этой глубинной зоны, находящей отражение в рельефе.

В пределах площади выделен ряд локальных кольцевых и дуговых элементов рельефа, отражающие структуры, скрытые под базальтами и связанные, вероятно, с палеогеновыми интрузиями, т.е. фиксирующими обстановку месторождения Болотистое. Такие элементы могут быть связаны и с вулканогенными структурами, что также важно в аспекте золотоносности территории.

Выполненный морфоструктурный анализ позволил выделить в северной части Западно-Сихотэ-Алинской структурно-металлогенической зоны на обширной территории, перекрытой позднемиоцен-плейстоценовыми базальтами острогорского комплекса, ряд характерных кольцевых и линейных элементов, которые могут отражать магматогенные структуры позднего мела-палеогена, фрагменты разрывной тектоники и представлять интерес с точки зрения поисков месторождений золота.

Анализ рельефа для определенных геолого-структурных обстановок может рассматриваться как один из методов выделения (в составе общего комплекса поисковых работ) позднемеловых-палеогеновых геологических структур под перекрывающими неогеновыми базальтами. Безусловно, выделяемые морфоструктурные элементы нуждаются в дальнейшем в комплексном анализе, уточнении их природы, последующей заверке. Рассматриваемая площадь не единственная в САОП, где перспективные для поисков месторождений золота обстановки перекрыты базальтами. В связи с этим использованный подход может быть полезен и для других регионов с учетом их геологической специфики.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-17-00023-П (https://rscf.ru/project/22-17-00023/). Базовое финансирование за счет субсидий на выполнение государственных заданий ИТиГ ДВО РАН (темы НИР № 121021000095-1, № 121021000094-4) и ГИН РАН (тема № FMMG-2023-0010).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России:** в 2 кн. / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 С.

2. **Глобальные закономерности размещения крупных рудных месторождений.** М.: Наука, 1974. 192 с.

3. **Государственная** геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист М-53 — Хабаровск. Объяснительная записка//С-Пб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2009. 376 с.

4. **Нигай Е.В.** Базальтоилы острогорского комплекса: геология, возраст, геохимия, геодинамика (Западный Сихотэ-Алинь) // Отечественная геология. 2022. № 6. С. 17-33. https://doi.org/10.47765/0869-7175-2022-10032

5. **Рыбас О.В., Гильманова Г.З.** Применение теории масштабных пространств для ЦМР среднего разрешения в геологических и тектонических исследованиях // Геоморфология. 2019. № 2. С. 68-78.

6. **Zlatopolsky A.** Description of texture orientation in remote sensing data using computer program LESSA // Computers & Geosciences. 1997. V. 23. N 1. P. 45-62.

НОВЫЕ ДАННЫЕ ПО ЗОЛОТОРУДНОМУ МЕСТОРОЖДЕНИЮ ГЛУХОЕ (ЦЕНТРАЛЬНЫЙ СИХОТЭ-АЛИНЬ)

А.А. Гребенникова[1,3], К.Н. Доброшевский[2,3], В.Н. Бахтина[1,3], Н.А. Горячев[3]

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: anylotina@mail.ru

[2]ООО «Малиновское», г. Владивосток

[3]Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

Аннотация. На основании минералого-геохимических исследований в рудах месторождения Глухое выявлены лёллингит, арсенопирит, пирит, галенит и самородная медь. Температура гомогенизации флюидных включений в кварце варьирует от 244 до 318 °С. Типоморфные особенности вещественного состава руд и геологического строения месторождения Глухое указывают на его принадлежность к типу золоторудных месторождений обстановок трансформной континентальной окраины. Выдвигается предположение об участии подкорового источника рудного вещества в формировании золоторудного месторождения Глухое.

NEW DATA ON THE GLUKHOE GOLD DEPOSIT (CENTRAL SIKHOTE-ALIN)

A.A.Grebennikova[1,3], K.N. Dobroshevsky[2,3], V.N. Bakhtina[1,3], N.A. Goryachev[3]

[1]Primorsky Branch Far East Geological Institute FEB RAS, e-mail: anylotina@mail.ru

[2]SC “Malinovskoe”LLC;

[3]North-Eastern Scientific Center, N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS

Abstract. Based on mineralogical and geochemical studies of gold-bearing ore veins of the Glukhoe deposit, loellingite, arsenopyrite, pyrite, galena and native copper were identified. The homogenization temperature of fluid inclusions in quartz varies from 244 to 318 °C. Typomorphic features of the material composition of ores and the geological structure of the Glukhoe deposit indicate that it belongs

to the type of gold ore deposits in transform continental margin settings. It is suggested that a subcrustal source of ore matter was involved in the formation of the Glukhoe gold ore deposit.

Золоторудное месторождение Глухое расположено на территории Красноармейского муниципального района в междуречье Арму–Колумбе — правых притоков р. Большая Уссурка. Оно находится в северо-восточной части Благодатненского Sn-W-Au-рудно-россыпного узла в составе Арминского рудного района Тагэму-Арминской минерагенической зоны. В региональном структурно-тектоническом плане месторождение локализовано в Журавлёвском террейне, входящем в состав Сихотэ-Алинского складчатого пояса [5, 6].

Месторождение находится в крупной тектонической структуре — Колумбинской антиформной структуре, разбитой многочисленными разрывными нарушениями, среди которых выделяется рудоконтролирующий Кулишовский разлом, который большей частью совпадает с простиранием складчатых структур [5, 6, 9].

Рудовмещающими являются углеродистые алевроглинистые отложения позднеюрского возраста колумбинской толщи и алевролиты раннемеловой приманковской свиты [5, 6, 10]. Терригенные породы собраны в серию складок северо-восточного, субмеридионального простирания [5, 6, 7, 10]. В северной части месторождения известна серия штоков, сложенных габбро-монцодиоритами и монцодиоритами, датированными 103 млн лет, с которыми предполагается связь оруденения [5].

На месторождении выделено несколько рудных зон северо-восточного простирания. Наиболее представительная зона — Основная — протяженностью 4 км, шириной 300 м включает до 20 рудных минерализованных зон смятия, представленных перемятыми черносланцевыми породами, вмещающими сульфидно-кварцевые жильно-прожилковые тела и брекчии. Длина Главного рудного тела 1400 м, средняя мощность до глубины 400 м 19 м, в раздувах до 83.9 м. Содержание в рудах Сорг. 0.09–0.93%, сульфидов 2–12% (преимущественно пирит, арсенопирит, пирротин и др.) [6, 10]. Основными рудными минералами являются арсенопирит, пирит. В качестве редких минералов отмечены [3, 4, 5, 6, 10] шеелит, акантит, блеклая руда, станнин, киноварь, молибденит, касситерит, антимонит, самородные Sb, Fe, Pt, что обусловило мнение о многостадийности руд [4, 5]. Основная масса Au тонкодисперсная и связана с сульфидами [3, 4, 5, 6, 10]. Нами проведено исследование рудных минералов из штуфных проб из южного фланга рудной зоны Основная с помощью оптической микроскопии и электронно-зондового микроанализа, а также изучены флюидные включения в рудоносном кварце. Исследования флюидных включений выполнены в ДВГИ ДВО РАН. Для термо- и криометрических исследований использовался Nikon E — 600 POL

Optical Microscope for Geological Studies, Jeol (Япония) в комплекте с цифровой телекамерой, термостоликом и криостоликом THMS 600 (-190 +600 °C).

В рудах были установлены лёллингит, арсенопирит, пирит, галенит и самородная медь.

Лёллингит образует индивидуальные включения в кварце или выполняет в последнем трещины. Размер зерен лёллингита колеблется от 50 до 200 мкм.

Арсенопирит образует отдельные идиоморфные удлиненные кристаллы от 1 до 4 мкм в кварце. По арсенопириту развивается скородит, который образует и самостоятельные выделения в кварце.

Пирит образует идиоморфные кристаллические выделения от 1 до 3 мкм. Часто агрегаты пирита трещиноваты и катаклазированы. Пирит по отношению к арсенопириту является более поздним.

Галенит встречается редко, образует единичные выделения в интерстициях кварца. Размер зерен от 2 до 5 мкм.

Самородная медь установлена в виде единичных вкрапленников в интерстициях в кварце от 5 до 20 мкм.

Скородит образует самостоятельные выделения или замещает арсенопирит. В скородите были установлены примеси Co и Ni. Их содержание варьирует от 0.4 до 0.8 мас. %.

Для исследования флюидных включений были изучены кристаллы кварца из кварцевых жил, имеющие облик шестигранных псевдогексагональных призм с четкими кристаллографическими очертаниями. Особое внимание уделено первичным включениям, которые имеют форму отрицательных кристаллов. Они распределены неравномерно в объеме кварца внутри зерен, вдоль трещин и в краевой части зерен кварца. Формы преимущественно изометричные. Среди флюидных включений в кварце выделены первичные, первично-вторичные и вторичные включения. Флюидные включения очень мелкие, от 5 до 8 мкм, редко до 12 мкм. Первично-вторичные включения приурочены к трещинам в наружных зонах зерен, а также в периферической и центральной частях кристаллов кварца. Среди изученных флюидных включений по фазовому составу при комнатной температуре выделяются двухфазовые и редко однофазовые. Результаты термо- и криометрических исследований изложены ниже.

Из-за мелкого размера включений не удалось измерить температуру эвтектики и температуру плавления льда. Температура гомогенизации включений варьирует от 244 до 318 °C. Предположительно, вторичное включение было гомогенизировано при температуре 61 °C. Одно включение, размером 12 мкм, расположенное на границе зерен кварца, не гомогенизировалось при температуре 598 °C. Два флюидных включения декрипитировались при температуре примерно 330 °C.

Учитывая возраст рудоносных интрузий, тектоническое строение, многокомпонентный состав руд, можно предположить, что образование

месторождения Глухое связано с орогенным магматизмом, проявившемся в режиме трансформной континентальной окраины [7, 8]. Находка самородной меди свидетельствует о восстановленности флюида и дает основание параллелизовать Глухое с альб-сеноманским медно-золоторудным Малиновским месторождением [1]. Исходя из изотопных данных Hf ($^{186}Hf/^{187}Hf$) [5], наличия Au, Pt, Cu, а также примесей Co и Ni в скородите, можно сделать предположение о возможном подкоровом источнике рудного вещества.

Исследование выполнено в рамках гранта Российского научного фонда № 23-47-00064.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Гвоздев В.И., Доброшевский К.Н., Вах А.С., Горячев Н.А., Степанов В.А., Федосеев Д.Г.** Малиновское месторождение - новый тип золоторудной минерализации в Приморском крае, Россия (геология, минералогия, генезис) // Тихоокеанская геология. 2016. Т. 35. № 1. С. 37–53.

2. **Иванов В.В., Шелехов А.Е., Молчанова Г.Б., Попова М.А, Неменман И.С.** Особенности золотого оруденения в углеродистых толщах Центрального Сихотэ-Алиня и Южного Верхоянья // Материалы Международной конференции “Современные проблемы геологии, поисков, разведки и оценки месторождений полезных ископаемых”, посвященная 100-летию со дня рождения профессора В. М. Крейтера — ученого, исследователя, педагога и организатора науки. М.: ПАИМС, 1997. С. 38-39.

3. **Ненахова Е.В., Фелофьянов Д.С.** Внутреннее строение рудоконтролирующей структуры и особенности золоторудной минерализации месторождения Глухое (Приморский край) // Материалы IV Всероссийской конф. с международным участием "Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит". ДВГИ ДВО РАН. Владивосток, 2018. С. 281-283.

4. **Ненахов В.М., Никитин А.В., Фелофьянов Д.С., Ненахова Е.В.** Структурно-вещественные особенности рудного поля «Глухое» в контексте эволюции Журавлёвского террейна (Сихотэ-Алинь) // Вестник ВГУ. Серия: Геология. 2018. № 1. С. 67–76.

5. **Сахно В.Г., Коваленко С.В., Баринов Н.Н., Лызганов А.В., Кузнецов Ю.А.** Монцонитоидный магматизм золоторудного месторождения «Глухое»: изотопное датирование (U-Pb, SHRIMP), петро- и микроэлементный состав и особенности благородно-метальной минерализации (Приморье) //Докл. АН. 2015. Т. 465. № 3. С. 329–337.

6. **Степанов В.А.** Металлогения золота Приморья // Вестник Амурского государственного университета. Серия: естественные и экономические науки. 2012. № 59. С. 112-119.

7. **Ханчук А.И.** Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2-х кн. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.

8. **Ханчук А.И., Гребенников А.В., В.В. Иванов В.В.** Альб-сеноманские окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // Тихоокеанская геология. 2019. Т. 38. № 3. С. 4–37.

9. **Ханчук А.И., Иванов В.В.** Геодинамика Востока России в мезо-кайнозое и золотое оруденение // Геодинамика и металлогения. Владивосток: Дальнаука, 1999. С. 7-30.

10. **Эйриш Л.В.** К перспективам выявления крупных золоторудных месторождений в складчатых комплексах и структурах активизации Приамурья и Приморья // Руды и металлы. 2010. С. 5-16.

МЕТАЛЛОНОСНОСТЬ РАННЕПАЛЕОЗОЙСКИХ ЧЕРНЫХ СЛАНЦЕВ ПРИБАЛТИЙСКОГО ПАЛЕОБАССЕЙНА: АНАЛИЗ МЕТОДОМ ИНАА С РАДИОНУКЛИДНЫМ ИСТОЧНИКОМ НЕЙТРОНОВ

С.И. Иванников[1], В.В. Иванов[2], Н.С. Маркин[1], Л.А. Земскова[1], И.С. Окунев[3]

[1]Институт химии ДВО РАН, г. Владивосток
e-mail: fyajkfqn@mail.ru

[2]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

[3]Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Санкт-Петербург

Аннотация. Показана возможность и эффективность применения метода инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) с радионуклидным источником нейтронов на основе Cf-252 для количественного определения ценных микроэлементов в углеродсодержащих горных породах на уровне фонового (медианного) содержания и ниже. Приведены результаты анализа сланцевых руд Прибалтийского палеобассейна на наличие восьми ценных микроэлементов методом ИНАА.

METALLIFEROUS CONTENT OF EARLY PALEOZOIC BLACK SHALES OF THE BALTIC PALEOBASIN: INAA ANALYSIS WITH A RADIONUCLIDE NEUTRON SOURCE

S.I. Ivannikov[1], V.V. Ivanov[2], N.S. Markin[1], L.A. Zemskova[1], I.S. Okunev[3]

[1]Institute of Chemistry FEB RAS, Vladivostok, e-mail: fyajkfqn@mail.ru

[2]Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok

[3]Petersburg Nuclear Physics Institute named by B.P. Konstantinov of National Research Centre «Kurchatov Institute», St. Petersburg

Abstract. The possibility of using instrumental neutron activation analysis (INAA) with a radionuclide neutron source based on Cf-252 for the quantitative determination of valuable trace elements in carbonaceous rocks at the median

content level and below is shown. The results of the analysis of shale ore samples from the Baltic paleobasin for the presence of eight valuable trace elements by the INAA method are presented.

Бассейн распространения диктионемовых сланцев протягивается из районов Норвегии, Дании, Южной Швеции и Эстонии в Ленинградскую область до р. Сясь.

Раннепалеозойские ($Є_3$-O_1) тонкозернистые черные сланцы (или - диктионемовые сланцы, квасцовые сланцы, граптолитовые аргиллиты, углеродистые аргиллиты) широко распространены на северо-западе Восточно-Европейской платформы в обрамлении Балтийского щита. Их горизонт в пределах Прибалтийского палеобассейна простирается на огромной территории от р. Сясь Ленинградской области России через Эстонию, Латвию, Литву и Польшу, прослеживаясь на островах и суше Южной Швеции, Дании и Норвегии. Для этих обогащенных углеродистым веществом пород показательны повышенные содержания ряда ценных металлов — U, V и Mo, а также Au, Ag, Pt, Re и др. В некоторых местах Швеции содержание U в черных сланцах (квасцовых сланцах) достигает 300 г/т. Содержание V и Mo в черных сланцах Эстонии (граптолитовых аргиллитах) достигает 1600 и 1000 г/т [1, 7]. Такая значительная обогащенность металлами черных сланцев Прибалтийского палеобассейна обуславливает их перспективность в качестве потенциального минерального сырья. Вместе с тем, при оценке конкретных площадей развития таких сланцев необходимо оперативное массовое опробование проб с применением эффективных неразрушающих методов анализа.

Для точного аналитического определения широкого круга металлов в углеродистых горных породах (торф, уголь, чёрные сланцы, графитистые метаморфиты и др.) необходимо использовать особые методы пробоподготовки к анализу проб. Кристаллический углерод, присутствующий в подобных пробах, делает их чрезвычайно устойчивыми к различным внешним воздействиям, включая обжиг, окисление и кислотное разложение. Это создает трудности и при анализе общего содержания металлов, и при разработке технологий обогащения и переработки подобных пород [3]. Эффективный анализ таких геологических образцов может быть осуществлён с помощью ядерно-физических методов [2].

Метод инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) представляет собой один из самых точных и чувствительных способов определения различных элементов [5]. Он активно используется в самых разнообразных сферах: для контроля загрязнения окружающей среды; для анализа горных пород и минерального сырья; для изучения распределения редкоземельных элементов в геохимических и геологических исследованиях [4, 5]. Одним из важных преимуществ метода ИНАА является

возможность анализировать пробы в их первоначальном виде, без какой-либо предварительной подготовки.

ИНАА проводили на разработанной в Институте химии ДВО РАН установке [6]. Установка состоит из источника нейтронов Cf-252, зоны термализации нейтронов, зоны активации с радионукилдным источником Cf-252 и гамма-спектрометрического комплекса на основе полупроводникового детектора. Пробы облучали потоком термализованных нейтронов в зоне активации, затем измеряли спектр гамма-квантов, испускаемых образцом в результате распада короткоживущих радионуклидов, которые образовались в ходе реакций нейтронного захвата.

Расчёт минимальных обнаруживаемых концентраций для метода ИНАА показал, что чувствительность при определении большинства ценных микроэлементов находится на уровне, соизмеримом или ниже медианного содержания в черных сланцах. Исключением является золото, чье медианное содержание в сланцах на порядок ниже минимальной концентрации, которую можно определить методом ИНАА с радиониуклидным источником Cf-252. Таким образом, применение метода ИНАА для золота ограничено пробами с повышенным содержанием металла.

Нами методом ИНАА проанализированы диктионемовые сланцы Прибалтийского бассейна на наличие восьми микроэлементов (рис. 1). В результате были обнаружены повышенные концентрации U, V, Mo и ряда РЗЭ. Установлено, что среднее содержание U в пробах варьирует в диапазоне 68-276 г/т. Концентрация U достигает минимального промышленно значимогоуровня 300 г/т, максимальное зафиксированное значение составило 460 г/т. Наибольшая концентрация U выявлена в пробах Ленинградской области России. Практически во всех исследованных пробах наблюдаются повышенные содержания РЗЭ. Среднее суммарное содержание РЗЭ в диктионемовых сланцах составляет 289 г/т. В пробах также наблюдаются повышенные концентрации V и Mo. Среднее содержание V варьируется от 99 до 927 г/т, а содержание Mo от 109 до 262 г/т. Полученные результаты хорошо соотносятся с данными, описанными в литературе.

Между содержанием U и содержаниями V, Mo и РЗЭ были выявлены различные коэффициенты корреляции (кк). Так, уран в пробах тесно связан с ванадием – кк между ними составляет 0.74, что свидетельствует о сильной взаимосвязи. Между ураном и молибденом кк=0.39, а ураном и суммой РЗЭ кк = 0.36.

При отсутствии доступа геологов к крупным исследовательским ядерным реакторам есть возможность выбрать метод ИНАА, использующий радионуклидный источник нейтронов Cf-252. Он послужит эффективным инструментом получения надежных данных о содержании указанных и других ценных элементов в углеродсодержащих горных породах, трудных для

методов анализа, которые требуют сложного и дорогостоящего химического разложения проб.

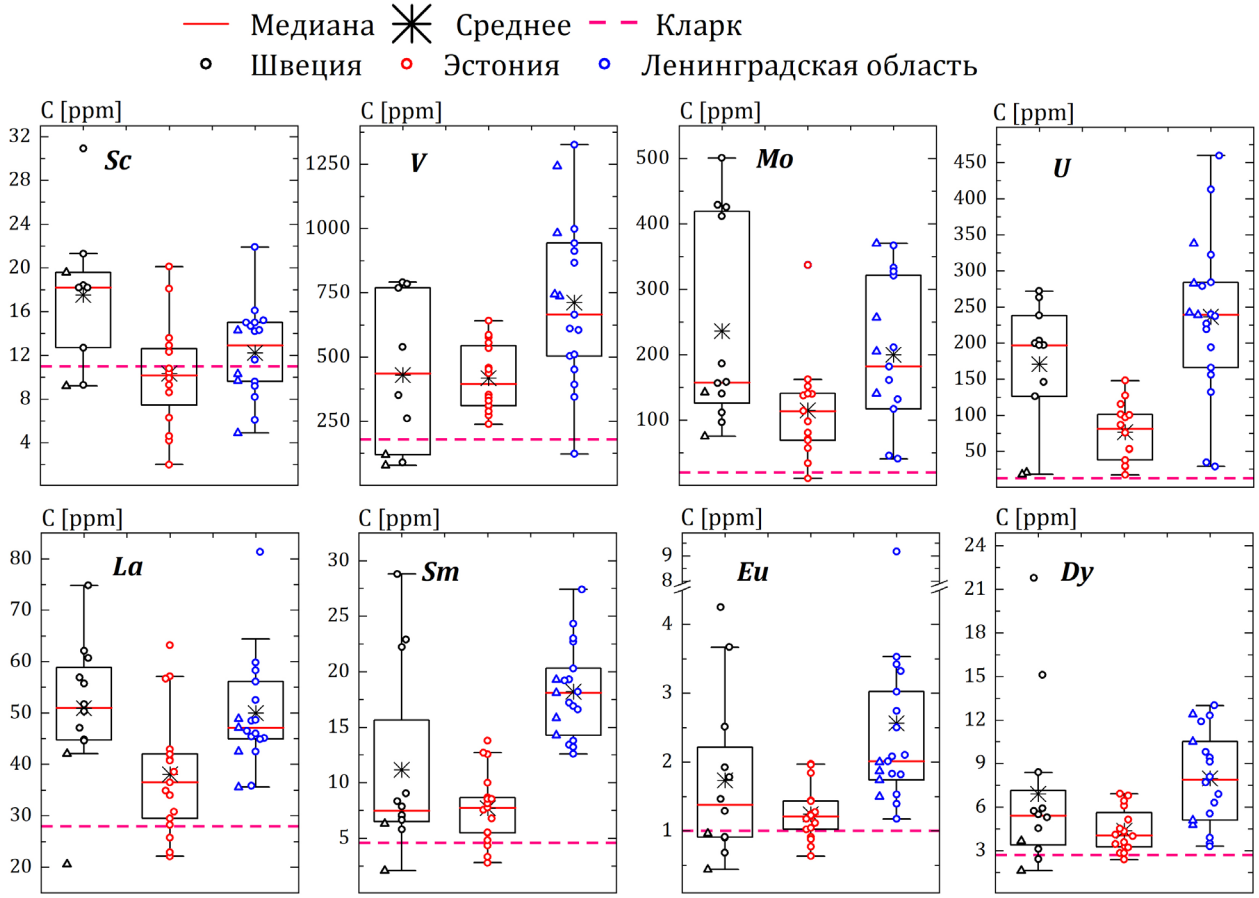


Рисунок 1. Распределение микроэлементов в пробах сланцев, по данным ИНАА.

Figure 1. Distribution of trace elements in shale samples according to INAA data.

ЛИТЕРАТУРА:

1. **Вялов В.И., Дю Т.А., Шишов Е.П.** Уран и редкоземельные элементы в диктионемовых сланцах Прибалтийского бассейна (Кайболово-Гостилицкая площадь) // Георесурсы. 2024. Т. 26. № 1. С. 3-19.

2. **Иванов В.В., Зарубина Н.В., Зиновьев В.Г., Окунев И.С., Шуляк Г.И., Остапенко Д.С** Сравнительная оценка содержания рения в углеродсодержащих горных породах методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой и инструментального нейтронно-активационного анализа // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. 2015. № 5. С. 49-58.

3. **Иванов В.В., Ханчук А.И., Кононов В.В., Земскова Л.А., Зарубина Н.В., Фокин К.С.** Вещественные особенности углеродистых сланцеватых аргиллитов (диктионемовых сланцев) и проблемы освоения комплексного минерального сырья редких и благородных металлов // Матер. III международной конференции по химии и химической технологии. Ереван, 2013. С. 259-260.

4. **Attallah M.F., Abdou F.S., Aly H.F.** Microanalysis and signature of rare earth elements in geochemical samples using neutron activation analysis // Radiochim. Acta. 2021. V. 109. N 3. P. 225-232.

5. **Das D.D., Sharma N., Chawla P.A.** Neutron activation analysis: An excellent nondestructive analytical technique for trace metal analysis // Critical Reviews in Analytical Chemistry. 2024. V. 54. N 7. P. 2450-2466.

6. **Ivannikov S.I., Ivanov V.V., Markin N.S., Ruslan A.V., Zemskova L.A.** Determination of Strategic Metals in Graphitic Formations by the Methods of Neutron Activation Analysis with a Californium Source // Inorganic Materials. 2024. V. 60. N 3. P. 317-327.

7. **Ofili S., Soesoo A., Panova E.G., Hints R., Hade S., Ainsaar L.** Geochemical reconstruction of the provenance, tectonic setting and paleoweathering of lower paleozoic black shales from northern Europe // Minerals. 2022. V. 12. N 5. P. 602.

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ AU И AS В ПИРИТЕ ВОРОНЦОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (СЕВЕРНЫЙ УРАЛ, ТИП КАРЛИН)

Е.В. Ковальчук[1,2], Б.Р. Тагиров[1], М.С. Никольский[1], С.Е. Борисовский[1], В.Б. Комаров[1], И.В. Викентьев[1]

[1]Институт геологии рудных месторождений, минералогии, геохимии и петрографии РАН, г. Москва, e-mail: elena7kovalchuk@gmail.com

[2]Российский государственный геологоразведочный университет им. С. Орджоникидзе, г. Москва

Аннотация. Было проведено изучение химического состава и характера распределения элементов в пирите Воронцовского месторождения (Северный Урал, тип Карлин) и синтетическом пирите (гидротермальный синтез при температурах 350 °С и 490 °С) методами РСМА, ЛА ИСП-МС и EBSD. На основе полученных данных для синтетического пирита было сделано предположение, что Au в пирите может содержаться в виде лёллингитоподобных кластеров [$AuAs_{10}$], которые в большей степени обогащают грани форм {210}, {113} и {111}.Такие же данные были получены и для пирита Воронцовского месторождения.

FEATURES OF AU AND AS DISTRIBUTION IN PYRITE OF THE VORONTSOVKA DEPOSIT (NORTH URALS, TYPE CARLIN)

E.V. Kovalchuk[1,2], B.R. Tagirov[1], M.S. Nickolsky[1], S.E. Borisovsky[1], V.B. Komarov[1], I.V. Vikentyev[1]

[1]Institute of Geology of Ore Deposits, Mineralogy, Geochemistry and Petrography RAS, Moscow, e-mail: elena7kovalchuk@gmail.com

[2]Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow

Abstract.The chemical composition and distribution of elements in the pyrite of the Vorontsovka deposit (North Urals, type Carlin) and synthetic pyrite (hydrothermal synthesis were performed at 350 °C and 490 °C) were studied by EPMA, LA ICP-MS, and EBSD. Based on the data obtained for the synthetic pyrite, it was assumed that Au in pyrite,most probably,presents in the form of clusters [AuAs10]. The [AuAs10] clusters enrich the {210}, {113}, and {111}pyrite faces. The same data were obtained for the pyrite of the Vorontsovka deposit.

В рудах гидротермальных месторождений сульфиды часто содержат Au в «невидимой» форме, которую невозможно идентифицировать с помощью методов оптической и сканирующей электронной микроскопии. Из опубликованных данных известно, что «невидимое» золото может присутствовать в виде наноразмерных включений Au или соединений Au с полуметаллами, а также быть рассеяно в сульфидах в виде изоморфной примеси [1]. Пирит является одним из основных рудных минералов ряда гидротермальных месторождений, включая крупные и суперкрупные месторождения, где Au добывается в качестве основного рудного компонента или извлекается попутно. Для многих типов гидротермальных месторождений установлена положительная корреляция между содержаниями Au и As в пирите [2].

В рудах Воронцовского месторождения тонкорассеянное золото обычно ассоциирует с мышьяковистым пиритом и арсенопиритом, для которых температура кристаллизации определена в диапазоне 200–380 °C. Вмещающими породами являются девонские карбонатные и туфогенные образования, а также скарны и скарноиды, образовавшиеся в малоглубинных (субвулканических) условиях.

Пирит Воронцовского месторождения исследовался рентгеноспектральным микроанализом (РСМА), масс-спектрометрией с индуктивно-связанной плазмой и лазерной абляцией (ЛА ИСП-МС), и дифракцией обратнорассеянных электронов (EBSD). РСМА проводился в Лаборатории анализа минерального вещества ИГЕМ РАН на микроанализаторе JXA–8200 (JEOL), оснащенном пятью волновыми спектрометрами, при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 300 нА, диаметре пучка 3 мкм. Время экспозиции для As (Lα, TAP) и Fe (Kβ, LIF) составляло (пик/фон) — 100/50 сек, для S (Kα второго порядка, TAP) — 50/25 сек, для Au (Mα, PETH) — 200/100 сек. Для снижения предела обнаружения Au до 0.0045 масс. % (3σ) была разработана специальная прецизионная методика, описанная в [3].

Были исследованы две группы кристаллов пирита из образца скарнированной породы, состоящей из темной (окварцованной) и зеленой (эпидотизированной) части (рис. 1). Первая группа кристаллов пирита из окварцованной темноцветной части породы. Кристаллы пирита в большинстве случаев «изъеденные», с большим количеством включений нерудной массы, в режиме BSE отчетливо наблюдается пятнистая и осцилляторная зональность. Содержания As достигают 4 масс. %, а содержание Au до 0.079 масс. %. Между содержаниями As и Au отмечается сильная положительная корреляция (r=0.8; n=76). Вторая группа кристаллов пирита из эпидотизированной части (с карбонатом) с более крупной вкрапленностью и гнездообразными скоплениями пирита. Кристаллы пирита часто с извилистыми краями, иногда имеют «ажурное» строение и содержат включения нерудной массы. Содержания As до 3.6 масс. %, а содержание Au до 0.056 масс. %. Между

содержаниями As и Au отмечается умеренная положительная корреляция (r=0.5; n=58) (рис. 2).

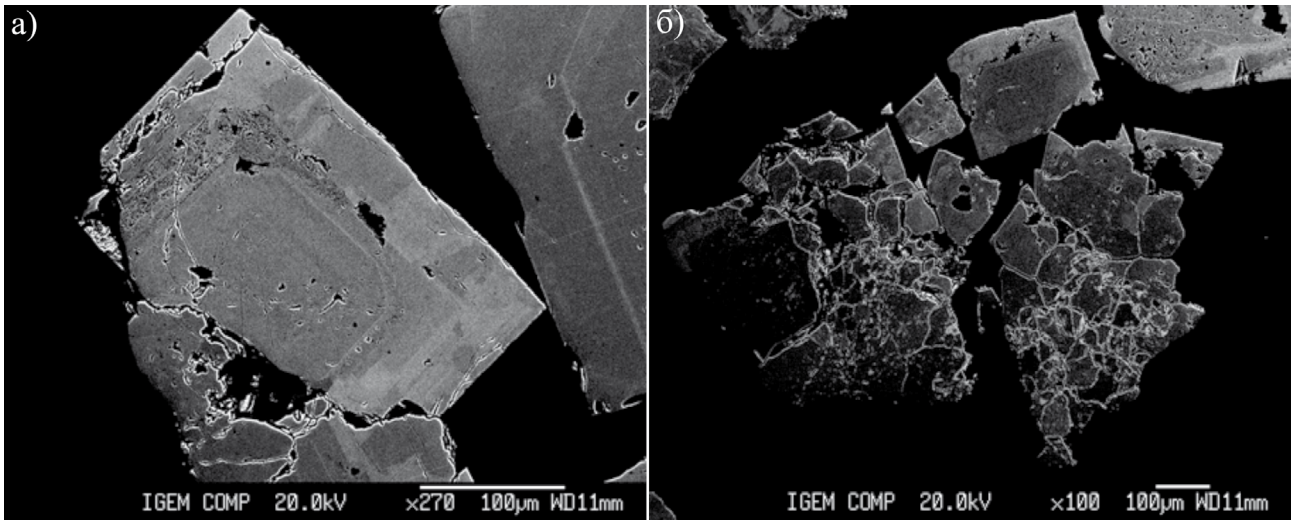


Рисунок 1. Пирит Воронцовского месторождения из а) темной (окварцованной) и б) зеленой (эпидотизированной) части скарнированной породы. Изображение в режиме BSE.

Figure1. Pyrite of the Vorontsovka deposit from a) dark (silicified) and b) green (epidotized) part of skarnified rock. Image in BSE.

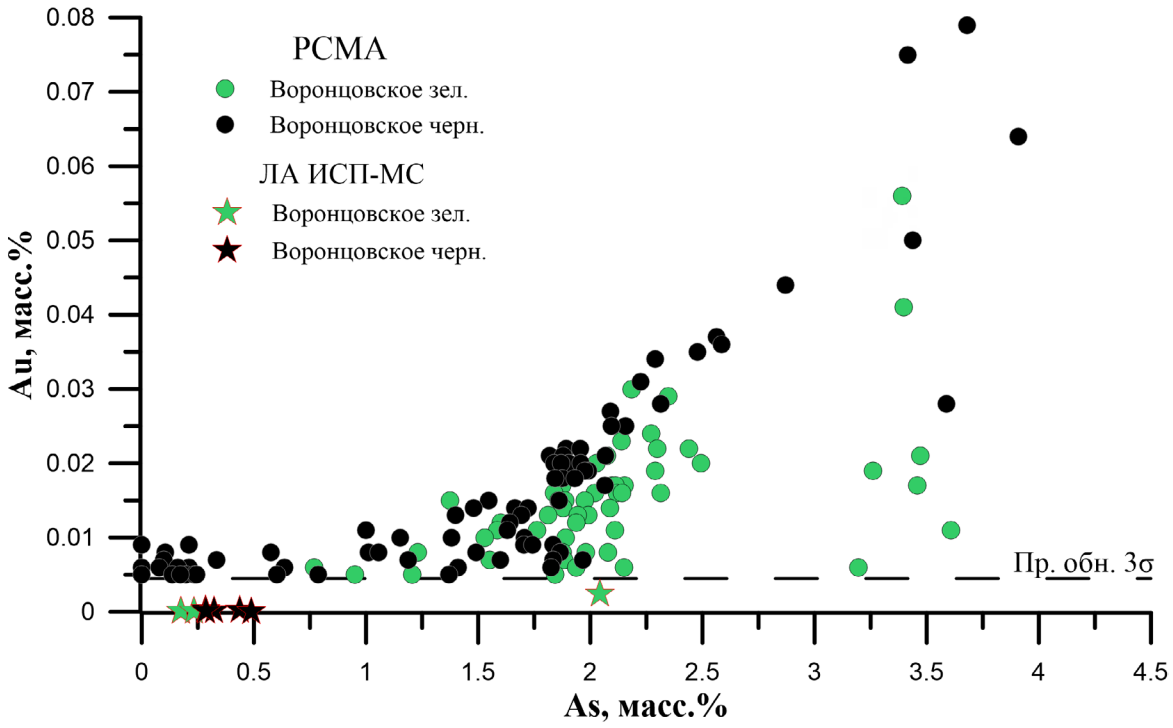


Рисунок 2. Зависимость содержания Au и As в пирите Воронцовского месторождения из темной (окварцованной) части образца — черные кружки по данным РСМА, черные звезды — по данным ЛА ИСП-МС; из зеленой (эпидотизированной) части — кружки зеленого цвета по данным РСМА, звезды зеленого цвета — по данным ЛА ИСП-МС.

Figure 2. Variations of Au vs. As in pyrite from the Vorontsovka deposit from the dark (silicified) part of the sample — black pointswere used for EPMA, black stars — were used for LA ICP-MS; from the green (epidotized) part — green points were used for EPMA, green stars — were used for LA ICP-MS.

В рамках наших исследований также был проведен гидротермальный синтез золотосодержащих сульфидов в богатых NaCl флюидах при температурах 350 и 490 °C, при разных содержаниях As в исходной смеси с троилитом. В результате синтеза были получены секториально – зональные кристаллы пирита. Данные по химическому составу кристаллов пирита, полученные методом РСМА, подтверждают строгую положительную корреляцию между As и Au. Анализ этих данных с точки зрения форм нахождения позволил сделать вывод о том, что Au в пирите может содержаться в виде лёллингитоподобных кластеров [3]. Данные по EBSD картированию позволили нам связать зоны с различным содержанием Au и As с гранями пирита: меньше всего примесей на гранях форм {100} и {110}, больше для граней форм {113} и {111}, больше всего примесей на гранях {210}.

Такая же зависимость между гранями пирита и содержаниями As и Au была выявлена и на природном пирите Воронцовского месторождения.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства науки и высшего образования РФ (№13.1902.24.44)

ЛИТЕРАТУРА

1. **Genkin A.D., Bortnikov N.S., Safonov Y.G., Kerzin A.L., Cabri L.J., Mcmahon G., Wagner F.E., Friedl J., Stanley C.J., Gamyanin G.N.** A multidisciplinary study of invisible gold in arsenopyrite from four mesothermal gold deposits in Siberia, Russian Federation // Economic Geology. 1998. V. 93. P. 463–487.

2. **Holley E.A., Jilly-Rehak C., Sack P., Phillips D.L., Gopon P.** Nanoscale characteristics of Carlin-type auriferous pyrite from the Nadaleen trend, Yukon // Economic Geology. 2024. V. 119. N 7. P. 1643–1666

3. **Kovalchuk E.V., Tagirov B.R., Borisovsky S.E., Nickolsky M.S., Tyukova E.E., Sidorova N.V., Komarov V.B., Mezhueva A.A., Prokofiev V.Y., Vikentyev I.V.** Gold and Arsenic in Pyrite and Marcasite: Hydrothermal Experiment and Implications to Natural Ore – Stage Sulfides // Minerals. 2024. N 14. P. 170.

ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНО-СИХОТЭ-АЛИНСКОЙ МИНЕРАГЕНИЧЕСКОЙ ЗОНЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКОВ ВОЛЬФРАМОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

М.И. Копылов[1], Д.Г. Федосеев[2]

[1]Институт тектоники и геофизики Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск, e-mail: michil.kopa@gmail.com

[2]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток

Аннотация. В данной работе рассматриваются особенности глубинного и тектонического строения Центральной Сихотэ-Алинской минерагенической зоны, показаны закономерности размещения и перспективы поисков месторождений вольфрама.

GEOLOGICAL FEATURES OF THE CENTRAL SIKHOTE-ALIN METALLOGENIC ZONE AND TUNGSTEN EXPLORATION PROSPECTS

M.I. Kopylov[1], D.G. Fedoseev[2]

[1]Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk, e-mail: michil.kopa@gmail.com

[2]Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok

Abstract. This study examines the deep structure and tectonic features of the Centrai Sikhote-Alin metallogenic zone, assessing exploration potential and prospects exploring for tungsten deposits.

Общий геолого-структурный план рассматриваемой территории определяется ее положением в складчатой системе Сихотэ-Алиня, длительный цикл развития которой завершился в мезозое и сопровождался интенсивным проявлением разрывной тектоники и неоднократно возобновлявшейся интрузивной деятельностью. В позднемеловую эпоху в орогенную стадию развития складчатой системы были сформированы вулкано-тектонические постройки и внедрились многочисленные интрузии гранитоидов. Изверженные породы занимают около 30% изученной территории и представлены крупными гранитоидными массивами Васильевским, Шивкинским, Горбунским, Бикинским, а также мелкими и средними по размерам интрузивными телами

вулканических покровов разнообразных форм. По составу и морфологии тел выделяется комплекс различных по возрасту даек, жил и экструзивных образований.

Разрывы северо-западного и субмеридионального направлений – группа наиболее распространенных тектонических нарушений. Это преимущественно левосторонние сдвиги, сбросо-сдвиги и взбросо-сдвиги. Для коллизионного периода характерно развитие глубинных разломов (шовных зон), по которым происходило движение магм вверх по подводящим каналам, среди них выделяются Алчанский, Центрально-Сихотэ-Алинский, Фушунь-Мишаньский, Западно-Сихотэ-Алинский, Восточно-Сихотэ-Алинский, Уссурийский, и многочисленные менее значительные по величине второстепенные разрывы более высокого порядка.

Мощность земной коры варьирует от 32 до 40 км, глубина залегания кристаллического фундамента, по гравиметрическим данным, оценивается здесь величиной около 20 км (рис.1).

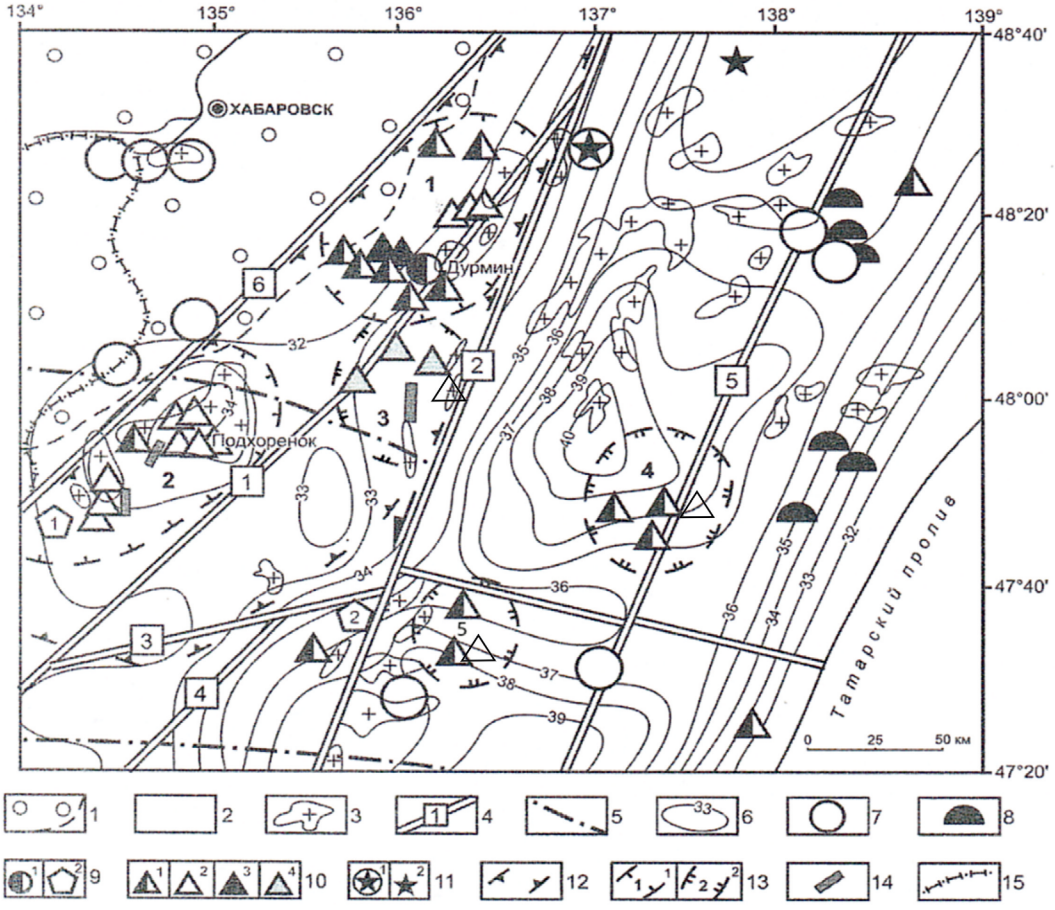


Рисунок1. Глубинное строение и размещение вольфрамовых, золотых месторождений на юге Сихотэ-Алинской аккреционно-складчатой области.

1-отложения Средне-Амурской впадины и её граница; 2-осадочные и вулканические образования; 3-интрузивные образования; 4-разломы: 1-Алчанский, 2-Центрально-Сихотэ-Алинский, 3-Фушунь-Мишаньский, 4-Западно-Сихотэ-Алинский, 5-Восточно-Сихотэ-Алинский, 6-Уссурийский; 5-прочие разломы; 6-изолинии мощности земной коры в км; 7-очаги землетрясений; 8-палеосейсмодислокации; 9-месторождения: золота, 1-Дурминское, месторождения вольфрама, 2-Лермонтовское и Восток-2; 10-рудопроявления: золото-серебряные (1), вольфрама (2), золото-медные (3), смешанных формаций

(4); 11-проявление алмазов в коренном залегании (1) и в рыхлых отложениях (2); 12-граница Западно-Сихотэ-Алинской минерагенической зоны; 13-границы золото-россыпных районов (1) 1-Дурминский, и вольфрамовых 2-Нижнебикинский и прогнозируемых золото-вольфрамовых узлов (2) 3-Катэнский, 4-Звездный, 5-Верхнебикинский; 14-отработанные россыпи золота; 15-государственная граница РФ.

Figure1. Deep structure and minerageny of tungsten and gold deposits in the south of the Sikhote-Alin accretionary-fold area.

1-deposits of the Middle Amur Depression and its boundary; 2-sedimentary and volcanic formations; 3-intrusive formations; 4-faults: 1-Alchansky, 2-Central Sikhote-Alin, 3-Fushun-Mishansky, 4-West Sikhote-Alin, 5-East Sikhote-Alin, 6-Ussuri; 5-other faults; 6-isolines of the earth's crustal thickness in km; 7-earthquake foci; 8-paleoseismic dislocations; 9-deposits: gold, 1-Durminskoye, tungsten deposits, 2-Lermontovskoye and Vostok-2; 10-ore occurrences: gold-silver (1), tungsten (2), gold-copper (3), mixed formations (4); 11-diamond occurrence in bedrock (1) and in loose sediments (2); 12-boundary of the West Sikhote-Alin mineragenic zone; 13-boundaries of gold placer regions (1) 1-Durminsky, and tungsten 2-Nizhnebikinsky and predicted gold-tungsten nodes (2) 3-Katensky, 4-Zvezdny, 5-Verkhnebikinsky; 14-worked out gold placers; 15-state border of the Russian Federation.

Магнитное, а также естественное электрическое поле, фиксированные на площади, являются неоднородными и отражают сложное блоковое строение этой территории. В период формирования структуры возникали землетрясения, об этом же свидетельствуют выявленные палеосейсмодислокации.

На изучаемой территории присутствует ряд рудопроявлений вольфрама, золота, олова, которые были выявлены в разное время в процессе геологосъемочных и геофизических работ 1:50000 и 1:10000 масштабов, изучены с разной степенью детальности.

Для определения формационной принадлежности и определения перспектив рудопроявлений вольфрама Арса, Кафен, Коломи, Звонкий и других объектов были использованы модели эталонных скарновых шеелит-сульфидных месторождений Лермонтовское, Восток-2, Аглыки, Кордонное, Скрытое. В обобщенном виде морфология рудных тел вольфраморудных месторождений скарнового типа контролиролируется поверхностями интрузивов гранитоидов, их контактами с карбонатными породами, складчатыми и разрывными нарушениями.

В западной части изучаемой территории располагается Долми-Бикинская рудная зона, несущая W, Sn, Au, Cu оруденение. В северной части зоны выделяется Немптинский рудный узел. Здесь вольфрамовое оруденение грейзенового, скарново-грейзенового типов и шеелит-кварцевой формации, как правило, приурочено к небольшим штокам высокоглиноземистых гранитов. В пределах узла известно пять проявлений вольфрама: Солонцовое, Коломи, Арса, Кафэн и Северное. По данным проведенного анализа с использованием моделей известных месторождений, наиболее перспективными являются рудопроявление Арса, Коломи и Кафэн, на которых следует выполнить комплекс оценочных геолого-геофизических работ. По данным проведенных исследований, в пределах рудопроявления Арса рудные тела имеют форму пласто-, карман- и линзообразных скарново-рудных залежей. Размеры скарново-рудных тел составляют по простиранию от 10 м до 500 – 800 м, мощность их варьирует от 10 до 100 м. В пределах рудопроявления Коломи выявлены зоны жильно-прожилкового окварцевания с содержанием вольфрама до 0.2%.

На проявлении Кафен среди мусковит-кварцевых и кварц-полевошпатовых метасоматитов по гранитам выявлено 32 рудных тела, представленных зонами прожилкового окварцевания, кварцевыми жилами, минерализованными зонами с вкрапленностью шеелита, касситерита, вольфрамита, пирита, халькопирита и арсенопирита. Мощности зон составляют 0.9–10.5 м, протяженность — 70–260 м, установленный вертикальный размах оруденения 170 м. Содержание трехокиси вольфрама варьирует от 0.02 до 2.15% при среднем содержании 0.29%. Скарны рудопроявления развиваются по породам вулканогенно-кремнисто-карбонатно-терригенной формации. Для сравнения, на месторождениях Лермонтовском и Восток-2, кремнисто-карбонатные породы наблюдаются в виде олистолитов (от нескольких сантиметров до сотен метров) пермского возраста, а на месторождении Агылки пласт известняков (3–5 м) залегает согласно с вмещающими его терригенными породами триаса.

В юго-западной части минерагенической зоны выделен Нижнебикинский рудный район с проявлением W, Au, Sn, Mo, который? в отличие от Долми-Бикинской зоны, характеризуется широким развитием относительно крупных массивов раннемеловых высокоглиноземистых гранитов. Эти массивы контролируют размещение рудных узлов — Подхоренковского, Химинского, Лермонтовского и Васильевского.

В пределах Лермонтовского рудного узла выявлен ряд рудопроявлений, наиболее перспективной из них является зона Бархатная. Она расположена на левобережье кл. Среднего, в экзоконтактовой зоне Бирушинского гранитного массива, прорывающего юрско-раннемеловые терригенные отложения, и прослеживается на 700 м. Рудоносная структура контролируется аномалией проводимости, аномалиями МПП сульфидной природы и поверхностью кровли гранитоидов, глубины которой ундулируют от 100 до 400 м. Она характеризуется наличием карбонатных горизонтов и развитием зон скарнирования, которые сопровождаются ореолами рассеяния шеелита с содержанием до 1 г/м^3.

Сукпай-Чукенская рудная зона (W, Sn, Mo, Cu) контролируется Сукпайским и Цафактайским массивами гранит-лейкогранитовой формации, в ее пределах известно проявление вольфрама шеелит-кварцевой формации Звонкое и комплексное проявление олова и вольфрама Няуха касситерит-вольфрамит-кварцевой формации. Наиболее перспективным из них представлялось проявление Звонкое. В надинтрузивной части с поверхности были выявлены зоны прожилкового окварцевания мощностью до 60 м и протяженностью до 1400 м с содержанием трехокиси вольфрама 0.22-6.84%, в единичных случаях — до 13.11%.

На проявлении Ко рудным телом является зона везувиан-пироксен-гранатовых скарнов, развивающихся по известнякам и вулканитам основного состава, которые слагают ксенолит в кровле гранитоидов гранит-

лейкогранитовой формации. Шеелитовая минерализация связана как с процессами скарнирования, так и с более поздней грейзенизацией. Рудное тело прослежено на 300 м. Среднее содержание трехокиси вольфрама в рудах 0.55-0.91%.

На проявлении Янизавани, в отличие от Ко, рудоносными являются зоны прожилкового окварцевания, кварцевые и кварц-сульфидные жилы с вкрапленностью вольфрамита, шеелита, касситерита, молибденита, халькопирита и сфалерита в грейзенизированных гранитах и гранодиоритах. Содержание вольфрама достигает 2%, олова — 0.3%, меди — 1–3%, мышьяка — 2–5%, серебра — 360 г/т.

Результаты анализа материалов позволяют положительно оценивать перспективы на исследуемой площади на выявление комплексных вольфрамовых, золоторудных и оловорудных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Барабанов А.В.** Минералогия и геохимия грейзеновых образований месторождения Восток - 2 (Приморье) // Минералогия и геохимия вольфрамовых месторождений. ЛГУ, 1975. С. 328-337.

2. **Гвоздев В.И.** Рудно-магматические системы скарновых шеелит сульфидных месторождений Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2010. 338 с.

3. **Гвоздев В.И., Федосеев Д.Г.** Скарны вольфрамового месторождения Кордонное (Приморский край) // Тихоокеанская геология. 2013. Т. 32. № 2. С. 100-111.

4. **Ханчук А.И.** Палеодинамический анализ формирования рудных месторождений Дальнего Востока // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С.10-35.

МИКРОМИНЕРАЛЫ КАК ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЙ СПЕЦИАЛИЗАЦИИ И РУДООБРАЗУЮЩЕГО ПОТЕНЦИАЛА ИЗВЕРЖЕННЫХ ПОРОД

В.О. Крутикова, Н.В. Бердников, П.К. Кепежинскас

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск, e-mail: Valeriya.Krutikova@yandex.ru

Аннотация. Микровключения минералов, самородных металлов и их сплавов в мафит-ультрамафитовом массиве Ильдеус представлены самородным золотом, серебром, сплавами систем Au-Ag, Cu-Ag-Au, Ag-Cu, а также сульфидами рудных элементов, оксидами, силикатами, карбонатами и фосфатами редкоземельных элементов. Образование ассоциаций микровключений происходило как в результате магматической дифференциации интрузии Ильдеус, так и в результате многостадийного взаимодействия магматических пород с позднемагматическими, постмагматическими и постколлизионными флюидами. Предполагается, что микровключения металлов и минералов являются предшественниками экономически значимой минерализации, и могут служить в качестве дополнительного признака при проведении поисковых геологоразведочных работ.

MICROMINERALS AS COMPLIMENTARY GUIDES INTO METALLOGENY AND ORE-FORMING POTENTIAL OF IGNEOUS ROCKS

V.O. Krutikova, N.V. Berdnikov, P.K. Kepezhinskas

Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk, e-mail: Valeriya.Krutikova@yandex.ru

Abstract. Microinclusions of minerals, native metals and their alloys in the Ildeus mafic-ultramafic massif are represented by native gold, silver, the Au-Ag, Cu-Ag-Au, Ag-Cu alloys, as well as sulfides of ore elements, oxides, silicates, carbonates and phosphates of rare earth elements. The formation of associations of microinclusions occurred both as a result of magmatic differentiation of the Ildeus intrusion and as a result of multi-stage interaction of magmatic rocks with late-magmatic, post-magmatic and post-collisional fluids.Microinclusions of metals and minerals are believed to be precursors to economically significant mineralization and may serve as an additional indicator during geologic exploration.

Ассоциации микровключений металлов и минералов несут ценную информацию об условиях образования и металлогеническом потенциале магматических пород. Для выяснения связи между микровключениями,

обнаруживаемыми при электронно-микроскопическом исследовании пород, и их рудной минерализацией изучены образцы магматических пород из триасового мафит-ультрамафитового массива Ильдеус (Становой супертеррейн), расположенного на южной окраине Сибирского кратона. Ультраосновные породы массива представлены плагиоклаз- и амфиболсодержащими перидотитами, оливиновыми вебстеритами, верлитами, основные – двупироксеновыми габбро и габбро-анортозитами. Акцессорные минералы включают шпинель, магнетит, ильменит, рутил, титанит, Cl-F-апатит, циркон [4].Выделены следующие основные группы микровключений: 1) сульфиды, 2) золото и сплавы на основе золота, 3) серебро и минералы серебра, 4) минералы, содержащие редкоземельные элементы (РЗЭ).

Микровключения сульфидов наиболее распространены в изученных породах. Преобладает магматический пирротин (рис. 1а), Ni-содержащий (0.7-7.3 мас. %) пирротин, обогащенный Co (1.7-21.0 мас. %) пентландит. В интерстициальном амфиболе зафиксированы микровключения халькозина и миллерита (рис. 1б). Магматический амфибол содержит микровключения сложного сульфида Pb-Ag-Cu (рис.1в). Часто встречаются микровключения халькопирита, галенита, акантита, сфалерита.

Ранее в Ильдеусском массиве было установлено наличие рассеянной никелевой, кобальтовой и медной минерализации, представленной в основном пирротином и пентландитом, что указывает на связь между сульфидными микровключениями и рудной минерализацией того же состава в пределах массива. Текстурные и минералогические данные говорят в пользу магматического происхождения сульфидной минерализации.

Микровключения золота в породах массива представлены самородным золотом в виде частиц размером 2-3 мкм в оливине (рис. 1г), ортопироксене и клинопироксене, двухкомпонентными сплавами Ag-Au, в которых содержание серебра варьирует в пределах от 26.1 мас. % до 30.2 мас. % и трехкомпонентными сплавами Cu-Ag-Au (рис. 1д). Также встречаются композитные микровключения, в составе которых наряду с золотом и серебром присутствуют халькофильные (Cu, Zn, Ag и др.) и сидерофильные (Ni, Co) металлы (рис. 1е).

Золотая микроминерализация, так же, как и сульфидная, имеет в основном первично-магматический генезис, в пользу которого свидетельствуют находки микрозерен золота с примесью никеля и микровключений с составом, близким к Cu:Ag:Au 30:10:60 [1]. Валовое содержание золота в породах массива изменяется от 0.05 до 0.5 г/т, в отдельных пробах достигая 596 г/т [1]. Такое локальное обогащение золотом, вероятно, связано с деятельностью флюидов на позднемагматическом или метасоматическом этапе эволюции массива.

Микровключения серебра встречаются в виде самородного металла, сплавов, а также хлоридов и сульфидов. Частица самородного серебра

зафиксирована на границе между зернами серпентина и полевого шпата (рис. 1ж). Из сплавов распространены золото-серебряные, медно-серебряные (рис. 5в), содержание меди в которых варьирует от 1 до 8 мас. % и медисто-цинкистое серебро (Zn 5.3-7.1 мас. %) (рис. 1з). Минералы серебра представлены хлораргиритом, включенным в оливин (рис. 1и), ортопироксен, амфибол, хлорит. Наличие микровключений хлоридов серебра может указывать на позднемагматическую или на более позднюю метасоматическую природу серебросодержащих минеральных ассоциаций, возможно, связанную с раннемеловыми постколлизионными тектоническими процессами в Становом супертеррейне. В породах также обычны микровключения акантита с незначительным содержанием меди (до 3.8 мас. %). Валовое содержание серебра в породах массива изменяется от 0.03 до 3.4 г/т, в отдельных пробах достигает 162 г/т [2]. Обилие серебросодержащих микровключений, наряду с высокими валовыми содержаниями этого металла, предполагает вероятное наличие здесь бедной серебряной минерализации.

Среди минералов, содержащих РЗЭ, наиболее распространены монацит и ксенотим. Монацит наблюдается в виде отдельных микрозерен в серпентине (рис. 1к) и альбите, а также образует монацит-ортопироксеновые агрегаты в ассоциации с апатитом. Ксенотим ассоциирует с титанитом и плагиоклазом (рис. 1л). Микровключения оксидов, содержащих РЗЭ, встречаются в оливине (рис.1м) и хлорите. Бедная РЗЭ минерализация в некоторых породах Ильдеуса (сумма РЗЭ до 1938 г/т) образовалась на позднем метасоматическом этапе при участии богатых металлами постколлизионных флюидов [3].

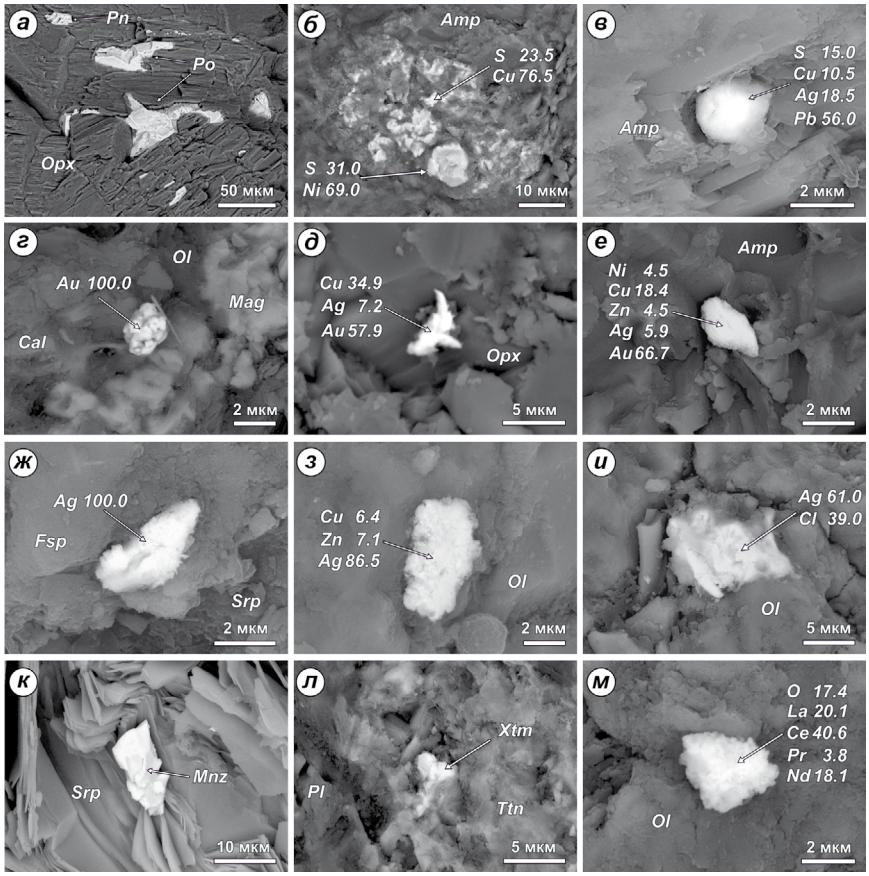


Рисунок 1. Микровключения металлов, сплавов и минералов в породах массива Ильдеус.

а – пирротин и пентандит в ортопироксене, б – халькозин с миллеритом в амфиболе, в –сульфид свинца, серебра и меди в амфиболе, г – самородное золото в ассоциации с кальцитом и магнетитом в оливине, д - сплав золота с серебром и медью в ортопироксене, е – сложный сплав золота с никелем, медью, цинком и серебром в амфиболе, ж – самородное серебро в полевом шпате и серпентине; з – медисто-цинкистое серебро в оливине, и – хлорид серебра (хлораргирит) в оливине, к – монацит в серпентине, л – ксенотим с титанитом в плагиоклазе, м – оксид редкоземельных элементов в оливине.

Amp – амфибол, Cal – кальцит, Fsp – полевой шпат, Mag – магнетит, Mnz – монацит, Ol – оливин, Opx – ортопироксен, Pl – плагиоклаз, Pn – пентландит, Po – пирротин, Srp – серпентин, Ttn – титанит, Xtm – ксенотим.

Figure 1. Microinclusions of metals, alloys and minerals in rocks of the Ildeus massif.
a – pyrrhotite and pentlandite in orthopyroxene, b - millerite with chalcocite in amphibole, c – lead-silver-copper sulfide in amphibole, d – native gold in association with calcite and magnetite in olivine, e – gold-silver-copper alloy in orthopyroxene, f –composite gold-nickel-copper-zinc-silver alloy in amphibole, g – native silver in feldspar and serpentine, h – copper-zinc silver in olivine, i – silver chloride (chlorargyrite) in olivine, j – monazite in serpentine, k – xenotime in association with titanite in plagioclase, l – REE oxide in olivine,
Amp – amphibole, Cal – calcite, Fsp – feldspar, Mag – magnetite, Mnz – monazite, Ol – olivine, Opx – orthopyroxene, Pl – plagioclase, Pn – pentlandite, Po – pyrrhotite, Srp – serpentine, Ttn – titanite, Xtm – xenotime.

Результаты исследования микровключений в породах Ильдеусского массива свидетельствуют о связи между ассоциациями микровключений определенного состава с рудной минерализацией, зафиксированной в породах массива. Микроминералогические исследования подтверждают наличие в нем сульфидной никель-кобальт-медной и золотой минерализаций. На основе результатов электронно-микроскопического исследования и данных геохимического анализа в породах массива предполагается возможность обнаружения бедных серебряной и редкоземельной минерализаций.

Работа выполнена в рамках гос. задания Института тектоники и геофизики ДВО РАН (тема НИР № 124042300007-3 – молодежная лаборатория) с использованием научного оборудования Хабаровского инновационно-аналитического центра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бердников Н.В., Кепежинскас П.К., Невструев В.Г., Крутикова В.О., Коновалова Н.С.** Магматическое самородное золото: состав, формы выделения, генезис и эволюция в земной коре // Геология и геофизика. 2024. Т. 65. № 3. С. 427-445.

2. **Кепежинскас П.К., Бердников Н.В., Крутикова В.О., Кепежинскас Н.П., Астапов И.А., Кириченко Е.А.** Серебряная минерализация в глубинных магматогенных системах древних островных дуг: Ильдеусский ультраосновной массив, Становой мобильный пояс (Дальний Восток России) // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 4. С. 30–60.

3. **Кепежинскас П.К., Ханчук А.И., Бердников Н.В., Крутикова В.О.** Минералы редкоземельных элементов в ультрабазитах массива Ильдеус (Становой кратонный супертеррейн): влияние постколлизионных процессов на глубинные рудно-магматические системы конвергентных границ плит // Тихоокеанская геология. 2024. Т. 43. № 6. С. 3 – 23.

4. **Kepezhinskas P.K., Kepezhinskas N.P., Berdnikov N.V., Krutikova V.O.** Native metals and intermetallic compounds in subduction-related ultramafic rocks from the Stanovoy mobile belt (Russian Far East): implications for redox heterogeneity in subduction zones // Ore Geology Reviews. 2020. V. 127. P. 103800.

ЗОЛОТОЕ ОРУДЕНЕНИЕ В ДАЙКАХ ПОПЕРЕЧНЫХ РЯДОВ КУЛАР-НЕРСКОГО ТЕРРЕЙНА (ЯНО-КОЛЫМСКИЙ ПОЯС): СТРУКТУРНО-ТЕКТОНИЧЕСКИЕ, МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ И ИЗОТОПНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

М.В. Кудрин[1], В.Ю. Фридовский[1], Л.И. Полуфунтикова[1], Г.С. Анисимова[1], Я.А. Тарасов[1,2,3]

[1]Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, e-mail: kudrinmv@mail.ru

[2]Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

[3]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

Аннотация. На примере Вьюнского рудного поля приводятся результаты структурно-тектонического, минералого-геохимического и изотопно-геохимического анализов орогенного золотого оруденения, приуроченного к дайкам Нитканского поперечного ряда Яно-Колымского пояса.

GOLD MINERALIZATION IN DIKES OF TRANSVERSE SERIES OF THE KULAR-NERA TERRANE (YANA-KOLYMA BELT): STRUCTURAL-TECTONIC, MINERALOGICAL-GEOCHEMICAL AND ISOTOPIC CHARACTERISTICS

M.V. Kudrin[1], V.Yu. Fridovsky[1], L.I. Polufuntikova[1], G.S. Anisimova[1], Ya.A. Tarasov[1,2,3]

[1]Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: kudrinmv@mail.ru

[2]N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan

[3]Novosibirsk State University, Novosibirsk

Abstract. Using the Vyun ore field as an example, the results of structural-tectonic, mineralogical-geochemical and isotope-geochemical analyses of orogenic gold mineralization confined to the dikes of the Nitkan transverse series of the Yana-Kolyma belt are presented.

На восточной окраине Сибирского кратона известны орогенные месторождения золота (ОМЗ) мирового уровня [4, 6]. В Яно-Колымском поясе (ЯКП) большинство крупных и средних ОМЗ (Наталка, Дегдекан, Павлик, Дражное, Бадран, Мало-Тарынское и др.) локализуются в терригенных толщах и контролируются региональными разломами северо-западного простирания. В поперечных к ним структурах СВ простирания локализованы мелкие месторождения золота, пространственно ассоциирующие с дайками (Имтачанское) и малыми гранитоидными интрузиями (Эргеляхское, Якутское и другие) [Тектоника…, 2001; Zaitcev et. al., 2019]. Одним из таких объектов в западном секторе ЯКП является Вьюнское рудное поле, приуроченное к параавтохтону Чаркы-Индигирского надвига. Здесь большинство золото-кварцевой жильной и прожилково-вкрапленной минерализации наложено на титонские (151–145 млн лет, циркон, U–Pb SHRIMP-II [4]) дайки Нитканского поперечного ряда СВ простирания, прорывающие триасовые и юрские терригенные толщи. Дайки трахибазальтов, андезитов, трахиандезитов, дацитов и гранодиоритов имеют мощность от 2.0 до 30.0 м, протяженность от 2.0 до 4.5 км. В сообщении, на основе опубликованных и новых данных, рассматривается структурный контроль, вещественный состав и изотопно-геохимические характеристики золото-сульфидно-кварцевой минерализации в дайках Вьюнского рудного поля.

К дайкам приурочены золотоносные кварцевые, карбонатно-кварцевые и хлорит-карбонатно-кварцевые жилы и штокверки. Рудная минерализация образовалась в конце компрессии в том же, что и дайки, взбросо-надвиговом поле напряжений деформационного этапа D1 [2, 3, 4]. Дайки представляли собой области гетерогенного напряжения, благоприятного для концентрации рудных флюидов и структурного контроля минерализации. Формирование орогенного золотого оруденения в конце прогрессивных взбросо-надвиговых деформаций установлены и на других месторождениях центральной части ЯКП (Базовское, Мало-Тарынское, Хангалас, Бадран, Левобережное, Сана) [4]. Образование золотой минерализации синхронно с тектоническим событием, которое, вероятно, отражает завершающую стадию коллизии Колымо-Омолонского супертеррейна и Сибирского кратона в валанжине во время утолщения земной коры.

Основными минералами жил являются кварц и карбонат. Среди сульфидов и сульфосолей встречаются арсенопирит, пирит, галенит, сфалерит, халькопирит, тетраэдрит, аргентотетраэдрит, бурнонит и антимонит. Самородное золото высокой/средней пробности (800–900‰), содержание Au в руде достигает нескольких сотен граммов на тонну. Минералообразование происходило в течение четырех рудных (пирит-арсенопиритовая метасоматическая, пирит-арсенопирит-кварцевая, халькопирит-сфалерит-галенитовая и блеклорудно-кварцевая) и двух пострудных (антимонит-карбонат-кварцевая и гипергенная) стадий [1, 5].

В серицит-хлорит-кварцевых метасоматитах по дайкам и терригенным породам проявлена вкрапленная минерализация с золотоносными пиритом и арсенопиритом. Мощность зон прожилково-вкрапленной минерализации может достигать первых десятков метров. Количество сульфидов в них обычно не превышает 1–3%, на локальных участках оно увеличивается до 10%. Содержание Au в пирите из метасоматитов по дайкам составляет от 0.3 до 53.9 г/т, по песчаникам и алевролитам от 0.3 до 159. 5 г/т, в арсенопирите из терригенных пород – от 28.9 до 58.4 г/т [5].

Выделяется несколько генераций пирита и арсенопирита: диагенетический пирит-1, метаморфический пирит-2, метасоматический мышьяковистый пирит-3 и арсенопирит-1, и жильный пирит-4 и арсенопирит-2 [5]. Пирит-3 и арсенопирит-1 имеют нестехиометрический состав, главной примесью пирит-3 является As, присутствуют Co, Ni, Cu, Sb, и Pb. В арсенопирите-1 зафиксированы Co, Ni, Cu, Sb. Отношение Co/Ni в пирите-3 широко варьирует (0.1–28.0), но в большинстве анализов 10.0>Co/Ni>0.1, что типично для гидротермального пирита.

Значения δ^{34}Sb сульфидах Вьюнского рудного поля (пирит-3 из даек от -6.4 до +5.1‰, n=11, пирит-3 из песчаников от +2.1 до +5.6‰, n=6 и арсенопирит-1 – +4.4‰) не зависят от возраста вмещающих пород и не коррелируют с кривой сульфата морской воды. Эти величины могут указывать на участие в процессе рудообразования Вьюнского рудного поля нескольких источников. Предполагается, что вероятным триггером рудообразующих процессов был астеносферный апвеллинг вдоль транскоровых разломов[4]. Основной импульс Au-As минерализации коррелирует с замедлением конвергенции Колымо-Омолонского супертеррейна и восточной окраины Сибирского кратона.

Полученные результаты показывают высокий экономический потенциал минерализации в дайках поперечных рядов и способствуют разработке геолого-генетических моделей формирования орогенных месторождений золота, что важно при прогнозно-поисковых работах.

Работа выполнена по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект FUFG-2024-0006).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анисимова Г.С., Протопопов Р.И.** Геологическое строение и состав руд золото-кварцевого месторождения Вьюн, Восточная Якутия // Руды и металлы. 2009. №. 5. С. 59-69.

2. **Парфенов Л.М.** Террейны и история формирования мезозойских орогенных поясов Восточной Якутии // Тихоокеанская геология. 1995. Т. 14. № 6. С. 32-43.

3. **Фридовский В.Ю., Соловьев Е.Э., Полуфунтикова Л.И.** Динамика формирования и структуры юго-восточного сектора Адыча-Нерской металлогенической зоны // Отечественная геология. 2003. № 3. С. 16-21.

4. **Fridovsky V. Y., Kudrin M. V.** Tectonic Evolution and Structural Control of Dikes-Hosted Orogenic Gold Deposits in The Yana-Kolyma Collision Orogen, Eastern Siberia: Insights from Terranes of the Eastern Margins of the Siberian Craton // Geosciences. 2025. V. 15. P. 168.

5. **Fridovsky V.Y., Polufuntikova L.I., Kudrin M.V.** Origin of disseminated gold-sulfide mineralization from proximal alteration in orogenic gold deposits in the central sector of the Yana–Kolyma metallogenic belt, NE Russia // Minerals. 2023. V. 13. N 3. P. 394.

6. **Goryachev N.A., Pirajno F.** Gold deposits and gold metallogeny of Far East Russia // Ore Geology Reviews. 2014. V. 59. P. 123-151.

РЕДКОМЕТАЛЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ НАРЫМСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (ЮГО-ВОСТОЧНАЯ КАЛБА)

О.Н. Кузьмина[1], А.Д. Сенько[1], М.А. Мизерная[1], Т.А. Ойцева[1,2]

[1]Восточно-Казахстанский технический университет им. Д. Серикбаева, г. Усть-Каменогорск, e-mail: kik_kuzmins@mail.ru

[2]ТОО «Геос», г. Усть-Каменогорск

Аннотация. На сегодняшний день редкие металлы занимают ключевую позицию среди наиболее востребованных видов высокотехнологичного сырья в мировой экономике. Учитывая растущий спрос на них и их уникальные физико-химические свойства, перспективы развития данной отрасли выглядят весьма обнадеживающими. Во всем мире отмечается тенденция к доизучению ранее известных месторождений редких металлов, а также к переоценке рудопроявлений и точек минерализации, что подтверждает актуальность проводимых исследований. В рамках данной работы рассматривается Нарымский рудный район, расположенный на юго-восточной оконечности Калба-Нарымского редкометалльного пояса. Основной промышленный интерес в этом районе представляет грейзеново-кварцевожильный штокверковый тип олово-вольфрамового оруденения. Проведение более детальных геологических исследований в Нарымском районе может способствовать расширению минерально-сырьевой базы Республики Казахстан.

RARE METAL MINERALIZATION OF THE NARYM ORE DISTRICT (SOUTH-EASTERN KALBA)

O.N. Kuzmina[1], A.D. Sen'ko[1], M.A. Mizernaya[1], T.A. Oitseva[1,2]

[1]D. Serikbaev East Kazakhstan Technical University, Ust-Kamenogorsk, e-mail: kik_kuzmins@mail.ru

[2]Geos LLP, Ust-Kamenogorsk

Abstract. At present, rare metals are among the most in-demand high-tech raw materials in the global economy. Due to the increasing demand and unique properties of these metals, the prospects for their development appear highly favorable. There is a growing trend toward the further exploration of previously known rare-metal deposits, as well as the re-evaluation of ore occurrences and mineralization points, which highlights the relevance of ongoing research. This study focuses on the Narym ore district, located on the southeastern flank of the Kalba-Narym rare-metal belt. The main economic interest in the region is associated

with the greisen-quartz-vein stockwork type of tin-tungsten mineralization. Further detailed investigation of the Narym ore district may contribute to the expansion of the mineral resource base of the Republic of Kazakhstan.

Научно-техническая революция, которая после Второй мировой войны стремительно ворвалась в жизнь всех развитых стран мира, связана, прежде всего, с широким применением редких металлов. Использование их вызвало к жизни целые новые области современной промышленности, науки и техники. Все сверхмагнитные, сверхлегкие, сверхтвердые, сверхжаростойкие и высокопрочные конструкционные материалы в наши дни создаются на основе или с использованием редких элементов. Большинство ресурсо- и энергосберегающих технологиий не осуществимы без редких элементов. Даже в сельском хозяйстве применение очень небольших доз редкого металла неодима повышает урожайность продовольственных культур на 60 процентов. Сейчас насчитываются многие тысячи областей эффективного использования редких металлов, как в военной, так и в гражданских областях промышленности.

Главной редкометалльной структурой Восточного-Казахстана является Калба-Нарымский пояс [1, 3, 6]. Калба-Нарымская металлогеническая зона известна как крупная редкометалльная провинция, которая детально изучалась не одно столетие. При достаточно тщательном изучении известных объектов в Центральной Калбе, северо-запад и юго-восток этой структуры остается слабоизученным [1-6].

Наличие благоприятных предпосылок при сравнительно слабой изученности выдвигает Нарымский рудный район в ряд перспективных на редкие металлы (Sn, W, Ta, Nb, Li и др.). С 30-х годов здесь были известны многочисленные коренные и россыпные проявления олова и вольфрама, такие как, Ленинское, Чердояк, Чебунды, Касаткинское, Бурабайская группа, россыпи по р. Такыр и многие другие. Промышленная эксплуатация здесь велась только на месторождении Чердояк и была прекращена в 1958 г. ввиду нерентабельности (низких для того времени содержаний металлов). Запасы отработанных в прошлые годы месторождений по сумме олова и вольфрама не превышали 200-300 т. При этом на самом богатом из них — месторождении Чердояк — сумма запасов всех категорий составляла порядка 3 тыс. т. Месторождение Чердояк разведано буровыми скважинами и горными выработками. По данным разведки, запасы олова составили 1061 т, трехокиси вольфрама 1795 т, при среднем содержании в балансовых рудах Sn 0.11%, WO_3 0.19%, а в забалансовых Sn 0.05%, WO_3 0.13%. В настоящее время цены на металлы выросли, что повышает экономическую рентабельность данных объектов.

Наиболее перспективным в Нарымском рудном районе является месторождение Чердояк, которое сопоставляется с известными грейзеново-

кварцевожильными месторождениями Центрального Казахстана, Узбекистана, Дальнего Востока, Рудных гор и других регионов (Щерба и др., 1988; Гавриленко и др., 1992; Stemprok, 1993). Это месторождения Байназар, Степановское, Учкошком, Правоурмийское, Красно, Циновец, Альтенберг и другие. Общей закономерностью для них является наложенность редкометалльного оруденения на более древние породы за счет интрузий гранитного состава, сформировавшихся в несколько этапов. Характерна приуроченность месторождений к апикальным частям гранитных куполов, их дайкообразным апофизам и иным выступам гранитов. Отложения основной массы рудных минералов происходило в грейзеновый, кварц-топазовый и кварц-палевошпатовый этап. Большинство грейзеновых месторождений комплексные: касситерит-вольфрамитовые, касситерит-молибденитовые, шеелит-касситеритовые и т.д.

Месторождение Чердояк проиурочено к купольной части кунушского массива, представляющего собой овальный шток плагиогранитов и плагиогранит-порфиров 1-й и 2-й фаз кунушского интрузивного комплекса C_3-P_1 возраста. Шток вытянут в северо-западном направлении и имеет размеры 1.1 х 0.2 км. С юго-востока он срезается гранитоидами нарымского массива, сложенным гранитами и гранодиоритами 1-й фазы формирования каиндинского интрузивного комплекса P_3 возраста. Гранитоиды обоих комплексов прорывают песчано-алевролитовую толщу бурабайской свиты (C_1v). Вмещающие осадки (углисто-глинистые алевролиты, аркозовые и полимиктовые песчаники свиты) под воздействием гранитов Нарымского массива преобразованы в узловатые филлитовидные и слюдистые сланцы с кордиеритом, андалузитом, турмалином, альбитом, графитом и др.

Стадийность рудообразования. Процесс оруденения происходил в тектонически напряженной обстановке по механизму «сжатие-растяжение» при неоднократной смене сжимающих усилий направления СЗ-ЮВ, что привело к стадийности минерализации и оруденения. С учетом данных М. Ф. Стрелкина (1941) и Г.Н. Щербы (1957), намечается следующая стадийность рудоотложения. В первую стадию проявилась ранняя графитизация и слабая площадная грейзенизация плагиогранитов с новообразованием кварца, серицита, графита, турмалина, пирита и незначительного количества касситерита (привнос K, C, B, Sn). Во вторую стадию сформировались рудоносные околотрещинные грейзены кварц-слюдяного и кварц-полевошпат-флюорит-турмалинового состава с шеелитом и касситеритом (привнос B, F, K, W, Sn). В третью стадию образовалась основная масса рудных кварцевых жил нескольких генераций. Кроме кварца и турмалина, в них отмечаются графит, асбест, мусковит, альбит, арсенопирит, касситерит, шеелит и берилл (привнос As, Sn, W, Be). Наиболее поздними являются грейзены кварц-турмалинового состава (с шеелитом), развитые в западной части месторождения.

Благоприятная позиция плагиогранитов в экзоконтакте рудогенерирующего источника также позволяет предполагать и прогнозировать новые рудоносные кварцевые штокверки, которые на глубине могут перейти в редкометалльные пегматиты. Поэтому месторождение рекомендуется для дальнейшего изучения с обоснованием возможности извлечения попутных компонентов (РЗЭ, Nb, Mo, In, Hg).

Месторождение Ленинское расположено в юго-западной приконтактовой части Нарымского массива, сложенного среднезернистыми биотит-роговообманковыми гранодиоритами калгутинского комплекса. Широко распространены жильные аплиты, аплит-пегматиты. Открыто по чудским выработкам. С поверхности отработано на площади 15 га. Рудные тела представлены кварцевыми жилами с подчиненным количеством пегматитовых. Рудные жилы грейзенизированы. В составе кварцевых жил отмечаются микроклин, альбит, мусковит, турмалин, гранат, берилл, сульфиды до 5-7%. Главный рудный минерал — касситерит. Содержание олова колеблется от 0.02 до 3%, достигая 15-20%. Концентрация олова во вмещающих гранитоидах в 18 раз превышает кларк. Касситерит образует кристаллы 0.2-0.5 см, иногда достигая веса 1 кг. Месторождение эксплуатировалось с 1918 по 1956 гг. Добыча не превышала 15-20 т оловянного концентрата в год. В настоящий момент месторождение законсервировано, хотя имеются предпосылки для поисков редкометалльного оруденения в апикальной части предполагаемого интрузивного штока.

Россыпные месторождения редких металлов Нарымского рудного района распространены в основном вблизи коренных редкометалльных объектов на площадях развития гранитоидных массивов. Выделяются три минеральных типа россыпей: вольфрамовые, олово-вольфрамовые и монацит-ксенотимовые (редкоземельные). Из вольфрамовых (шеелитовых) россыпей известны Палатцинская и Большевикская. Олово-вольфрамовые россыпи имеют наибольшее распространение и связаны с кварцево-жильными и грейзеновыми коренными объектами. Россыпи Саясу выделены на площади Нарымского массива, Чердоякская — на Чердоякском массиве.

Статья выполнена при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP 23486908).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Владимиров А.Г., Крук Н.Н., Хромых С.В., Полянский О.П., Червов В.В., Владимиров В.Г. и др.** Пермский магматизм и деформации литосферы Алтая как следствие термических процессов в земной коре и мантии // Геология и геофизика. 2008. Т. 49. № 7. С. 621-636.

2. **Дьячков Б.А., Бисатова А.Е., Мизерная М.А., Зимановская Н.А., Ойцева Т.А., Амралинова Б.Б., Айтбаева С.С., Кузьмина О.Н., Оразбекова Г.Б.** Особенности геотектонического развития и рудоносности Южного Алтая (Восточный Казахстан) //

Геология рудных месторождений. 2021. Т. 63. № 5. С. 399–426.

3. **Дьячков Б. А., Ойцева Т. А.** Редкометалльное оруденение Калбы // Монография. ISBN 978-601-08-0961-1. Усть-Каменогорск: ВКТУ, 2021. 208 с.

4. **Дьячков Б.А., Ойцева Т.А., Зимановская Н.А., Кузьмина О.Н., Майоров В.Н., Мизерная М.А., Садвакасова Г.Е., Оразбекова Г.Б.** Геотектоническая позиция и металлогения Южного Алтая // Геология и охрана недр. 2016. Т. 58. № 1. С. 37-48.

5. **Щерба Г.Н.** Геология Нарымского массива гранитоидов на Южном Алтае. Алма-Ата: Изд-во АН КазССР, 1957. 216 с.

6. **Щерба Г.Н., Беспаев Х.А., Дьячков Б.А., Мысник А.М., Ганженко Г.Д., Сапаргалиев Е.М.** Большой Алтай (геология и металлогения). Кн. 2. Металлогения. Алматы: РИО ВАК РК, 2000. 400 с.

БЛАГОДАТНЕНСКИЙ И ВАНГИНСКИЙ ЗОЛОТОРУДНЫЕ УЗЛЫ, ПРИМЕР ВЛИЯНИЯ СКЛАДЧАТОСТИ НА КОНТРОЛЬ ОРУДЕНЕНИЯ В ПРИМОРЬЕ

П.Л. Неволин, А.Н. Митрохин, В.В. Иванов

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: nevpeter@yandex.ru

Аннотация. Анализ строения Благодатненского и Вангинского золоторудных узлов, проявленных в виде полос СВ направления, в сравнении с Лермонтовским, Находкиинским Дальнегорским, Первомайским, Сухим и другими полосовидными узлами, показывает весомую роль складчатости в контроле магматизма и оруденения. Закартированные полосы, насыщенные рудопроявлениями, можно представить как складчатые системы: протяженные антиформные «тоннели с сердцевиной, концентрирующей полезные компоненты». Эта «золотая» осевая часть антиформных полос знаменуется наиболее знаковыми рудопроявлениями в местах пересечения с ССВ-СЮ сдвиговыми зонами.

BLAGODATNENSKY AND WANGINSKY GOLD ORE NODES, AN EXAMPLE OF THE INFLUENCE OF FOLDING ON THE CONTROL OF MINING IN PRIMORYE

P.L. Nevolin, A.N. Mitrokhin, B.V. Ivanov

The Far Eastern Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: nevpeter@yandex.ru

Annotation. An analysis of the structure of the Blagodatnensky and Wanginsky gold ore nodes, manifested in the form of SV bands, in comparison with the Lermontovsky, Nakhodkainsky, Dalnegorsky, Pervomaisky, Sukhoi and other band-shaped nodes, shows a significant role of folding in the control of magmatism and mineralization. Mapped bands saturated with ore occurrences can be represented as folded systems: long antiform "tunnels with a core concentrating useful components." This "golden" axial part of the antiform bands is marked by the most significant ore occurrences at the intersections with the CER shear zones.

Сдвигово-раздвиговый и сколово-складчато-надвиговый парагенезы инициированы левосдвиговым региональным трендом и сжатием σ_1 (340-350º), проявленными вследствие ротационного режима, ускорения-замедления земного вращения. Первый из них сложен косыми к σ_1, главному сжатию, левыми и сопряженными правыми сдвигами, аксоноклиналями, зонами растяжения, при крутом положении средней

оси деформации σ_2. В первом парагенезе фиксируются также нормальные к сжатию «над-межразломные» взбросы-надвиги и пологие складки. Второй парагенез состоит из нормальных к главному сжатию σ_1 (340-350º) взбросо-надвигов, складок с пологими шарнирами, причём, при пологой средней оси деформации σ_2. На наш взгляд, роль складчатого парагенеза в гносеологическом и прогнозном аспектах недоучитывается. И действительно, в мелком и крупном масштабах в Приморье закартировано соответствие складчатых структур оформлению рудно-магматического вещества, рисунку гравитационных, магнитных и геохимических аномалий. На карте полезных ископаемых Приморья [1] выделяются рудные узлы концентрации Au и W, имеющие форму полос СВ направления, отстоящие друг от друга на шаг 50-70 км. Внутри лент картируются СВ направления цепочки интрузивов и рудопроявлений. Оба парагенеза определили неоднородность коры и повлияли на контроль эндогенного вещества. Однако их роль в этом аспекте неодинаковая. Видимо, ключевая особенность в том, что магмо-рудоконтролирующие ленты в разрезе имеют антиформное строение. Ленты, по сути, являются складчатыми формами. На рисунке 1 отражены модель строения антиформной ленты в разрезе и механизм формирования «рудно-магмоёмкого»» свода в лентах Благодатненского [3, 4] и Вангинского [2] узлов. Для наглядности в модели применены закономерности мелкой натурной складки.

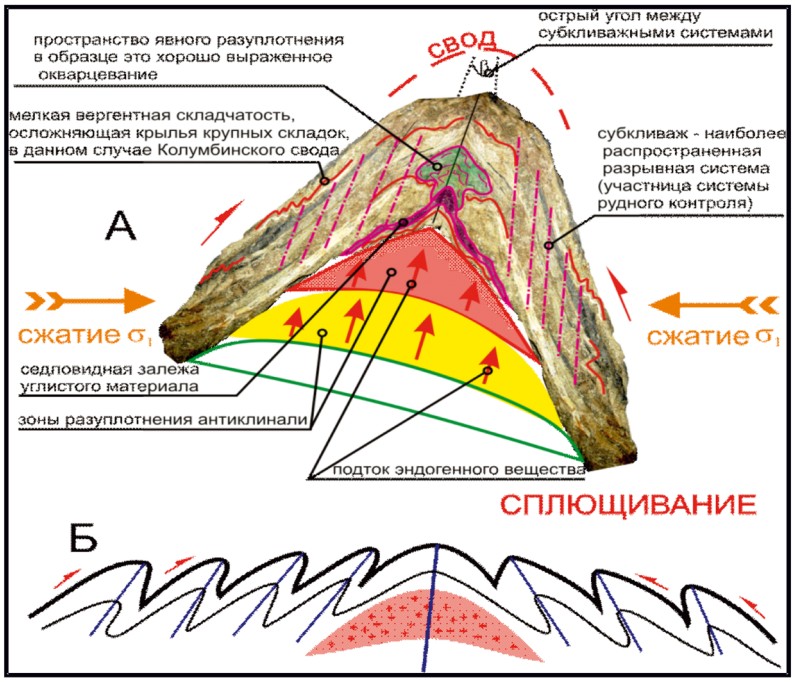


Рисунок 1. Динамика разуплотнения в своде антиформы и контроль рудно-магматических флюидов. А – выполнение флюидами элементов свода; Б – динамика смятия и формирование свода. Модель составлена на примере образца мелкой складки.

Figure 1. Dynamics of decompression and consolidated control of ore-magmatic fluids. A – antiform arch formation and fluid control; B – crumple dynamics and arch formation. It is based on the example of a small fold sample.

Рисунок 1А показывает динамику смятия-сплющивания и формирование сводовой части атиформы. Встречная вергентность мелких складок обозначает движение (острые стрелки), направленное к пику свода под действием сминающего сжатия σ_1. Прогрессирующее сжатие пролонгирует встречное движение надвиговой кинематики на крыльях свода, сводовое воздымание и рост степени разуплотнения. Область декомпрессии обозначена объёмом массы скрытокристаллического кварца. Вероятно, таким же образом (как кварц) в область антиформного разряжения устремляется вся масса восходящего мобильного рудно-магматического вещества. Анализ названных выше рудных узлов позволяет предположить, что поступление глубинного вещества в своды происходило благодаря масштабному разуплотнению (всасыванию). Не случайно мы не видим нигде активных магматических контактов. Именно поэтому четкость контактов следует рассматривать как эффект диапиризма. Диапиризм рассматриваем как следствие соскладчатого сдавливания консолидирующейся массы породы, метасоматически гранитизированной, постепенно принимающей интрузивную жесткость. Так происходит четкое очерчивание фрагментаций эндогенных продуктов и стирание признаков замещения. Такой диапиризм, видимо, сродни самым начальным фазам метаморфизма. Об отсутствии структурообразующей активности магмы свидетельствуют теневые структуры при гранитизации флишоидов (точно, по Е.П. Сапрыкину [5, 6]), многочисленно сохраняющиеся в общей интрузивной массе. Это явление многократно наблюдалось в скальных выходах меловых гранитоидов успенского и лазовского комплексов. Еще один важный зафиксированный индикатор складкообразования — кливаж осевой поверхности (рис. 1). В приводимой складчатой модели эндогенного концентрирования весьма важна экранирующая роль соскладчатых надвигов, подвижность которых закрывает трещинные и поровые каналы для восходящих движений магматического и рудного вещества, концентрирующегося в декомпрессионной антиформной структуре. По существу антиформные полосы Благодатненского, Вангинского, Лермонтовского, Дальнегорского, Находкинского, Первомайского, Сухого и др. рудных узлов, образно говоря, являются некими тоннелями в «вакуум» разуплотнений, где «всасывалось» и удерживалось надвигами-рефлекторами мобильное рудное вещество. Структуры Благодатненского и Вангинского золоторудных узлов отражают главный ключ регионального и локального складчатого контроля. Рудные тела и их морфология закономерно вписываются в общую иерархию тектонических форм сооружения (вплоть до 8-го порядка), обусловленного процессами сжатия и коробления.

Анализ строения полосовидных Благодатненского и Вангинского золото-вольфрамовых узлов, в сопоставлении с Лермонтовским, Находкинским Дальнегорским, Первомайским, Сухим и др. узлами, показывает высокую степень магмо-рудоконтролирующего влияния складчатости. Закартированные

полосы складчатого контроля можно представить как протяженные на СВ антиформные «туннели с полезной сердцевиной». Эта апикальная часть антиформ знаменуется знаковыми рудопроявлениями в местах пересечения рудных полос с зонами сдвигового парагенеза. Это особенно хорошо фиксируется на примере Благодатнеского и Мельничного участков Благодатненского узла [4], а также участков Цыганкова и Смутного Вангинского узла [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Белянский Г.С., Рыбалко В.И,. Сясько А.А. и др.** Государственная геологическая карта Российской федерации. Масштаб1:1 000 000 (третье поколение). Лист L-(52) (Пограничный), 53 (оз.Ханка); K-(52) (Владивосток), (53) (Находка). Объяснительная записка. ФГУГП «Приморская ПСЭ». СПб: ВСЕГЕИ, 2011. 294 с.

2. **Неволин П.Л., Иванов В.В., Коваленко С.А., Митрохин А.Н.** Геодинамика формирование структуры Сергеевского блока кристаллических пород и контроль золотого оруденения (Южный Сихотэ-Алинь) // Рудные месторождения континентальных окраин. Владивосток: Дальнаука, 2000. С. 100-121.

3. **Неволин П.Л., Уткин В.П., Митрохин А.Н.** Гранитообразование в континентальной коре: динамика тектонического позиционирования и структурирования интрузивов (на примере Приморья) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2014. Вып. 23. № 1. С. 121-138.

4. **Неволин П.Л., Митрохин А.Н., Уткин В.П.** Сихотэ-Алинская складчатая система: общие особенности строения и некоторые аспекты контроля золотого оруденения (на примере Центрального Сихотэ-Алиня) (часть вторая) // Вестник КРАУНЦ Науки о Земле. 2018. Вып. 39. № 3. С. 74-89.

5. **Сапрыкин Е.П.** Метаморфогенно-гидротермальное рудообразование. М.: Наука, 1980. 171 с.

6. **Сапрыкин Е.П., Кокорин А.М., Бураго А.И., Хилик Б.А.** Сходство и различие условий формирования метасоматитов и жил выполнения // Вопросы металлогении и зональность месторождений Тихоокеанского руд. Пояса. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 232-241.

7. **Уткин В.П.** Что определяет развитие Азиатско-Тихоокеанской зоны перехода: геодинамика движений океанических плит или Азиатского континента? // Докл. АН. 2016. Т. 467. № 3. С. 314–319.

СТРУКТУРНЫЙ КОНТРОЛЬ КОРЕННОЙ БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНОЙ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ХЕРПУЧИ-ВАЮНСКОГО РУДНО-РОССЫПНОГО РАЙОНА (ХАБАРОВСКИЙ КРАЙ)

М.Э. Николайчук, С.А. Касаткин

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: nikolaichuck.max@yandex.ru

Аннотация. Структурно-геодинамическими исследованиями установлено, что складчатые и разрывные нарушения Херпучи-Ваюнского золотоносного рудно-россыпного района образуют структурный парагенезис, формировавшийся под действием локального субширотного сжатия, сгенерированного динамическим взаимодействием Лимурчанского и Вьюнского меридиональных разломов. Анализ элементов разрывной тектоники показывает, что благороднометалльная минерализация проявлена главным образом в разрывах растяжения субширотного направления. Эти разрывы представлены кулисообразными прожилками и организованы в эшелонированные структуры, которые контролируются сопряжённой системой северо-восточных правых и северо-западных левых сдвигов.

STRUCTURAL CONTROL OF THE NOBLE-METAL MINERALIZATION IN THE KHERPUCHI-VAYUN GOLD PLACER DISTRICT KHABAROVSK REGION)

M.E. Nikolaychuk, S.A. Kasatkin

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: nikolaichuck.max@yandex.ru

Abstract. A structural and geodynamic study revealed that folding and faulting within the Kherpuchi–Vayun gold placer district are in a structural paragenetic relationship formed under the local W–E-oriented stress caused by the dynamic interaction of the N–S-oriented Limurchan and Vyun faults. The analysis of fault tectonics at the prospective sites of bedrock noble metal mineralization showed that it is mainly found in the W–E-trending tension gashes. These S-shaped tension gashes are arranged in en echelon structures, which are controlled by the conjugate set of NE-trending dextral and NW-trending sinistral faults.

По результатам литогеохимических исследований в Херпучи-Ваюнском рудно-россыпном районе обнаружены перспективные участки коренной благороднометалльной минерализации — Орёл и Ильинский (рис. 1а). Проходка разведочных канав в пределах этих участков сопровождалась

детальной геологической документацией, массовыми замерами элементов складчатой и разрывной тектоники. Эти данные легли в основу структурных исследований, которые также включали анализ геологических карт, складчатости района, выявление полей напряжений и пространственной организации минерализованных прожилков.

Сведенные на диаграмму элементы залегания слоистости показали доминанту субмеридионального (340-20°) простирания складчатости с крутонаклонным (60-80°) падением крыльев (рис. 1б). Объединение главных максимумов складчатости в пояса с пологим (угол 5°) погружением осей, указывает на генетическую связь крыльев складок, динамические условия формирования которых соответствуют действию локального субширотного сжатия (рис. 1б). Детальный анализ геологических карт показал, что распространение крутонаклонных замеров слоистости субмеридионального простирания контролируется Лимурчанским разломом на западе и Вьюнским – на востоке. Принимая во внимание левосдвиговую природу этих граничных разломов, функционировавших под действием регионального СЗ сжатия [3], проявление локального субширотного сжатия, обусловившего формирование субмеридиональной складчатости, является результатом их динамического взаимодействия.

С целью выявления доминирующих ориентировок минерализованных прожилков произведена выборка из общего числа элементов разрывной тектоники. Обнаружено, что они имеют преимущественно субширотную ориентировку и, совпадая с направлением локального сжатия, являются структурами растяжения, благоприятными для внедрения гидротермальных растворов (рис. 1в, г). Однако, несмотря на доминанту субширотного простирания, они не образуют «сквозных» рудных зон данного направления. Это несоответствие находит своё объяснение при детальном рассмотрении морфологии минерализованных прожилков и установлении их структурного контроля. Данные первичной фотодокументации полотна канав показывают, что коренная минерализация зачастую представлена сериями кулисообразных кварцевых и кварц-сульфидных прожилков, которые имеют тенденцию к увеличению мощности при широтном простирании, и закономерно выклинивается с отклонением к СВ и СЗ направлениям (рис. 1д).

Совокупность этих морфологических признаков и пространственной организации кулисообразных минерализованных прожилков позволяет интерпретировать их как эшелонированные структуры растяжения [2], являющиеся следствием сдвиговой тектоники.

Таким образом, для Херпучи-Ваюнского рудно-россыпного района наиболее благоприятными условиями проницаемости гидротермальных растворов и локализации благороднометалльного оруденения являются эшелонированные кулисообразные разрывы, контролируемые сопряжённой системой СВ правых и СЗ левых сдвигов, развивавшихся под действием

локального субширотного сжатия, сгенерированного динамическим взаимодействием Лимурчанского и Вьюнского разломов (рис. 2а).

Динамо-кинематический анализ элементов складчатой и разрывной тектоники в пределах Херпучи-Ваюнской сдвиговой зоны показал, что эти структуры сформированы в тесной парагенетической связи под действием субширотного сжатия (рис. 2б).

Выявленные структурные условия формирования коренной благороднометалльной минерализации могут являться важными поисковыми критериями, которые необходимо учитывать в процессе организации поисково-оценочных работ в пределах Херпучи-Ваюнского рудно-россыпного района.

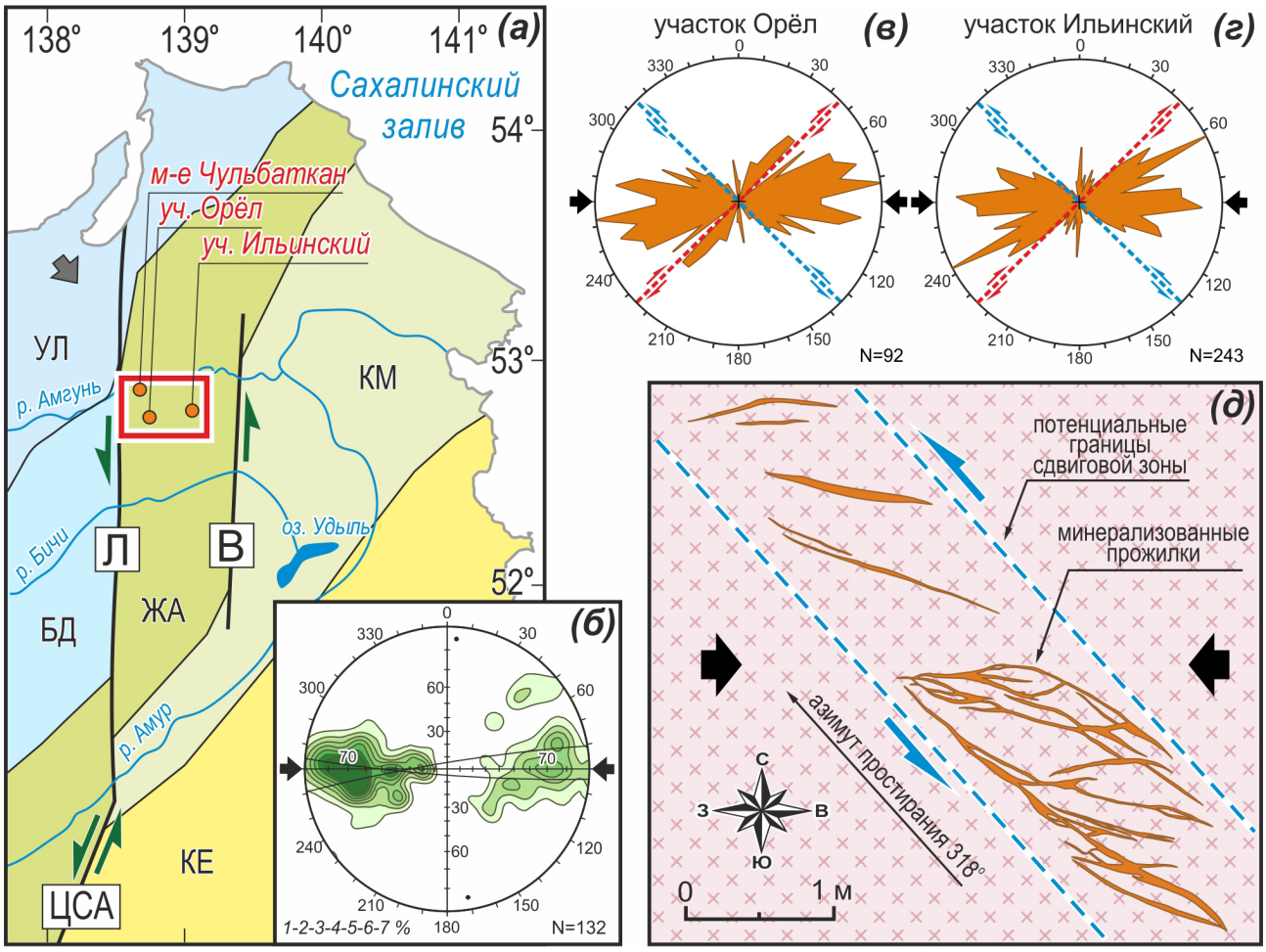


Рисунок 1. Схема террейнов северной части Сихотэ-Алинского орогенного пояса (а), (по [1]), суммарная диаграмма слоистости (б) Херпучи-Ваюнского района, розы-диаграммы простираний крутонаклонных (углы падения 60–90°) минерализованных прожилков на участках Орёл (в) и Ильинский (г), пример морфологии эшелонированных минерализованных прожилков, контролируемых сдвиговой зоной северо-западного простирания на участке Ильинский (д).

Террейны: юрской аккреционной призмы – Ульбанский (УЛ); Баджальский (БД), готерив-раннеальбской аккреционной призмы – Киселевско-Маноминский (КМ); готерив-раннеальбской островной дуги – Кемский (КЕ); раннемелового турбидитового бассейна – Журавлевско-Амурский (ЖА); главные разломы – Лимурчанский (Л), Вьюнский (В), Центральный Сихотэ-Алинский (ЦСА) и направления смещения (стрелки). На диаграмме (б) в проекции на верхнюю полусферу (сетка Вульфа) изображены изолинии плотности полюсов слоистости в процентах; чёрные стрелки – ориентировка сжатия; красными и синими стрелками показано направление смещения вдоль идеализированных направлений сдвигов (пунктир); N – количество замеров.

Figure 1. Terrane scheme of the northern part of the Sikhote-Alin orogenic belt (a) (after [1]), diagram of bedding of the Kherpuchi–Vayun district (b), rose diagrams of fault strike of steeply dipping (dip angles of 60–90°) mineralized veinlets at the Orel (c) and Ilinsky (d) sites and sketch of morphology of en echelon mineralized veinlets that are controlled by the NW-trending shear zone at the Ilinsky site (e).

Terranes: of Jurassic accretionary wedge, Ulban (UL), Badzhal (BD); of Hauterivian–early Albian accretionary wedge, Kiselevka–Manoma (KM); of Hauterivian–early Albian island arc, Kema (KE); of Early Cretaceous turbidite basin, Zhuravlevka–Amur (ZHA); major faults: Limurchan (L), Vyun (V), Central Sikhote-Alin (CSA) and direction of displacements (arrows). In the diagram (b) in projected on the upper hemisphere (Wulff net) are the isoline density of bedding, in percents; black arrows denote the stress orientation; red and blue arrows show displacement along idealized strike-slip directions (dashed line); N is the number of measurements.

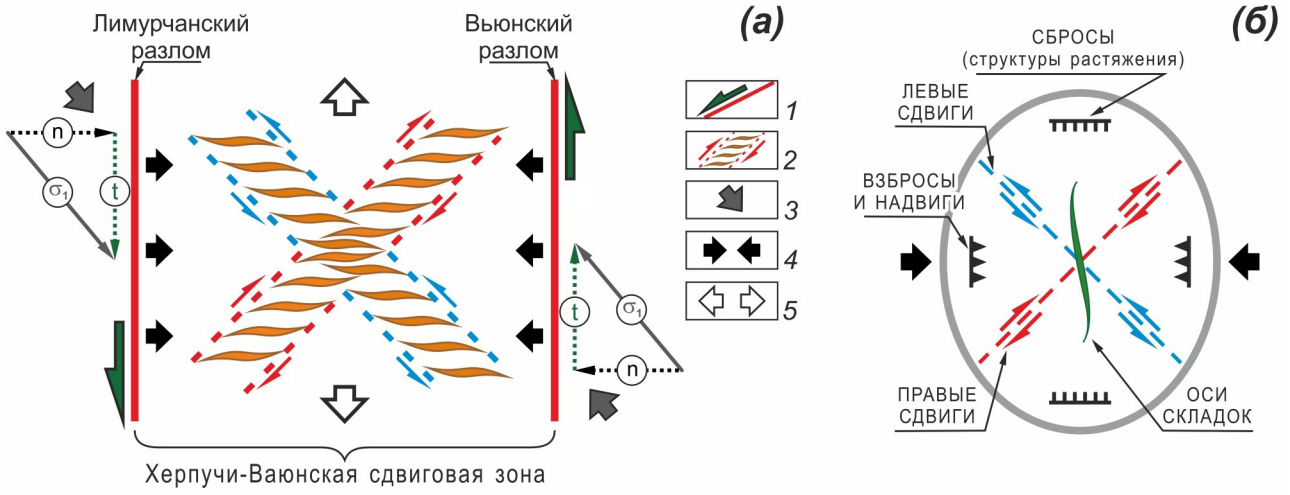


Рисунок 2. Динамо-кинематическая схема организации эшелонированных минерализованных прожилков (а) и схема структурных парагенезисов (б) в пределах Херпучи-Ваюнской сдвиговой зоны.

1 – граничные разломы сдвиговой зоны и направления смещений по ним (стрелки); 2 – эшелонированные минерализованные прожилки (коричневое), их ограничение потенциальными сдвигами (пунктир) и направление смещения (стрелки); 3 – ориентировка регионального сжатия; 4 – ориентировка локального сжатия в пределах сдвиговой зоны; 5 – ориентировка сосдвигового растяжения. σ_1 – вектор регионального (северо-западного) сжатия и его составляющие по отношению к граничным разломам: нормальная – n и тангенциальная (сдвиговая) – t.

Figure 2. Dynamic–kinematic scheme of the arrangement of en echelon mineralized veinlets (a) and a scheme of structural parageneses (b) within the Kherpuchi–Vayun strike-slip fault zone.

(1) Boundary faults and directions of displacements along them (arrows); (2) en echelon mineralized veinlets (brown), their confinement by potential strike-slip faults (dashed line) and the direction of displacement (arrows); (3) orientation of regional stress; (4) orientation of local stress; (5) orientation of extension. σ_1 is the vector of regional (northwestern) stress and its components with respect to the boundary faults: normal - n and tangential (shear) - t.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. В 2-х кн.** / Под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.

2. **Уткин В.П.** Сдвиговые дислокации и методика их изучения. М.: Наука, 1980. 144 с.

3. **Юшманов Ю.П.** Структурно-тектонические закономерности размещения золота в Пильда-Лимурийском рудном районе Нижнего Приамурья // Тихоокеанская геология. 2014. Т. 33. № 4. С. 99–109.

ВОЗРАСТ ФОРМИРОВАНИЯ ЗОЛОТОРУДНЫХ ОБЪЕКТОВ АЯХТИНСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ, ЕНИСЕЙСКИЙ КРЯЖ

М.А. Петрова, Е.О. Шапаренко, Н.А. Гибшер, А.А. Томиленко

Институт геологии и минералогии СО РАН, г. Новосибирск, e-mail: petrovama@igm.nsc.ru

Аннотация. Представлены первые результаты Ar-Ar изотопного датирования каменного материала Аяхтинского золоторудного узла. Были определены возрасты гранитов с участков Аяхта и Кондуяк (730.6 ± 8.8 млн лет и 622 ± 5.0 млн лет соответственно), возраст вмещающих пород 673 ± 3.0 млн лет и 732 ± 5.0 млн лет. Определен возраст кварцево-жильных зон месторождения Кондуяк 673.2 ± 6.7 млн лет. Полученные возрастные интервалы указывают на то, что процесс формирования Аяхтинского рудного узла имеет полистадийный характер.

AGE OF GOLD ORE FORMATION AT THE AYAKHTA ORE FIELD, YENISEI RIDGE

M.A. Petrova, E.O. Shaparenko, N.A. Gibsher, A.A. Tomilenko

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, Novosibirsk, e-mail: petrovama@igm.nsc.ru

Abstract. The first results of Ar-Ar isotope dating of rock samples from the Ayakhta gold ore cluster are presented. The ages of granites from the Ayakhta and Konduyak sites were determined to be 730.6 ± 8.8 million years and 622 ± 5 million years, respectively. The ages of the host rocks were also established as 673 ± 3.0 million years and 732 ± 5.0 million years. Additionally, the age of quartz-vein zones at the Konduyak deposit was determined to be 673.2 ± 6.7 million years. The obtained age intervals indicate that the formation of the Ayakhta ore cluster was a multistage process.

Енисейский кряж является одной из крупнейших золоторудных провинций России. Здесь известны и осваиваются крупные золоторудные месторождения, такие как Олимпиадинское, Ведугинское, Боголюбовское, Советское, Герфед, Удерейское, Богунайское и др. Аяхтинский золоторудный узел расположен в Центральной части Енисейского кряжа. Золоторудные объекты Аяхтинского золоторудного узла хорошо изучены в геологическом и минералого-геохимическом плане. Однако ряд вопросов остается слабо изученным, в их числе и возраст формирования золоторудных месторождений и рудопроявлений данной территории [5]. Причина малого внимания — относительно небольшие запасы золотых руд данной территории, а также

отсутствие надежного метода в определении возраста минерализации. Однако, в связи с увеличением объема добычи золота в регионе, присутствует необходимость в восстановлении минерально-сырьевой базы Енисейского кряжа. Как результат, на данный момент идет активное изучение небольших месторождений и рудопроявлений данного региона, включая территорию Аяхтинского золоторудного узла. Наиболее перспективным методом в решении вопроса возраста гидротермального оруднения является Ar-Ar метод, позволяющий использовать для анализа распространенные в рудах K-минералы (мусковит, серицит, биотит, калиевый полевой шпат и т.д.) [4]. Именно поэтому данный метод был выбран оптимальным при определении возраста формирования Аяхтинского золоторудного узла.

Рудный узел расположен в Северо-Енисейском районе Красноярского края. Наиболее перспективными на золотодобычу на территории узла являются участки: Аяхта, Кондуяк и Базисный. Запасы золота на месторождении Аяхта по категории C_2 равны 11.6 т. Только в 2019 году месторождение Кондуяк было поставлено на Государственный баланс с запасами золота 15.6 т по категории C_2. А рудопроявление Базисное имеет запасы золота 1.8 т [6]. Среди минералов присутствует кварц, реже встречается пирит, арсенопирит, халькопирит, пирротин, сфалерит. Самородное золото представлено в виде мелкой неравномерно рассеянной вкрапленности, изредка мелких гнезд в кварце и призальбандовых частях жил в сланцах. Пробность золота на Аяхте составляет 850‰ [6], на Кондуяке — 877–914‰ [3].

Для Ar-Ar анализов были отобраны биотит, мусковит и серицит из гранитов и вмещающих пород с месторождений Аяхта, Кондуяк, а также из кварц-сульфидной жилы с месторождения Кондуяк. Методом Ar-Ar датирования определены следующие возраста: мусковит вмещающих пород на Аяхтинском месторождении из образцов 607/149, 795/95, 795/142 показал 673 ± 3.0 млн лет, возраст биотита из образца 607/149 – 732 ± 5.0 млн лет. Возраст гранитов составил 730.6 ± 8.8 млн лет для Аяхты и 622 ± 5.0 млн лет для Кондуяка.

Принципиально важен результат датирования серицита из кварц-сульфидной жилы Кондуяка на уровне 673.2 ± 6.7 млн лет (рис. 1).

Данный возраст хорошо коррелирует с ранее полученными результатами по другим золоторудным месторождениям Енисейского кряжа и отвечает периоду тектоно-магматической активизации, возрастные реперы которой определены в интервале 850-600 млн лет [2] (рис. 2).

Возраст гранитоидов Аяхтинского комплекса, по данным [1], составляет 760–750 млн лет. Это может говорить о том, что нам удалось зафиксировать наиболее поздние термальные события, которые реализовались в центральной части Енисейского кряжа.

Эти данные однозначно указывают на большой временной интервал становления кварц-золото-малосульфидной минерализации. Многоэтапность

формирования рассматриваемых месторождений обосновывается также изотопными, термобарогеохимическими данными изучения каменного материала Аяхтинского золоторудного узла. Полученные данные позволяют говорить о длительном функционировании палеогидротермальной системы (~50-60 млн лет).

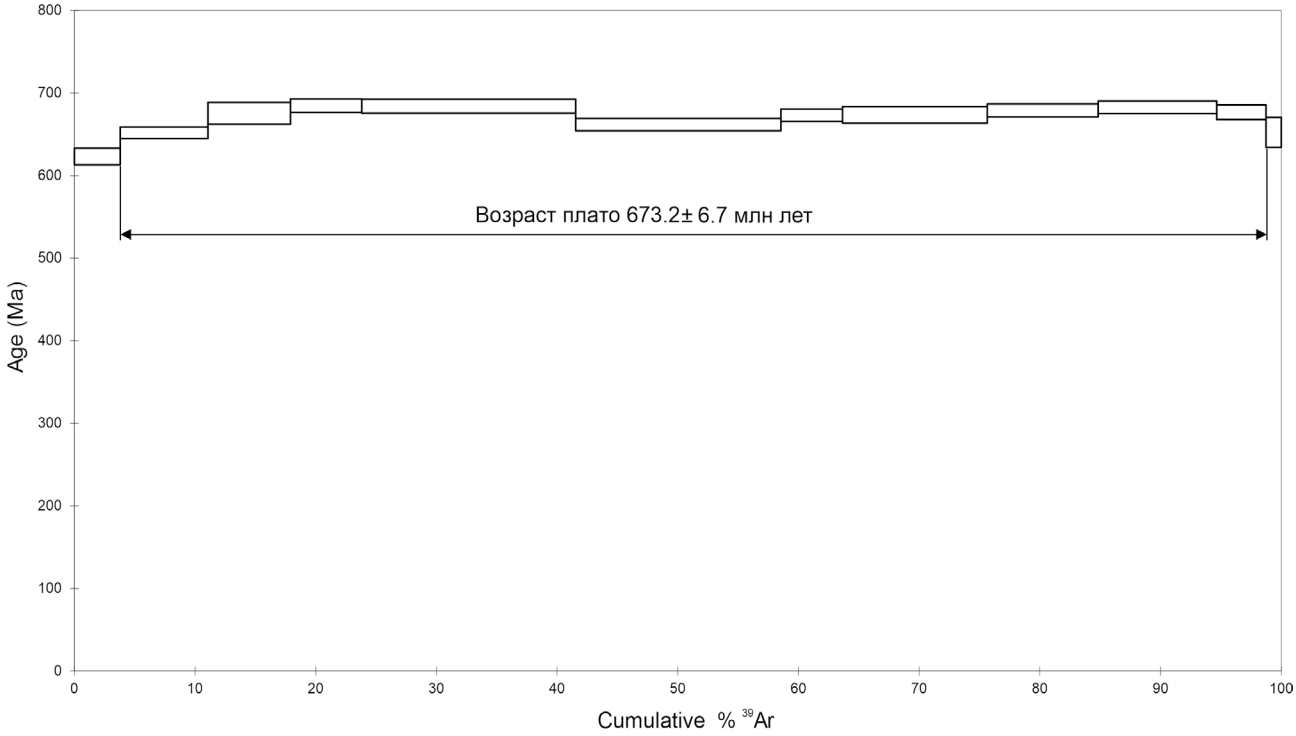


Рисунок 1. Спектр $^{40}Ar/^{39}Ar$ возрастов серицитов и мусковитов из кварцевой жилы (510/131.8) золоторудного месторождения Кондуяк

Figure 1. The spectrum of $^{40}Ar/^{39}Ar$ ages of sericites and muscovites from the quartz vein (510/131.8) of the Konduyak gold deposit

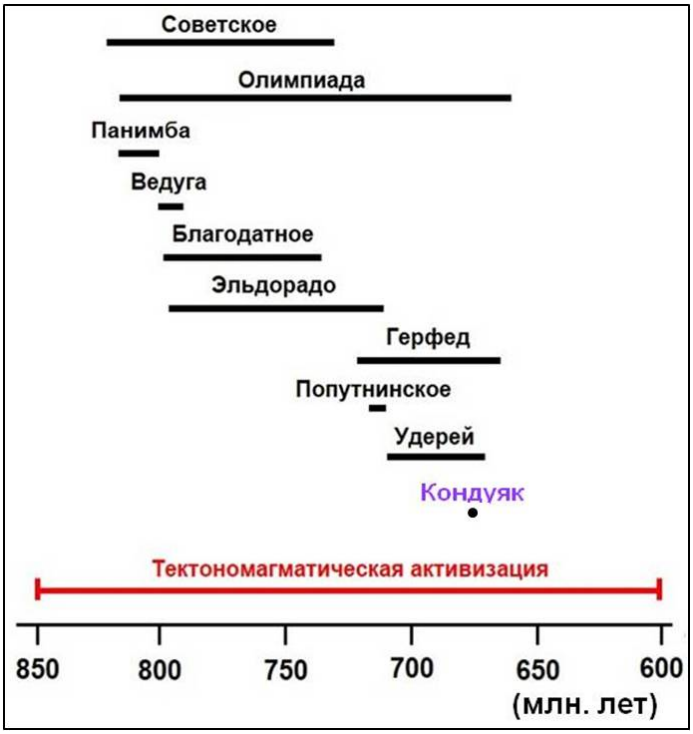


Рисунок 2. Обобщенная схема возраста формирования золоторудных месторождений Енисейского кряжа (Советское – 820-730 млн лет, Олимпиада – 817-660 млн лет, Панимба – 817-744 млн лет, Ведуга – 805±6.5 млн лет, Благодатное – 798-735 млн лет, Эльдорадо – 795-710 млн лет, Герфед – 722-665 млн лет, Попутнинское – 717-712 млн лет, Удерей – 711-670 млн лет, Кондуяк – 673 млн лет). Возраста формирования золоторудных месторождений были получены исследователями: Томиленко А.А., Ножкин А.Д., Гибшер Н.А., Шапаренко Е.О., Сазонов А.М., Гарьковенко С.Д., Неволько П.А.

Figure 2. Generalized scheme of gold deposit formation ages in the Yenisei Ridge (Sovetskoye – 820-730 Ma, Olympiada – 817-660 Ma, Panimba – 817-744 Ma, Veduga – 805±6.5 Ma, Blagodatnoye – 798-735 Ma, Eldorado – 795-710 Ma, Gerfed – 722-665 Ma [Garkovenko, 2015], Poputninskoye – 717-712 Ma, Uderey – 711-670 Ma, Konduyak – 673 Ma). The formation ages of gold deposits were determined by researchers including: Tomilenko A.A., Nozhkin A.D., Gibsher N.A., Shaparenko E.O., Sazonov A.M., Garkovenko S.D., Nevolyko P.A.

Работа выполнена при финансовой поддержке государственного задания ИГМ СО РАН «Мантийно-коровые флюидно - магматические системы в континентальной и островодужной литосфере, их эволюция и рудоносность (по флюидным и расплавным включениям в минералах и изотопно-геохимическим данным)» №122041400312-2.

ЛИТЕРАТУРА:

1. **Верниковский В.А., Верниковская А.Е.** Тектоника и эволюция гранитоидного магматизма Енисейского кряжа // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 1. С. 35–52.

2. **Лиханов, И. И., Ревердатто В.В.** Геохимия, генезис и возраст метаморфизма пород Приангарья в зоне сочленения Северного и Южного Енисейского кряжа // Геохимия. 2016. № 2. С. 143-164.

3. **Мальцева Г.Д., Никанюк Т.С.** Морфология золота некоторых гидротермальных месторождений Сибири и Дальнего Востока // Известия СО РАЕН. Геология, поиски и разведка рудных месторождений. 2010. № 2. С. 21-26.

4. **Неволько П.А., Борисенко А.С., Травин А.В.** Возраст Советского золоторудного месторождения (Енисейский кряж) // Рудоносность рифтовых и островодужных структур. Сборник материалов XIV научной молодежной школы «Металлогения древних и современных океанов. Миасс: ИМинУрО РАН, 2008. С. 225-228.

5. **Сердюк С.С., Коморовский Ю.Е., Зверев А.И., Ояберь В.К., Власов В.С., Бабушкин В.Е., Кирилленко В.А., Землянский С.А.** Модели месторождений золота Енисейской Сибири. Красноярск: СФУ, 2010. 584 с.

6. **Сердюк С. С.** Попутнинский тип золото-сульфидного оруденения Енисейской провинции // Сборник докладов XI международного конгресса “Цветные металлы и минералы”. Красноярск: 2019. С. 700-712.

МИКРОВКЛЮЧЕНИЯ РУДНЫХ МИНЕРАЛОВ В ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ЛАВАХ КАМЧАТКИ И ИХ МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Н.В. Потапова, П.К. Кепежинскас, Н.В. Бердников

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск, e-mail: k_nadezhda97@mail.ru

Аннотация. Четвертичные лавы вулканов Горелый, Мутновский, Авачинский и Бакенинг на Камчатке содержат микровключения рудных минералов, представленых самородным золотом и серебром, сплавами системы Cu-Ag-Au, сульфидами и хлоридами серебра, а также сульфидами халькофильных и сидерофильных металлов (халькопирит, пирротин, галенит), баритом и касситеритом. Сравнительный анализ этих микровключений с медно-золото-серебряными месторождениями Дальнего Востока показывает их сходство, свидетельствующее о том, что вулканиты Камчатки могли быть магматическими источниками рудного вещества, перенос которого в область порфирового и эпитермального рудообразования осуществлялся гидротермальными флюидами, обогащенными серой и хлором.

MICROINCLUSIONS OF ORE MINERALS IN QUATERNARY LAVAS FROM KAMCHATKA AND THEIR METALLOGENIC SIGNIFICANCE

N.V. Potapova, P.K. Kepezhinskas, N.V. Berdnikov

Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk, e-mail: k_nadezhda97@mail.ru

Abstract. Quaternary lavas from Gorely, Mutnovsky, Avachinsky and Bakening volcanoes in Kamchatka contain microinclusions of ore minerals such as native gold and silver, Cu-Ag-Au alloys, silver sulfides and chlorides, as well as chalcophile and siderophile sulfides (chalcopyrite, pyrrhothite, galena), barite and cassiterite. Comparative analysis of these microinclusions with copper-silver-gold deposits in the Russian Far East indicate their similarity suggesting that Kamchatka lavas were possible sources of ore elements, which were transported into the porphyry and epithermal ore-forming environments by hydrothermal fluids enriched in sulfur and chlorine.

Связь месторождений золота, серебра, меди и ряда других рудных элементов с вулканизмом активных окраин континентов хорошо изучена [4]. На Камчатке эпитермальная золото-серябряная минерализация установлена в пределах Вилючинского и Асачинского вулканов, в последний раз проявлявших активность, соответственно, в виде андезитового лавово-пирокластического потока 8065 лет до н.э. (Вилючик) и паро-газового извержения 1929 г.

(Асача). Кроме того, многочисленные эпитермальные золото-серебряные месторождения и рудопроявления (Агинское, Бараньевское, Кунгурцевское и др.) сосредоточены в эродированных андезит-дацит-риолитовых вулкано-тектонических структурах миоцен-плиоценового, иногда плейстоценового, возраста, часто прорванных малоглубинными гранитоидами и дайками базальтового, андезит-базальтового и андезитового состава [1]. С адакитовым вулканизмом северной Камчатки связаны рудные поля и проявления эпитермальной золото-серебряной формации (Тымлат, Асуваям, Толятоваям, Тыклаваям, Кичига, Эруваям и др.), иногда ассоциирующиеся со слабо эродированными медно-порфировыми рудно-магматическими системами [5].

Ассоциации микровключений металлов и минералов несут информацию об условиях образования и металлогеническом потенциале магматических пород. Для выяснения связи между микровключениями, обнаруживаемыми при электронно-микроскопическом исследовании пород, и их рудной минерализацией изучены образцы четвертичных лав из вулканов Авачинский, Горелый, Мутновский и Бакенинг на Камчатке. Лавы этих вулканов представлены анкарамитами (Авачинский вулкан), базальтами, андезито-базальтами, андезитами (Авачинский, Горелый и Мутновский вулканы), а также дацитами (вулкан Бакенинг), относящимися к надсубдукционным толеитовым и известково-щелочным вулканическим сериям, типичным для современных островных дуг и активных континентальных окраин [6]. Кроме того, дациты вулкана Бакенинг обнаруживают пониженные содержания иттрия (9-13 г/т) и иттербия (0.93-1.55 г/т), а также повышенные отношения Sr/Y (30-57), характерные для адакитов. Вкрапленники в анкарамитах Авачинского вулкана представлены оливином (часто с включениями шпинели) и клинопироксеном, микрофенокристы и микролиты в пилотакситовой основной массе – плагиоклазом, клинопироксеном, ильменитом и титаномагнетитом. В базальтах, андезито-базальтах и андезитах Авачинского, Горелого и Мутновского вулканов вкрапленники сложены различными сочетаниями оливина, клинопироксена, ортопироксена и плагиоклаза, а среди акцессорных минералов присутствует Cr-Al-Fe шпинель, титаномагнетит и апатит. Амфибол преобладает среди вкрапленников адакитовых дацитов вулкана Бакенинг в ассоциации с плагиоклазом, ортопироксеном, титаномагнетитом и апатитом.

Выделяются следующие основные группы микровключений: 1) самородные металлы (золото, серебро, вольфрам, медь, цинк), часто покрытые окисной пленкой; 2) сплавы Ag-Au, Cu-Ag-Au, Cu-Ag; 3) хлориды серебра, меди, висмута, олова, сурьмы и свинца; 4) сульфиды серебра (часто с небольшой примесью меди); 5) сульфиды халькофильных (Cu, Zn, Pb) и сидерофильных (Fe, Ni) металлов; 6) барит; 7) касситерит (рис. 1).

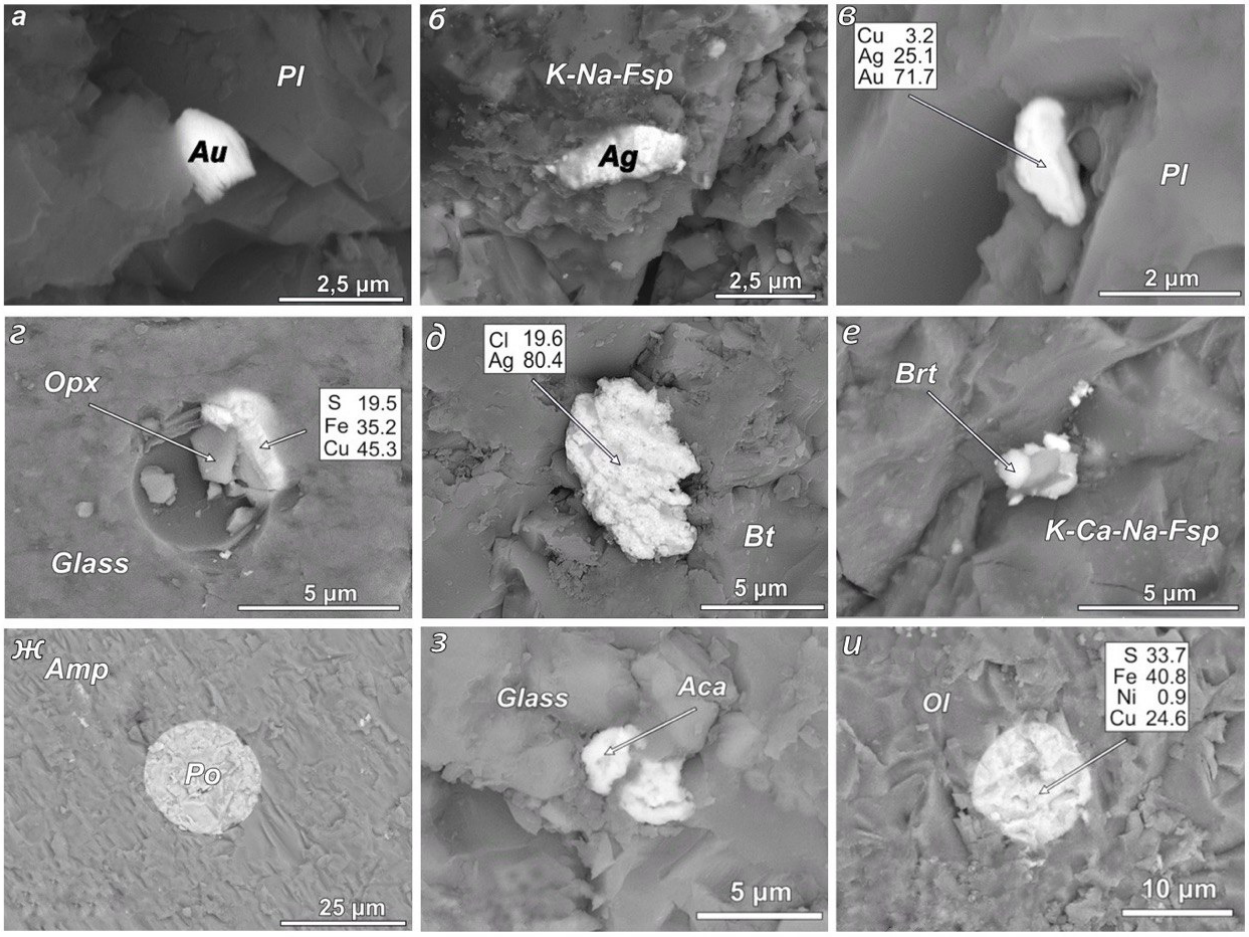


Рисунок 1. Микровключения рудных минералов в четвертичных вулканитах Камчатки:
а – самородное золото в плагиоклазе, б –самородное серебро в K-Na полевом шпате, в –сплав Cu-Ag-Au в плагиоклазе, г – халькопирит в ассоциации с ортопироксеном в вулканическом стекле, д –хлорид серебра (+ самородное Ag) в биотите, е – барит в K-Ca-Na полевом шпате, ж– пирротин в амфиболе, з– акантит в вулканическом стекле, и– сульфид Ni-Cu-Fe в оливине.
Aca – акантит, Amp – амфибол, Brt – барит, Bt – биотит, Fsp – полевой шпат, Glass – вулканическое стекло, Ol – оливин, Opx – ортопироксен, Pl – плагиоклаз, Po – пирротин.

Figure 1. Microinclusions of ore minerals in quaternary volcanic rocks from Kamchatka:
a – native gold in plagioclase, b – native silver in K-Na feldspar, c – alloy of Cu-Ag-Au in plagioclase, d – chalcopyrite associated with orthopyroxene in volcanic glass, e – silver chloride (+ native Ag) in biotite, f – barite in K-Ca-Na feldspar, g – pyrrhotite in amphibole, h – acanthite in volcanic glass, i – Ni-Cu-Fe sulphide in olivine.
Aca – acanthite, Amp – amphibole, Brt – barite, Bt – biotite, Fsp – feldspar, Glass – volcanic glass, Ol – olivine, Opx – orthopyroxene, Pl – plagioclase, Po – pyrrhotite.

Результаты микроминералогических исследований лав вулканов Мутновский, Горелый, Авачинский и Бакенинг показывают определенные региональные различия (рис. 2). Среди микровключений в породах вулканов южной группы (Мутновский, Горелый) преобладают сульфиды и хлориды серебра и меди, иногда с примесью других халькофильных металлов, также присутствует барит. Многие микровключения имеют вторичный характер и, скорее всего, связаны с богатыми серой и хлором гидротермальными флюидами, сопровождавшими излияние этих лав на поверхность, и их проработку при остывании в активных гидротермальных полях, столь характерных для этих вулканов [3]. Относительная редкость микровключений

самородных металлов и их сплавов в лавах Мутновского и Горелого, скорее всего, связана с высоким потенциалом кислорода при дифференциации первичных расплавов в коровых очагах под этими крупными долгоживущими эруптивными центрами [3]. В лавах вулканов Авачинский и Бакенинг преобладают микровключения самородных золота и серебра, их сплавов с медью и между собой, а также частично окисленных сидерофильных (Fe, Pt, W) и халькофильных (Cu, Zn, Sn, Pb, Bi) металлов (рис. 2), что может быть связано, с одной стороны, с несколько более восстановительным характером дифференциации вмещающих магм, с другой – с интенсивным взаимодействием последних с металлоносными перидотитами мантийного клина, присутствующими в виде ксенолитов в эруптивных продуктах этих вулканов [6]. Присутствие во всех изученных лавах большого количества сульфидов и хлоридов различных рудных элементов (рис.1, 2) свидетельствует о серно-хлоридном характере флюидов, сопровождавших кристаллизацию и излияние этих лав на поверхность, что подтверждается присутствием серы и хлора в фумаролах и вулканических газах Камчатки [2].

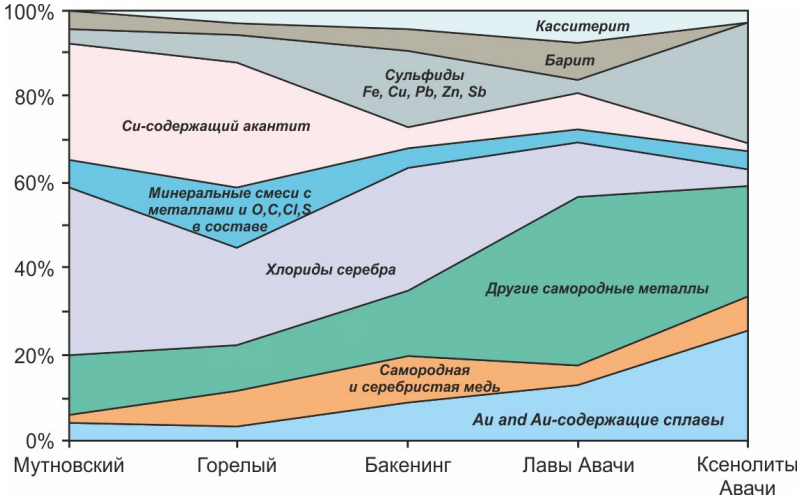


Рисунок 2. Распределение различных типов микровключений металлов и минералов в четвертичных лавах Камчатки.

Figure 2. Distribution of various types of metal and mineral microinclusions in quaternary lavas in Kamchatka.

Микровключения рудных минералов в изученных образцах встречаются 1) в срастании с высокотемпературными первично-магматическими минералами (оливин, клинопироксен, плагиоклаз) и 2) в трещинах, в межзерновых пространствах и в газовых порах, в ассоциации с вторичными минералами. Это свидетельствует об их образовании как в процессе кристаллизации исходной магмы, так и на заключительной стадии затвердевания лавовых потоков и их постэруптивного преобразования в активных фумарольных полях. Оба этих последовательно развивавшихся процесса проходили в присутствии хлор- и серосодержащего флюида, что подтверждается обилием

микровключений хлоридов и сульфидов в изученных породах. При этом сера отмечена как в сульфидной (акантит, пирротин, халькопирит), так и в сульфатной форме (барит).

Распределение валовых содержаний рудных элементов в четвертичных лавах также хорошо коррелирует с наблюдаемыми в них ассоциациями микровключений. Так, обогащенность андезито-дацитов Бакенинга серебром и вольфрамом подтверждается обнаружением в них хлораргирита, акантита, серебросодержащих сплавов и самородного вольфрама. Обедненность этих пород никелем и мышьяком (и, в некоторой степени, свинцом) подтверждается отсутствием в них микроминералов этих элементов. Обнаружение в андезито-дацитах Бакенинга значительного количества микровключений золотосодержащих сплавов позволяет расценивать эти породы в качестве эффективного транспортера этого металла из глубины к поверхности в процессе современного субдукционного магматизма.

Ассоциации микровключений в изученных вулканитах содержат целый ряд минералов, таких как самородное золото и серебро, сплавы системы Cu-Ag-Au, акантит, хлораргирит, халькопирит, пирит, пирротин, галенит, барит, хлорапатит, которые широко распространены в эпитермальных месторождениях Камчатки [1] и, по-видимому, являются индикаторными для надсубдукционных рудно-магматических систем [4, 5, 7]. Полученные нами данные свидетельствуют о том, что вулканические породы островных дуг и активных окраин могут являться магматическими источниками рудного вещества, перенос которого в область формирования порфировой и эпитермальной Cu-Ag-Au минерализации осуществляется обогащенными серой и хлором гидротермальными флюидами.

Работа выполнена в рамках гос. задания Института тектоники и геофизики ДВО РАН (тема НИР № 124042300007-3 – молодежная лаборатория) с использованием научного оборудования Хабаровского инновационно-аналитического центра.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бортников Н.С., Толстых Н.Д.** Эпитермальные месторождения Камчатки // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 7. С. 722-752.

2. **Меняйлов И.А., Никитина Л.П.** О поведении серы и хлора в фумарольных газах перед усилением активности вулканов // Вулканизм и геохимия его продуктов. Труды Института вулканологии СО АН СССР. Вып. 24. М.: Наука, 1967. С. 72-81.

3. **Селянгин О.Б.** Строение, вещество и близповерхностные магматические очаги вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка) // ГИАБ № 11. Специальный выпуск № 31 “Камчатка-3”. 2016. С. 365-452.

4. **Сидоров А.А., Волков А.В., Савва Н.И.** Вулканизм и эпитермальные месторождения // Вулканология и сейсмология. 2015. № 6. С. 3-12.

5. **Kepezhinskas P., Berdnikov N., Kepezhinskas N., Konovalova N.** Adakites, high-Nb basalts and copper-gold deposits in magmatic arcs and collisional orogens: an overview // Geosciences. 2022. V. 12. N 1. https://doi.org/ 10.3390/geosciences12010029.

6. **KepezhinskasP. , McDermott F., Defant M.J., Hochstaedter A., Drummond M.S., Hawkesworth C.J., Koloskov A., Maury R.C., Bellon H.** Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1997. V. 61. N 3. P. 577-600.

7. **Richards J.P.** Porphyry and related deposits in subduction and post-subduction settings // Acta Geologica Sinica. 2014. V. 88. P. 535-537.

КОБАЛЬТОНОСНЫЕ FE-MN КОРКИ НА МИОЦЕНОВЫХ ПОРОДАХ "PETIT-SPOT" ВУЛКАНОВ ГАЙОТА АЛЬБА: ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА, СТРОЕНИЯ И БИОСТРАТИГРАФИИ ИЗВЕСТКОВОГО НАНОПЛАНКОТОНА

Е.А. Савина[1], И.С. Перетяжко[1], И.А. Пуляева[1,2]

[1]Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск, e-mail: pgmigor@mail.ru

[2]АО "Южморгеология", г. Геленджик

Аннотация. Меловые вулканические породы на плато и склонах гайота Альба покрыты кобальтоносной Fe-Mn коркой с последовательностью слоев I-1 → I-2 → II → III и I-1 → II → III. На миоценовых породах (базаните, туфе, туффите) отложилась только корка слоя III толщиной 4–8 мм. В этой корке микроскопические Fe-Mn слойки, содержащие до 33 мас. % Mn (Mn/Fe = 2–3), обогащенные Co (1.4–1.6 мас. %) и Ni (0.6–1.2 мас. %), чередуются со слойками, содержащими до 17 мас. % Fe (Mn/Fe = 1.1–1.7), меньше Co (0.8–0.9 мас. %) и Ni (0.3–0.5 мас. %). По Co-хронометрии для среднего содержания Co = 1 мас. % рассчитаны скорость роста и возраст корки: 1.68 мм/млн лет и 2.4–4.8 млн лет. Эти оценки согласуются с возрастом (< 1.8 млн лет) известкового нанопланктона, обнаруженного в корке слоя III.

COBALT-RICH FE-MN CRUSTS ON MIOCENE ROCKS OF THE ALBA GUYOT PETIT-SPOT VOLCANOES: FEATURES OF THE COMPOSITION, STRUCTURE AND BIOSTRATIGRAPHY OF CALCAREOUS NANOFOSSILS

E.A. Savina[1], I.S. Peretyazhko[1], I.A. Pulyaeva[1,2]

[1]A.P. Vinogradov Institute of Geochemistry SB RAS, Irkutsk

[2]JSC Yuzhmorgeologiya, Gelendzhik

Abstract. Cretaceous volcanic rocks on the plateau and slopes of the Alba Guyot are covered by a Co-rich Fe-Mn crusts with the layers sequence I-1 → I-2 → II → III and I-1 → II → III. Only the Fe-Mn crust of layer III was deposited on Miocene rocks (basanite, tuff and tuffite). In this 4–8 mm thick crust, microscopic Fe-Mn layers containing up to 33 wt % Mn (Mn/Fe=2–3), enriched in Co (1.4–1.6 wt %) and Ni (0.6–1.2 wt %) alternate with layers containing up to 17 wt % Fe (Mn/Fe=1.1–1.7), less Co (0.8–0.9 wt %) and Ni (0.3–0.5 wt %). Based on Co-chronometry for an average Co 1 wt %, the calculated growth rate and age of the

crust are 1.7 mm/Myr and 2.4–4.8 Myr. These estimates are consistent with the age (< 1.8 Myr) of the calcareous nannofossils from crust (Unit III).

Вулканические постройки гайота Альба (Магеллановы горы) образовались на юрском (около 160 млн лет) сегменте Тихоокеанской плиты, который находился в меловом периоде в южном полушарии, где формировалась Сверхкрупная Магматическая Провинция “Super”-LIP – многочисленные меловые вулканические массивы в зонах спрединга океанических плит Изанаги, Фараллон и Феникс [3-5]. Гайот имеет форму усеченной четырехгранной пирамиды с основанием 126x90 км по изобате 5100 м, осложненной саттелитными постройками (рис. 1а). Углы падения склонов основного массива достигают 35–40° и выполаживаются у основания до 2–8°. Плосковершинное плато размером 46x35 км находится на глубине 1250–1500 м. На склонах гайота от изобаты 3000 м до плато обнажаются субщелочные и щелочно-базальтовые породы. По ^{40}Ar-^{39}Ar данным верхние части построек гайота Альба и его сателлита Ома Влиндер мощностью около 1400 м в интервале изобат 3600–2200 м слагают меловые (112–86 млн лет) базальты, трахибазальты и андезитобазальты [3].

В северо-западной части плато гайота находится 5 больших и несколько малых конусов (рис. 1б). При сонарной съемке и драгировании в районе станций 15Д21 и 15Д18 ранее были обнаружены конуса, сложенные базанитами и туфом с прослоями планктоногенного известняка [2]. Миоценовый возраст вулканических конусов обоснован по видовому составу известкового нанопланктона в цементе туфа, K-Ar датировкой (15 ± 2 млн лет) базанита из драги 15Д21 [2] и ^{40}Ar-^{39}Ar возрастом (от 18.3 ± 0.4 до 19.9 ± 0.8 млн лет) базанита из драги 15Д266, отобранной вблизи небольшого конуса на восточной кромке плато [6]. Конуса вулканов формировались на пересечениях разломов, которые являлись подводящими каналами для базанитовых магм.

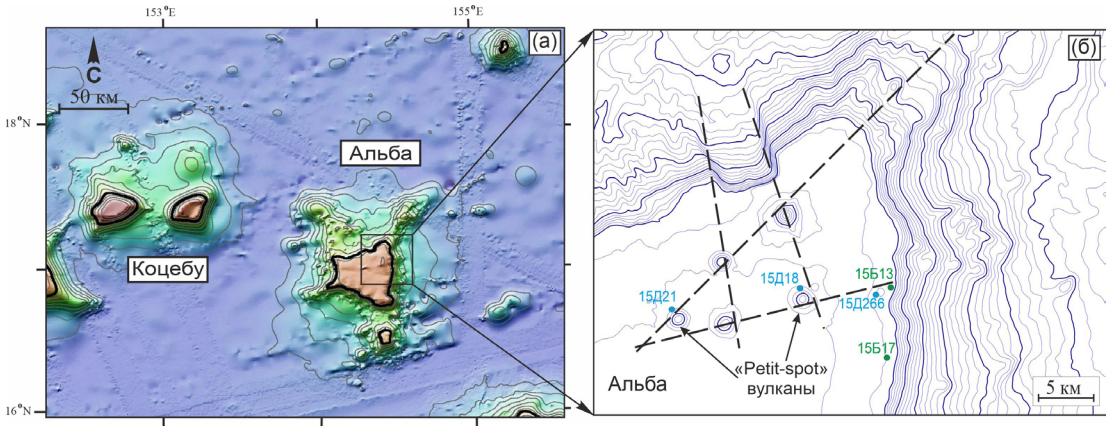


Рисунок 1. (а) Батиметрическая карта района гайотов Альба и Коцебу. (б) Детализация фрагмента гайота Альба (изобаты через 100 м) с номерами станций драгирования и бурения, предполагаемыми разломами и “petit-spot” вулканами.

Figure 1. (a) Bathymetric map of the Alba and Kocebu Guyots. (b) Detail of the Alba Guyot (isobaths every 100 m) with dredging and drilling stations, inferred faults and petit-spot volcanoes.

Положение в кайнозое гайотов Магеллановых гор на северо-западном сегменте Тихоокеанской плиты вблизи Марианского желоба, миоценовые датировки и изотопно-геохимические особенности базанитов указывают на то, что конуса вулканов и отложения туфа вблизи них на плато гайота Альба были проявлениями кайнозойского “petit-spot” вулканизма [5]. Находки многочисленных базанитовых вулканов, в т.ч. достигающих высоты 750 м и основания 5.1 км, свидетельствуют о масштабных извержениях “petit-spot” щелочно-базальтовых магм, которые происходили в миоцене на меловых гайотах и подводных горах в Тихом океане.

Осадочный чехол гайота Альба слагают мелководные и глубоководные известняки, брекчии с карбонатным цементом и карбонатно-глинистые осадки, формирующиеся на плато и склонах в различные периоды погружения гайота и повышения уровня океана. Часть плато покрывают фораминиферовые илы, а свободные от осадков поверхности, обычно вдоль кромки гайота — кобальтоносная Fe-Mn корка мощностью до 15 см. На основании структурно-текстурных особенностей, состава и датировок (от ранних к поздним) для Магеллановых гор выделяется до пяти основных слоев Fe-Mn корок, формирование которых происходило около 60–65 млн лет [1]: в позднем палеоцене–раннем эоцене (слой I-1), среднем–позднем эоцене (слой I-2a или I-2), позднем олигоцене–раннем миоцене (слой I-2b или базальное основание слоя II), среднем–позднем миоцене (слой II) и в плиоцене–плейстоцене (слой III). Периоды отложения корок чередовались длительными временными интервалами, когда оксигидраты Fe и Mn не накапливались и частично растворялись. В полном разрезе корок (I-1 → I-2a → I-2b, II → III) установлены значительные перерывы в отложении рудного вещества: более 13 млн лет в олигоцене между слоями I-2 и II или между слоями I-2a и I-2b, около 3–4 млн лет в раннем миоцене при формировании слоя II и до 2–3 млн лет в раннем плиоцене между слоями II и III [1]. Наиболее значительный олигоценовый перерыв разделяет два основных этапа отложения корок: древних (слои I-1, I-2) в палеоцене–эоцене и молодых (слои II, III) в миоцене–плейстоцене.

Меловые вулканические породы на свободной от рыхлых осадков поверхности плато и склонах гайота Альба покрыты кобальтоносной Fe-Mn коркой, в которой встречаются последовательности слоев I-1 → I-2 → II → III и I-1 → II → III, а на миоценовых породах (базаните, туфе, туффите) отлагалась корка только слоя III. Скважиной 15Б13 вблизи небольшого конуса и точки драгирования 15Д266 (рис. 1б) вскрыт слой базанитового туфа. В керне скважины 15Б17 наблюдается перерыв отложения Fe-Mn корки в миоцене, которая перекрыта слоем туффита. Находки вулканокластических пород (туфа, туффита) и отсутствие гиалокластитовых отложений в районе "petit-spot" вулканов свидетельствуют о наземных извержениях базанитовой магмы на плато гайота. Туф из скважины 15Б13 формировался в субаэральных, а туффит из скважины 15Б17 в мелководных прибрежных условиях. Из

биостратиграфических данных по керну 15Б13 следует, что после погружения гайота ниже уровня океана в поверхностных пористых участках туфа в среднем–позднем миоцене около 10–7 млн лет назад накапливались карбонатные осадки, содержащие известковый нанопланктон из биозон CN7 и CN8. Осаждение в слое туффита (керн 15Б17) нанопланктона из биозоны CN9 происходило в позднем миоцене около 6 млн лет назад.

Мощность Fe-Mn корки в слое III на миоценовых породах (базаните, туфе, туффите), варьирует от 4 до 8 мм. Корка имеет тонкоритмичную слоисто-столбчатую текстуру: чередующиеся микроскопические слойки и субпараллельно ориентированные столбцы различной толщины (рис. 2).

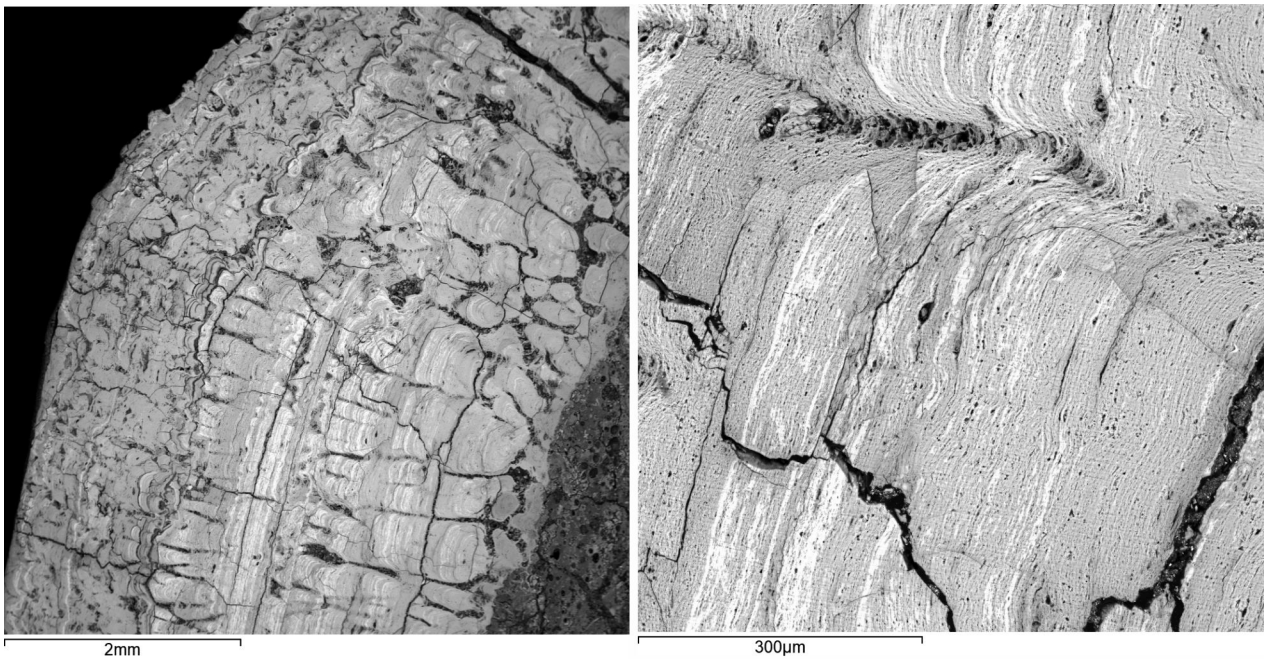


Рисунок 2. Кобальтоносная Fe-Mn корка (слой III) на базаните, BSE изображения.

Figure 2. Co-rich Fe-Mn crust (Unit III) on basanite, BSE images.

Яркие в BSE изображении слойки обогащены Mn до 33 мас. % относительно Fe (Mn/Fe = 2–3), имеют высокие концентрации Co (1.4–1.6 мас. %) и Ni (0.6–1.2 мас. %). Темные в BSE изображении железистые слойки содержат до 17 мас. % Fe (Mn/Fe = 1.1–1.7), меньше Co (0.8–0.9 мас. %) и Ni (0.3–0.5 мас. %). По данным Рамановской спектроскопии в корке диагностирован Fe-вернандит, спектры которого значимо не различаются по форме в слойках с разным Mn/Fe отношением. Согласно Co-хронометрии, при среднем содержании Co около 1 мас. % скорость роста корки мощностью 4–8 мм была 1.7 мм/млн лет, а ее образование началось в интервале от 2.4 до 4.8 млн лет назад. В это время поверхность гайота находилась на глубине, благоприятной для отложения рудного вещества, возможно, на уровне кислородного минимума водной толщи (600–700 м) в этой части Магеллановых гор. В дальнейшем происходило погружение гайота до современной глубины (1414 м на станции драгирования 15Д266) и отложение кобальтоносной Fe-Mn корки слоя III. В пористых участках корки, покрывающей миоценовые породы, а также верхние

части кернов скважин 15Б13 и 15Б17, обнаружен плейстоценовый (< 1.8 млн лет) известковый нанопланктон из биозон CN19 и CN20, что согласуется с ее молодым возрастом по оценкам Co-хронометрии.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 25-17-00128. Выражаем благодарность сотрудникам АО "Южморгеология", принимавшим участие в работах НИС "Геленджик", отборе пород и Fe-Mn корок на гайоте Альба.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мельников М.Е., Плетнев С.П.** Биостратиграфические исследования кабальтоносных марганцевых корок на гайотах Магеллановых гор // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2011. № 3. С. 45–69.

2. **Мельников М.Е., Подшувейт В.Б., Пуляева И.А., Невретдинов Эр.Б.** Среднемиоценовые вулканические постройки на гайоте Дальморгеология (Магеллановы горы, Тихий океан) // Тихоокеанская геология. 2000. Т. 19. № 5. С. 38–46.

3. **Перетяжко И.С., Савина Е.А., Пуляева И.А., Юдин Д.С.** Внутриплитный вулканизм гайота Альба: геодинамические модели формирования Магеллановых гор в Тихом океане на протяжении 100 млн лет // Геология и геофизика. 2023. Т. 64. № 1. С. 3–33. https://doi.org/10.15372/GiG2021179

4. **Peretyazhko I.S., Savina E.A.** Cretaceous intraplate volcanism of Govorov Guyot and formation models of the Magellan seamounts, Pacific Ocean // International Geology Review. 2022. V. 65. N 16. P. 2479–2505. https://doi.org/10.1080/00206814.2022.2145512

5. **Peretyazhko I.S., Savina E.A., Pulyaeva I.A.** Miocene petit-spot basanitic volcanoes on Cretaceous Alba Guyot (Magellan Seamount Trail, Pacific Ocean) // Geosciences. 2024. V. 14. N 10. P. 252. https://doi.org/10.3390/geosciences14100252

БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНАЯ МИНЕРАЛИЗАЦИЯ В ЗОЛОТОРУДНОМ МЕСТОРОЖДЕНИИ ПИОНЕР (ПРИАМУРЬЕ)

П.П. Сафронов[1], Н.В. Моисеенко[2]

[1]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: psafronov@mail.ru

[2]Институт геологии и природопользования ДВО РАН, г. Благовещенск

Аннотация. Методом аналитической растровой электронной микроскопии (АРЭМ) изучен минеральный состав благороднометалльной минерализации месторождения Пионер (Приамурье). Установлены, наряду с главными рудными минералами, четыре микроминеральные ассоциации: самороднометалльная, сульфидная, сульфоантимонитовая, теллуридная и сульфотеллуридная.

PRECIOUS METAL MINERALIZATION IN THE PIONEER GOLD DEPOSIT (AMUR REGION)

P.P. Safronov[1], N.V. Moiseenko[2]

[1]Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, e-mail: psafronov@mail.ru

[2]Institute of Geology and Natural Management FEB RAS, Blagoveshchensk

Abstract. The method of analytical scanning electron microscopy (ASEM) was used to study the mineral composition of noble metal mineralization of the Pioneer deposit (Priamurye). Along with the main ore minerals, four micromineral associations were established: native metal, sulfide, sulfoantimonite, telluride and sulfotelluride.

Месторождение Пионер расположено в Северобуреинской зоне Буреинской провинции Монголо-Охотского золотоносного пояса на границе Гонжинского выступа с Ушумунским наложенным прогибом и относится к золото-полисульфидно-кварцевой формации [1]. Образование месторождения связано с системой разломов северо-восточного и северо-западного простирания, к ним приурочены и основные рудные зоны месторождения. Для работы были отобраны образцы из рудной зоны Николаевской. Рудные метасоматиты этой зоны относятся к формации средних глубин и золото-сульфосольно – антимонитовой стадии. Главные жильные минералы – кварц, полевые шпаты и слюды, из карбонатов отмечен сидерит, среди главных

рудных минералов встречаются пирит, арсенопирит, антимонит, сульфосоли Pb, сульфосоли Sb и As, и самородное золото.

С помощью метода АРЭМ были исследованы золотоносные образцы, размеры которых в основном находятся в диапазоне от первых десятков до нескольких сотен микрометров [2-6]. Самородное золото в образцах находится в тесных срастаниях с другими рудными минералами, состав которых варьирует в широких пределах. В целом установлено четыре микроминеральные ассоциации: самороднометалльная, сульфидная, сульфоантимонитовая, теллуридная и сульфотеллуридная.

Самороднометалльная ассоциация включает в себя самородное золото (Au,Ag), медистое золото (Au,Ag,Cu), и медисто-цинкистое золото (Au,Ag,Cu,Zn). Пробность этих видов золота в целом варьирует в пределах 699 – 924‰, средняя проба составляет 825‰.

Сульфидная ассоциация, кроме вышеупомянутых главных рудных сульфидов, состоит из золото-серебряных сульфидов $(Au,Ag)_3S$, аргентита Ag_2S, сурьмянистого прустита $(Ag)_3(As,Sb)S_3$, Ag-содержащего теннантита $(Cu,Ag)_{12}As_4S_{13}$, Ag-содержащих сфалерита ZnS и галенита PbS, а также пирротина $Fe_{1-x}S$, халькопирита $CuFeS_2$, киновари HgS.

Сульфоантимонитовая ассоциация представлена Ag,Au-содержащими тетраэдритом $(Cu,Ag,Au)_{12}Sb_4S_{13}$ и свинцовистым сульфоантимонитом сложного состава $(Ag,Au,Cu)_4Pb_3(Sb,As)_9S_{18}$, фрейбергитом $(Ag,Cu)_{12}Sb_4S_{13}$, Ag-содержащим тетраэдритом $(Cu,Ag)_{12}Sb_4S_{13}$, миаргиритом $AgSbS_2$, андоритом $AgPbSb_3S_6$, Ag-содержащим плагионитом $(Pb,Ag)_5Sb_8S_{17}$, а также семсейитом $Pb_9Sb_8S_{21}$, гетероморфитом $Pb_7Sb_8S_{21}$, фюлёппитом $Pb_3Sb_8S_{15}$, цинкенитом $PbSb_2S_4$, буланжеритом $Pb_5Sb_4S_{11}$, мышьяковистым бурнонитом $CuPb(Sb,As)S_3$ и джемсонитом $Pb4(Fe,Mn)Sb_6S_{14}$.

В теллуридной и сульфотеллуридной ассоциации установлены петцит Ag_3AuTe_2 и гессит Ag_2Te, свинцовистые сульфотеллуриды $AuAg_2PbTeS_3$ и (Ag,Au,Pb)n(Te,S)m, свинцово-цинкистый сульфотеллурид (Ag,Au,Pb,Zn)n(Te,S)m, мышьяк-содержащий свинцово-цинкистый сульфотеллурид (Ag,Au,Pb,Zn)n(Te,As,S)m, где $n\approx9$-11, а $m\approx5$-7, а также бенлеонардит $Ag_8Te_2(Sb,As)S_3$.

Следует также отметить нередкое присутствие в изученных образцах смеси оксидов и гидрооксидов Fe, высокоуглеродистой породы и природной латуни (Cu,Zn).

В качестве примера, показывающего непростое фазовое строение золотоносных образцов, ниже приведен рисунок.

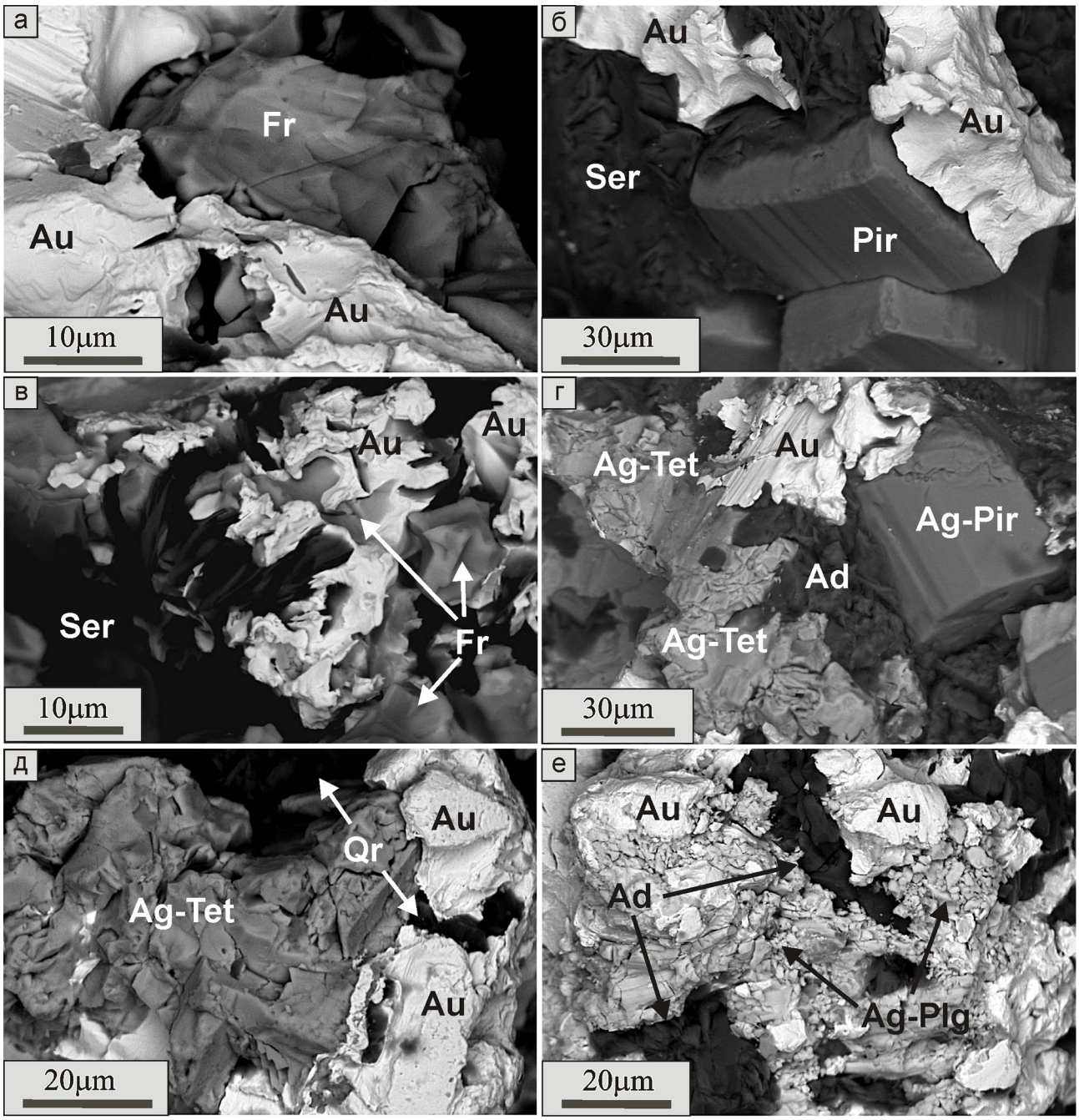


Рисунок 1. а–е: а – срастание самородного золота (Au) с фрейбергитом (Fr); б – срастание самородного золота (Au) и серицита (Ser) с кристаллами пирита (Pir); в – причудливые выделения золота на фрейбергите (Fr), все это в сростке с серицитом; г – срастание золота (Au), Ag-содержащего тетраэдрита (Ag-Tet), адуляра (Ad) и кристалла пирита (Pir); д – срастание Ag-содержащего тетраэдрита (Ag-Tet) с самородным золотом и кварцем (Qr); е – мелкокристаллическая масса Ag-содержащего плагионита (Ag-Plg) среди выделений самородного золота (Au) и адуляра (Ad). Микроснимки получены в упруго-рассеянных электронах.

Figure 1. a–e: a – intergrowth of native gold (Au) with freibergite (Fr); b – intergrowth of native gold (Au) and sericite (Ser) with pyrite crystals (Pir); c – bizarre gold segregations on freibergite (Fr), all this in an intergrowth with sericite; g – intergrowth of gold (Au), Ag-containing tetrahedrite (Ag-Tet), adularia (Ad) and a pyrite crystal (Pir); d – intergrowth of Ag-containing tetrahedrite (Ag-Tet) with native gold and quartz (Qr); e – fine-crystalline mass of Ag-containing plagionite (Ag-Plg) among segregations of native gold (Au) and adularia (Ad). Micrographs were obtained in elastically scattered electrons.

Данные, полученные с использованием метода АРЭМ, дополняют и расширяют спектр рудных минералов, которые образовались совместно с благородными металлами в пределах продуктивной Николаевской зоны золоторудного месторождения Пионер. Установление в изученной минерализации многочисленных минералов, как содержащих, так и не содержащих Au и Ag, но находящихся в тесных срастаниях друг с другом, свидетельствует о том, что золотосодержащие гидротермальные растворы имели сложный состав. Они включали в себя, в виде различных комплексов, целый ряд химических элементов, участвующих в рудообразовании – Au, Ag, Cu, Zn, Pb, Sb, Te, As, S, Fe, а также Al, Si, K, Ca, Mg, O, C, Hg, Mn.

Работа выполнена в рамках государственного задания Дальневосточного геологического института ДВО РАН (тема 3, номер гос. регистрации: 125033104605-6) и Института геологии и природопользования ДВО РАН (тема 122041800127-8).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Золоторудные месторождения России** / Под ред. М.М. Константинова. М.: Акварель, 2010. 349 с.

2. **Моисеенко Н.В., Сафронов П.П.** Au–Ag–Te минерализация в рудах месторождения Пионер // Геологические процессы в обстановке субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Материалы III-й Всероссийской конференции с международным участием ДВГИ ДВО РАН. Владивосток: Дальнаука, 2016. С. 347-350.

3. **Моисеенко Н.В., Сафронов П.П., Воропаева Е.Н.** Особенности самородного золота месторождения Пионер (Приамурье) // Естественные и технические науки. 2013. Т. 63. № 1. С. 136-139.

4. **Моисеенко Н.В., Сафронов П.П.** Особенности сурьмяной минерализации золоторудного месторождения Пионер // Материалы Всероссийской конференции «Рудообразующие процессы: от генетических концепций к прогнозу и открытию новых рудных провинций и месторождений». ИГЕМ РАН. Москва, 2013. С. 92-93.

5. **Сафронов П.П., Моисеенко Н.В.** Редкая находка самородного золота в рудах месторождения Пионер (Приамурье) // Материалы XVIII Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твёрдых тел. Черноголовка, 2013. С. 410-411.

6. **Сафронов П.П.** Метод аналитической растровой электронной микроскопии в различных применениях при изучении вещества. ДВГИ ДВО РАН. Владивосток, 2022. 216 с.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БЛЕКЛЫХ РУД ЗОЛОТО-СЕРЕБРЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЮЖНО-КАМЧАТСКОГО ГОРНОРУДНОГО РАЙОНА

Е.Д. Скильская, К.О. Шишканова, А.У. Бойко, А.В. Сергеева

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН,
г. Петропавловск-Камчатский,
e-mail: wideworldscience@gmail.com

Аннотация. В докладе обсуждаются условия образования минералов группы блеклые руды для объектов Южно-Камчатского горнорудного района – золото-серебро-полиметаллического месторождения Мутновское и золоторудного проявления Вилючинское. При изучении минералогии этих объектов были обнаружены общие сходства в составе их руд. Минералы группы блеклые руды представлены широким рядом разновидностей: от практически «чистых» теннантитов до сложных разновидностей, содержащих селен, индий, висмут и т.д. Все эти данные указывают на специфические условия формирования благороднометалльной минерализации Южной Камчатки.

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF TENNANTITE-TETRAHEDRITE GROUP MINERALS IN GOLD-SILVER MINERALIZATION IN THE SOUTH KAMCHATKA MINING REGION

E.D. Skilskaya, K.O. Shishkanova, A.U. Boiko, A.V. Sergeeva

Institute of Volcanology and Seismology FEB RAS,
Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: wideworldscience@gmail.com

Abstract. The report discusses the conditions for the formation of fahlores for objects in the South Kamchatka mining region – the Mutnovskoye gold-silver-polymetallic deposit and the Vilyuchinskoye gold deposit. When studying the mineralogy of these objects, common similarities in the composition of their ores were discovered. The minerals of the tennantite-tetrahedrite group are represented by a wide range of varieties: from practically «pure» tennantites to complex varieties, containing selenium, indium, bismuth, etc. All these data indicate on the specific conditions of the formation of the gold-silver mineralization of southern Kamchatka.

Блеклые руды — наиболее распространенные минералы класса сульфосолей, обладают сложным химическим составом и считаются надежными индикаторами процессов, регулирующих минералообразование. При этом, они являются источниками таких промышленно ценных компонентов, как медь, серебро и других элементов.

Золото-серебряные месторождения и рудопроявления Южно-Камчатского горнорудного района относятся к адуляр-серицитовым низкосернистым рудно-магматическим эпитермальным системам, образованным на этапе миоценового магматизма, проявившегося в форме внедрения многочисленных интрузий диоритов, кварцевых диоритов, диорит порфиритов [4]. В размещении месторождений наблюдается приуроченность к вулканическим кальдерам. Возраст рудных объектов, по данным [2, 4], меняется от 0.3 до 5.3 млн лет.

В непосредственной близости от изучаемых объектов располагаются действующие вулканы Мутновский и Горелый, в кратерах которых наблюдается современная фумарольная деятельность. Кроме того, на территории Южной Камчатки до сих пор продолжаются процессы рудообразования на некоторых золото-серебряных и геотермальных месторождениях.

Исследование направлено на изучение условий формирования золото-серебряной и полиметаллической минерализации в Южно-Камчатском горнорудном районе на основе изучения минералов группы блеклые руды.

Мутновское золото-серебро-полиметаллическое месторождение относится к крупнейшим рудным объектам южной Камчатки и располагается в кальдере Жировского палеовулкана в 18 км к югу от Мутновского вулкана. Жильные тела парагенетически ассоциируют с интрузивным массивом габбро-диоритов, занимающим центральную часть кальдеры Жировского палеовулкана. В пределах Мутновского месторождения установлено более 160 жил кварцевого, кварц-карбонатного и карбонатного составов, зон прожилкования, минерализованных зон дробления. По характеру размещения жильных зон выделяют Северный, Центральный и Южный фланги [4, 6, 7].

Блеклые руды в сульфидных рудах южного фланга Мутновского месторождения встречаются как в виде отдельных самостоятельных зерен, так и в виде сплошных масс. Часто находятся в срастании с халькопиритом, сфалеритом, пиритом и содержат мелкие вкрапления галенита. По данным электронно-зондового микроанализа выявлены теннантиты, тетраэдриты, голдфилдиты, при этом теннантиты пользуются значительным преобладанием в распространении. Также широко развиты смешанные блеклые руды. Отличительная особенность блеклых руд Мутновского месторождения — преобладание в их составе мышьяка и цинка.

Вилючинское золото-серебро-полиметаллическое рудопроявление находится в 25 км к северо-западу от месторождения Мутновское. Основные кварцево-жильные тела рудопроявления локализованы в толще туфов, прорванных субвулканическими интрузиями габбро-диоритов и дайками андезитов, дацитов. В пределах основной рудоносной зоны Вилючинская выделено порядка 35 кварцевых жил с неравномерным распределением рудных минералов [3, 4].

Блеклые руды Вилючинского рудопроявления представлены тремя минеральными видами — тетраэдрит, теннантит, голдфилдит, а также

межвидовыми — теннантит-тетраэдрит, голдфилдит-теннантит, тетраэдрит-голдфилдит и внутривидовыми — Ag-Zn-содержащий теннантит-тетраэдрит, In-содержащий теннантит, Se-содержащий голдфилдит разновидностями.

Согласно исследованиям [1, 5], блеклые руды — минералы сложного состава с высокой изоморфной ёмкостью, и поэтому могут служить индикаторами условий минералообразования, а также степени эрозионного среза. Изученные блеклые руды двух рудных объектов южной Камчатки имеют некоторые схожие черты, а именно: существенное преобладание теннантитов (вплоть до «чистых») над другими разновидностями, наличие редких минералов типа голдфилдита и аннивита, специфические элементы-примеси, такие как индий, висмут, селен. В докладе на основе полученных результатов обсуждаются условия формирования золото-серебряной и комплексной благороднометалльной минерализации Южно-Камчатского горнорудного района.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мозгова Н.Н., Цепин А.И.** Блеклые руды (особенности химического состава и свойств). М.: Наука, 1983. 216 с.

2. **Округин В.М.** О возрасте и генезисе эпитермальных месторождений зоны перехода континент-океан (Северо-западная Пацифика) // Материалы юбилейной сессии Камчатского центра ДВО РАН "Современный вулканизм и связанные с ним процессы". Петропавловск-Камчатский: Изд-во КГПУ, 2002. С. 106-108.

3. **Округин В.М., Шишканова К.О., Философова Т.М.** Новые данные о рудах Вилючинского золото-серебро-полиметаллического рудопроявления, Южная Камчатка // Руды и Металлы. 2017. № 1. С. 40-54.

4. **Петренко И.Д.** Золото-серебряная формация Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Изд-во Санкт-Петербургской картографической фабрики ВСЕГЕИ, 1999. 115 с.

5. **Спиридонов Э., Филимонов С., Куликова И. и др.** Минералы блеклых руд – индикаторы рудогенеза // Проблемы геологии рудных месторождений, минералогии, петрологии и геохимии. ИГЕМ РАН. Москва, 2008. С. 356-359.

6. **Шишканова К.О., Округин В.М., Философова Т.М.** Особенности минералогии руд южного фланга золото-серебро-полиметаллического месторождения Мутновское (Южная Камчатка) // Руды и Металлы. 2022. № 3. С. 78-100. https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10018.

7. **Takahashi R., Matsueda H., Okrugin V. et al.** Polimetallic and Au-Ag mineralization at the Mutnovskoe deposit in South Kamchatka // Resource Geology. 2006. V. 56. N 2. P. 141-156.

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ, ВОЗРАСТ И ПЕРСПЕКТИВЫ МОЛИБДЕНОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ОРЛИНОЕ КОРКОДОН-НАЯХАНСКОЙ РУДОНОСНОЙ ЗОНЫ (СЕВЕРО-ВОСТОК АЗИИ)

В.Ю. Соловьёв[1], В.В. Прийменко[1], Е.В. Старикова[2], А.М. Гагиева[1], Д.А. Рогов[2], А.Л. Коновалов[2], Т.Н. Сурин[2], А.В. Черкашин[2], А.И. Голубев[2]

[1]Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан, e-mail: priymenkovladimir@gmail.com

[2]Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (Институт Карпинского), г. Санкт-Петербург

Аннотация. Приводятся данные о геологическом строении рудного поля и вещественном составе руд молибденового месторождения Орлиное, принадлежащего Коркодон-Наяханской рудоносной зоне. Ставится вопрос о необходимости пересчёта запасов месторождения согласно современным кондициям. Обсуждается пространственная и временная связь рудоносного кварцевого штокверка месторождения с гранитоидами наяханского комплекса, для которых методом U-Pb (SHRIMP-II) датирования установлен коньяк-сантонский возраст – 86.1±1 млн лет. Предполагается, что месторождение Орлиное является продуктом (Au±) молибден-порфировой (типа Эндако) или (Au±) редкометалльной рудно-магматической системы, сформировавшейся около 86 млн лет назад.

GEOLOGICAL STRUCTURE, MATERIAL COMPOSITION, AGE AND PROSPECTS OF THE ORLINOYE MOLYBDENUM DEPOSIT OF THE KORKODON-NAYAHAN ORE-BEARING ZONE (NORTHEAST ASIA)

V.Yu. Soloviev[1], V.V. Priymenko[1], E.V. Starikova[2], A.M. Gagieva[1], D.A. Rogov[2], A.L. Konovalov[2], T.N. Surin[2], A.V. Cherkashin[2], A.I. Golubev[2]

[1]North-East Interdisciplinary Scientific and Research Institute named after N. A. Shilo FEB RAS, Magadan, e-mail: priymenkovladimir@gmail.com

[2]Federal State Budgetary Russian Scientific Research Geological Institute named after A.P. Karpinsky (Karpinsky Institute), St. Petersburg

Abstract. The article presents data on the geological structure of the ore field and the material composition of ores at the Orlinoye molybdenum deposit, which belongs to the Korkodon-Nayahan ore-bearing zone. The issue of the need to recalculate the deposit reserves according to modern conditions is raised. The spatial and temporal relationship of the ore-bearing quartz stockwork of the deposit with granitoids of the Nayakhan complex is discussed, for which the Coniacian-Santonian age of 86.1±1 million years was established by the U-Pb (SHRIMP-II) dating method. It is assumed that the Orlinoye deposit is a product of the (Au±) molybdenum-porphyry (Endako type) or (Au±) rare metal ore-magmatic system that formed about 86 million years ago.

Молибденовое месторождение Орлиное находится в границах Коркодон-Наяханской магматической зоны (КНМЗ), представляющей собой вытянутую в субмеридиональном направлении, ортогонально простиранию Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП), двухсоткилометровую (10-40 км шириной) цепочку гранитоидных интрузий и полей вулканитов [5]. Металлогеническим выражением КНМЗ является Коркодон-Наяханская золото-молибденовая рудоносная зона. Месторождение Орлиное принадлежит Верхнеомолонскому рудному узлу, расположенному в месте сочленения южной части КНМЗ и основной ветви ОЧВП.

Проявления золотого и молибденового оруденения генетически связаны с гранитоидными интрузиями позднемелового (габбро)гранодиорит-гранитового наяханского комплекса. В разное время месторождение Орлиное относилось к различным рудным формациям: молибден-порфировой [2] и молибденит-кварцевой [3]. При этом, в составе последней выделялся грейзеново-молибденитовый тип минерализации.

В 2024 году ФГБУ «Институт Карпинского» (г. Санкт-Петербург), при участии сотрудников СВКНИИ ДВО РАН (г. Магадан), начаты геолого-съемочные работы по доизучению листа P-57-XIV (ГДП-200), охватывающего южную часть КНМЗ и внешнюю зону Охотского сегмента ОЧВП. В задачи работ входила ревизия известных рудопроявлений и месторождений и уточнение их рудно-формационной принадлежности, в т.ч. рудного поля месторождения Орлиное.

Молибденовое и вольфрамовое оруденение Верхнеомолонского рудного узла было установлено в ходе выполнения комплексных геолого-поисковых и геолого-съемочных работ в бассейнах рек Эликчан, Ойчири, Наяхан (Фролов, 1953 г.; Сеньковский, 1953 г.). При проведении геолого-поисковых работ в верховьях Прав. Джеланджи и Ольчан было открыто месторождение Орлиное (Назарова, 1956 г.), для которого установлена генетическая связь с мелкозернистыми аплитовидными биотитовыми гранитами поздней фазы наяханского комплекса. Результатом разведки стало оконтуривание рудного тела с прожилково-вкрапленным оруденением и подсчет запасов (Охоткин,

1957 г.). Полученные средние содержания молибдена по подсчетным блокам варьировали от 0.2 до 0.27%, а суммарные запасы по категориям C_1-C_2 составили 435.5 т., на основании чего месторождение было отнесено к непромышленному, а его отработка признана нерентабельной. При этом, в подсчет запасов не входили пробы с содержанием ниже 0.2% молибдена (согласно принятым тогда кондициям) — 96% проанализированных проб. Это приводит авторов к выводу о необходимости пересчета запасов месторождения, исходя из современных кондиций. Для сравнения, в эксплуатируемых порфировых молибденовых месторождениях средние содержания молибдена колеблются от 0.07 до почти 0.3% [7].

Согласно фондовым материалам и полевым наблюдениям авторов, месторождение Орлиное представлено кварцевым штокверком площадью около 0.1 км^2 (800x150 м), вытянутым в северо-западном направлении. Вертикальный размах оруденения, прослеженный канавами и буровыми скважинами, составляет более 200 м. Мощность прожилков не превышает 10 см, молибденит составляет до 30% их состава и образует мелкочешуйчатую вкрапленность и гнездовые скопления до 5-8 см в поперечнике.

Месторождение локализовано в пределах многофазного гранитоидного массива Орлиный наяханского комплекса. Вмещающие массив позднетриасовые алевролиты интенсивно ороговикованы. Гранитоиды рудного поля представлены гранодиоритами, гранодиорит-порфирами, роговообманково-биотитовыми гранитами и гранит-порфирами, которые рассекаются аплитовидными биотитовыми лейкогранитами заключительной фазы. Гранитоиды характеризуются как известково-щелочные и относятся к островодужным, ильменитовой серии. Заключительное термальное событие рудного поля — образование гидротермального молибденового оруденения.

В гидротермальной системе Орлиного, согласно взаимоотношениям и их минеральным составам, развиваются несколько стадий прожилков: предрудные — кварц-биотитовые; гипогенные — полевошпат-кварцевые с молибденитом, кварцевые с вольфрамитом и молибденитом, кварцевые с теллуридно-висмутовой минерализацией (сульфосоли, сульфиды и сульфотеллуриды висмута и свинца), кварцевые с полиметаллической (халькопирит, галенит, сфалерит) минерализацией и карбонат-кварцевые, карбонат-хлоритовые прожилки, без видимой рудной минерализации, кроме пирита. Пирит образуется после вольфрамит-молибденитовой минерализации и имеет сквозной характер развития в поздних стадиях.

Отмечается околопрожилковая грейзенизация, ассоциирующая преимущественно с вольфрамит-молибденит-кварцевыми прожилками. Структура прожилков от мелко- до крупнокристаллической; преобладают тонкопрожилковые, редко брекчиевидные текстуры. В пределах штокверка по гранитоидам широко проявлены серицит-кварцевые изменения. Мощность интенсивно грейзенизированных (кварц-мусковитовые изменения) зальбандов

не превышает 10 см. Геохимический спектр оруденения (коэффициенты концентрации выше 1, в порядке уменьшения): Mo-Bi-W-Te-Se-As-Li-Sn-Cu-Ge-Pb-Au-Ag. Предполагается, что молибденовое оруденение месторождения Орлиное является продуктом единой гранитоидной рудно-магматической системы; соответственно, возраст молибденового оруденения оценивается материалами U-Pb (SHRIMP-II) датирования циркона из лейкогранитов наяханского комплекса, слагающих массив Орлиный — 86.1±1 млн лет, коньяк-сантон.

Установленные особенности геологического строения, вещественного состава руд и рудоносных гранитоидов месторождения Орлиное свидетельствуют о его принадлежности к молибден-порфировой рудно-магматической системе (тип Эндако, по классификации В.Д. Синклера [7]). В то же время, ряд признаков, таких как умеренно-кислый состав рудоносных гранитоидов, их соответствие ильменитовой серии и наличие в рудах Bi-Te-W ассоциации, сближает изученное месторождение с объектами золото-редкометалльной формации (RIRGS тип, по определению Дж.Р. Харта [6]). Последний вывод согласуется с присутствием в пределах Коркодон-Наяханской зоны Au-Bi рудопроявлений, ассоциирующих с гранитоидами наяханского комплекса (например, проявление Солнечное [4]). Возраст образования рудно-магматической системы, по данным авторов, около 86 млн лет, что сопоставимо с данными, полученными для рудопроявления Аксу центральной части Коркодон-Наяханской зоны [1]. Для уточнения рудно-формационной принадлежности и перспектив месторождения требуется дальнейшее углубленное изучение его генетических аспектов, таких как состав, окислительно-восстановительный и температурный режим рудообразующих флюидов, глубина и стадийность рудообразования, первичные изотопные соотношения и др. Необходима также переоценка запасов месторождения в современных кондициях, что может привести к их увеличению до параметров перспективного для освоения рудного объекта.

Исследования выполнены в ходе работ по Госзаданию ФГБУ «Институт Карпинского» на 2024-2025 гг. и при поддержке государственной темы ФГБУН СВКНИИ ДВО РАН: НИР «Разработка критериев рудоносности магматических комплексов» – № 124051600003-4.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акинин В.В., Колова Е.Е., Савва Н.Е., Горячев Н.А., Маматюсупов В.Т., Кузнецов В.М., Альшевский А.В., Ползуненков Г.О. Возраст гранитоидов и ассоциирующего молибден-порфирового оруденения Коркодоно-Наяханской зоны северо-востока России // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2019. № 4. С. 3-8.

2. Кузнецов В.М., Акинин В.В., Бяков А.С., Жуланова И.Л., Желебогло О.В., Бондаренко С.А., Гусев Е.А., Вопиловская О.А., Иванова В.В., Разуваева Е.И.,

Супруненко О.И., Усов А.Н., Алексеев Д.И., Беликова О.А., Шпикерман Е.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Верхояно-Колымская. Лист P-57 – Эвенск. Объяснительная записка // Минприроды России, Роснедра, ФГБУ «ВСЕГЕИ». СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2022. 519 с.

3. **Кузнецов В.М., Палымская З.А., Шашурина И.Т., Михайлова В.П., Кошкарев В.Л.** Металлогеническая карта Колымо-Омолонского региона. Масштаб 1:500 000. Объяснительная записка. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2001. 190 с.

4. **Соцкая О.Т., Михалицына Т.И., Савва Н.Е., Горячев Н.А., Маматюсупов В.Т., Семышев Ф.И., Малиновский М.А.** Рудно-метасоматическая зональность молибден-порфировой системы Аксу (Северо-Восток Азии) // Вестник Северо-Восточного научного центра ДВО РАН. 2021. № 3. С. 3-17.

5. **Терехов М.И., Лычагин П.П., Мерзляков В.М., Жуланова И.Л., Дылевский Е.Ф., Палымский Б.Ф.** Объяснительная записка к Геологической карте междуречья Сугоя, Коркодона, Омолона, Олоя, Гижиги масштаба 1:500 000. Магадан: СВКНИИ ДВНЦ АН СССР, 1984. 144 с.

6. **Hart C.J.R.** Reduced intrusion-related gold systems // Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Geol. Association Can. Mineral Deposits Division. Spec. Publ. 2007. V. 5. P. 95-112.

7. **Sinclair W.D.** Porphyry deposits // Mineral deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Geol. Association Can. Mineral Deposits Division. Spec. Publ. 2007. V. 5. P. 223-243.

МИНЕРАЛЫ — ИНДИКАТОРЫ ПРОИСХОЖДЕНИЯ РУД АЛБАЗИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

О.Т. Соцкая, В.Ю. Соловьёв, Н.А. Горячев

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан,
e-mail: sotskaya@neisri.ru; solovev@neisri.ru, goryachev@neisri.ru

Аннотация. Приведены новые данные по изучению минералогических особенностей руд Ольгинского участка золоторудного месторождения Албазинское. Главными минералами руд являются пирит и арсенопирит; пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит присутствуют в меньших количествах. Блёклая руда (Ag-тетраэдрит), минералы Ni и Co (герсдорфит и Ni-кобальтин), зёрна Cu-Zn-состава (латунь), бурнонит, самородное Au, акантит и аргентопирит встречаются гораздо реже. Установлена не совсем обычная последовательность формирования минеральных ассоциаций: ранний пирротин сменяется пирит-полисульфидной сереброносной ассоциацией, и завершается все отложением арсенопирита в ассоциации с минералами никеля и кобальта. Родственность и близкоодновременное формирование всех минералов фиксируется типоморфностью примесей As, Sb и Ni в их составе (частой встречаемостью As и Sb в пирите, As в тетраэдрите, Sb и Ni в арсенопирите). По минералам индикаторам и изотопным характеристикам серы сульфидов предполагается глубинный источник минерализации.

INDICATOR MINERALS OF THE ORIGIN OF ORES OF THE ALBAZINSKOE DEPOSIT

O.T. Sotskaya, V.Yu. Solov'ev, N.A. Goryachev

North East Interdisciplinary Scientific Research Institute n.a. Shilo N.A. FEB RAS, Magadan,
e-mail: sotskaya@neisri.ru, solovev@neisri.ru, goryachev@neisri.ru

Abstract. New data on the study of mineralogical features of the ores of the Olginsky section of the Albazinskoye gold deposit are presented. The main minerals of the ores are pyrite and arsenopyrite; pyrrhotite, chalcopyrite, sphalerite, galena are present in smaller quantities. Fahlore (Ag-tetrahedrite), Ni and Co minerals (gersdorffite and Ni-cobaltite), grains of Cu-Zn composition (brass), bournonite, native Au, acanthite and argentopyrite are much less common. An unusual sequence of formation of mineral associations has been established: early pyrrhotite is replaced by a pyrite-polysulfide silver-bearing association, and it ends with the deposition of arsenopyrite in association with nickel and cobalt minerals. The affinity and

near-simultaneous formation of all minerals is fixed by the typomorphism of As, Sb and Ni impurities in their composition (the frequent occurrence of As and Sb in pyrite, As in tetrahedrite, Sb and Ni in arsenopyrite). Based on indicator minerals and isotopic characteristics of sulfur sulfides, a deep source of mineralization is assumed.

Месторождение Албазинское является крупнейшим разрабатываемым ныне месторождением золота сульфидного вкрапленно-прожилкового типа в Хабаровском крае. Оно охарактеризовано в ряде работ [2, 5, 6, 7 и др.]. Нами рассмотрены минералогические особенности Ольгинского участка, расположенного восточнее отработанной Анфисинской зоны и приведены новые данные по изучению коллекции, собранной нами еще в 1990 г. при исследованиях на стадии поисково-оценочных работ, проведенных геологами Нижне-Амурской экспедиции под руководством А.Н. Курочкина. Эти данные дополняют первые результаты, которые были опубликованы в 2001 г. [2].

Оптические исследования аншлифов выполнены с помощью поляризационного микроскопа Axioplan Imaging. Данные по определению химического состава минералов получены на микроанализаторе Camebax с использованием ЭДС-детектора X-Max-50 Oxford Instruments, программное обеспечение AZtec (СВ ЦКП, СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан, аналитики – О. Т. Соцкая, В.Ю. Соловьёв). Локальный изотопный состав серы определен в Аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН (аналитики Т.А. Веливецкая и А.В. Игнатьев).

В результате проведённых исследований в рудах Ольгинского участка нами установлены пирит и арсенопирит — главные минералы; пирротин, халькопирит, сфалерит, галенит присутствуют в меньших количествах. Блёклая руда, минералы Ni и Co, зёрна Cu-Zn-состава (латунь), бурнонит, самородное Au, акантит и аргентопирит встречаются гораздо реже. Бурнонит также был отмечен нами ранее [2].

Основными минералами являются пирит (наиболее распространён) и арсенопирит. Пирит обычно образует россыпь кристаллов кубической формы, выполняет прожилки в породе и формирует агрегатные скопления, нередко замещённые гидроксидами железа. Также присутствуют агрегаты корродированных зёрен пирита. В пирите часто содержится примесь As от 0.36 до 5.93 мас. %, реже Sb — от 0.41 до 1.21 мас. %, отмечаются также примеси Ni — 0.51 – 1.96 мас. % и Co — до 1.18 мас. %, на что было указано ранее [3]. Арсенопирит является часто встречаемым минералом и наблюдается в виде рассеянной вкрапленности в породе, образует зернистые агрегаты совместно с пиритом, часто обрастает зёрна пирита, а также формирует скопления звёздчатых сростков кристаллов, часто с пиритом в центре. Форма выделений арсенопирита — ромбические, клиновидные, палочковидные и короткопризматические кристаллы. Для арсенопирита характерна постоянная невысокая примесь Sb (0.46 – 2.30 мас. %), на что ранее было уже указано [2].

С пиритом тесно ассоциируют сульфиды полиметаллов. Сфалерит (клейофан) формирует ксеноморфные зёрна размером до 35 мкм в мусковите/сериците. В сфалерите часто содержатся мельчайшие включения халькопирита, чем и объясняется присутствие Cu в его составе. Пирротин образует самостоятельные ксеноморфные зёрна с пиритовыми прожилками и с зернами арсенопирита, нарастающими на него, также присутствует в виде включений в халькопирите. Галенит встречается довольно редко и присутствует в виде включений размером до 100 мкм в пирите, халькопирите и арсенопирите, иногда совместно с бурнонитом и сфалеритом. Размер зёрен бурнонита достигает 150 мкм. Халькопирит встречается в виде самостоятельных ксеноморфных зёрен размером до 15 мкм, образует эмульсионную вкрапленность в сфалерите, а также реликты в сростках с арсенопиритом.

Особое место в рудах занимают минералы Ni и Co, которые представлены герсдорфитом и фазами кобальтин-герсдорфитового состава (Ni-кобальтин). Герсдорфит образует микровключения размером до 10 мкм, ассоциирующие с арсенопиритом в агрегате пирита. По данным рентгеноспектрального энергодисперсионного микроанализа, примесь Co в герсдорфите колеблется от 3.6 до 7.4, составляя в среднем 5.73 мас. %. Герсдорфит в срастании с Ni-кобальтином (размер 50*12 мкм) иногда образуют самостоятельные выделения промежуточного ряда системы герсдорфит–кобальтин в кварце. При этом в Ni-кобальтине содержание Co колеблется от 17.24 до 21.5 мас. %, а концентрация Ni составляет 12.23 – 16.86 мас. %. По картам распределения в лучах элементов максимальные содержания Co и Ni часто не совпадают. И в Ni-кобальтине, и в герсдорфите присутствуют повышенные содержания примеси Fe, составляя в среднем 5.29 и 7.92 мас. % соответственно, а примесь Sb не превышает 2.71 мас. %.

Минералы серебра представлены блёклой рудой (Ag-тетраэдрит), акантитом и аргентопиритом, встречающиеся довольно редко. Блёклая руда по составу относится к серебросодержащему тетраэдриту (среднее по 15 измерениям), в мас. %: Ag – 3.74 (при колебаниях от 0 до 8.4); Cu – 34.60; Sb – 26.30; Fe – 2.85; Zn – 5.49; As – 2.09; S – 25.09 и наблюдается в срастании с пиритом, халькопиритом и сфалеритом, образующих гнёзда размером 25–60 мкм в гидромусковите/сериците (иллите). Размер выделений тертаэдрита в сростках с сульфидами не превышает 25 мкм. Кроме того, отмечаются микронные (3-6 мкм) включения тетраэдрита во вмещающей породе. Акантит встречается в виде ксеноморфных срастаний с Ag-тетраэдритом в кварце, с размером выделений до 40 мкм. Химический состав отличается от стехиометрического наличием примесей меди (до 5 мас. %) и мышьяка (до 1.5 мас. %). Аргентопирит образует мельчайшие (0.5 – 8 мкм) микровключения в мышьяковистом пирите (примесь As колеблется от 0.62 до 3.92 мас. %) и имеет неоднородный состав с колебаниями содержания Ag от нескольких

процентов до 26.91 мас. %. В составе аргентопирита иногда присутствует As (от 0.46 до 1.52 мас. %).

Самородное золото найдено в виде включений в арсенопирите. Размер золотин не превышает 50 мкм. Пробность варьирует от 634 до 840‰ (данные по 6-ти зёрнам).

В двух аншлифах обнаружена CuZn-фаза (латунь), образующая микровключения размером 3–4 мкм в кварце. Содержание Cu колеблется от 89.09 до 91.70 мас. %, а Zn – от 8.30 до 10.91 мас. %.

С рудными минералами тесно ассоциируют гидромусковит-серицит, альбит, калишпат, эпидот, а также рутил, фтор-апатит и анкерит.

Таким образом, устанавливается следующая, не совсем обычная, последовательность формирования минеральных ассоциаций. Ранний пирротин сменяется пирит-полисульфидной сереброносной ассоциацией, и завершается все отложением арсенопирита в ассоциации с минералами никеля и кобальта. Родственность и близкоодновременное формирование всех минералов фиксируется типоморфностью примесей As, Sb и Ni в их составе (частой встречаемостью As и Sb в пирите, As в тетраэдрите, Sb и Ni в арсенопирите).

Широкое присутствие примеси Sb в арсенопирите свидетельствует о малоглубинных условиях формирования изученных руд [1] и, возможно, относительно невысоких температурах образования характерных для близповерхностных золоторудных объектов Нижнего Приамурья [4]. В то же время, составы ассоциирующих пирита и арсенопирита указывают на среднетемпературный интервал формирования руд. Присутствие серебросодержащих минералов (тетраэдрит с Ag до 8.4 мас. % и аргентопирит с неравномерным содержанием Ag до 26.91 мас. %) также сближает рассматриваемое оруденение с малоглубинным золото-серебряным, что позволило сделать ранее предположение о том, что мы имеем дело с корнями крупной эпитермальной системы [2]. Однако наличие латуни и минералов Ni и Co (герсдорфит и Ni-кобальтин), наряду с нашими данными по изотопному составу серы пирита и арсенопирита ($\delta^{34}S_{VCDT}$ -2.5 ÷ +0.5‰; $\delta^{33}S_{VCDT}$ -1.3 ÷ 0.3‰) и материалами других исследователей [3, 7], указывают на глубинный источник рудного вещества и позволяют предполагать восстановленность флюидов.

Работа выполнена в рамках проекта РНФ № 23-47-00064.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гамянин Г.Н., Горячев Н.А. Близповерхностное оруденение Восточной Якутии // Тихоокеанская геология. 1988. № 2. С. 88-94.

2. Горячев Н.А., Савва Н.Е. Албазино – пример глубоко эродированного эпитермального золото-серебряного месторождения (Нижнее Приамурье) // Геологическая и минерагеническая корреляция в сопредельных районах России,

Китая и Монголии. Материалы IV международного симпозиума. Россия. Чита: ЧИПР СО РАН, Комитет природных ресурсов по Читинской области, 2001. С. 106-107.

3. **Гребенникова А.А., Горячев Н.А.** Сульфоарсениды месторождения Албазинское (Монголо-Охотский орогенный пояс) // Материалы VI Всероссийской конференции с международным участием "Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит". / ДВГИ ДВО РАН. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2023. С. 384-387.

4. **Иванов В. В.** Самородное золото разнотипных малоглубинных месторождений Нижнего Приамурья // Самородные элементы рудных месторождений Тихоокеанской окраины Азии. Владивосток: ДВО РАН, 1989. С. 153–173.

5. **Кемкина Р.А., Кемкин И.В., Ханчук А.И., Иванов В.В.** Первая находка минералов редкометальных элементов на Албазинском золоторудном месторождении // Докл. АН. 2018. Т. 481. № 3. С. 300-304.

6. **Трушин С.И., Кириллов В.Е., Буханова В.Е., Чубаров В.М.** Минералогические особенности золотых руд Албазинского и Ульбанского рудных районов (Хабаровский край) // Региональная геология и металлогения. 2019. № 78. С. 91-97.

7. **Трушин С.И., Кириллов В.Е., Иванов А.И., Иванов В.В.** Новые данные по геологии и золотому оруденению месторождения Албазино (Хабаровский край) // Материалы XIV Международной научно-практической конференции «Геология, прогноз, поиски и оценка месторождений алмазов, благородных и цветных металлов». М.: ЦНИГРИ, 2025. С. 423-426.

МИНЕРАЛОГИЯ ПОЛИХРОННОГО ЗОЛОТОРУДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ МАРИНСКОЕ (ЮЖНОЕ ВЕРХОЯНЬЕ)

Я.А. Тарасов[1,2,3], В.Ю. Фридовский[1], Л.И. Полуфунтикова[1], М.В. Кудрин[1]

[1]Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск,e-mail: t.yaroslav_96@mail.ru

[2]Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт им. Н.А. Шило ДВО РАН, г. Магадан

[3]Новосибирский государственный университет, г. Новосибирск

Аннотация. Приводятся результаты минералого-геохимического анализа разновозрастных руд орогенного золоторудного месторождения Маринское Аллах-Юньской зоны Охотско-Корякского орогенного пояса, формирование которых связано с одним позднеюрско-раннемеловым аккреционным событием.

MINERALOGY OF THE MARINSKOYEPOLYCHRONOUS GOLD DEPOSIT (SOUTHERN VERKHOYANSK)

Ya.A. Tarasov[1,2,3], V.Yu. Fridovsky[1], L.I. Polufuntikova[1], M.V. Kudrin[1]

[1]Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: t.yaroslav_96@mail.ru

[2]N.A. Shilo North-East Interdisciplinary Scientific Research Institute FEB RAS, Magadan

[3]Novosibirsk State University, Novosibirsk

Abstract. The results of a mineralogical and geochemical analysis of ores of different age from the Marinskoye orogenic gold deposit of the Allakh-Yun zone of the Okhotsk-Koryak orogenic belt, which formation is associated with theLate Jurassic-Early Cretaceous accretion event are presented

В тылу Удско-Мургальской вулкано-плутонической дуги в Аллах-Юньской зоне Охотско-Корякского орогена развиты позднеюрские и аптские золоторудные месторождения, связанные с двумя дискретными тектоно-термальными событиями [3, 4]. Позднеюрские раннеорогенные месторождения с согласными и секущими стратифицированными жилами контролируются пластическими деформациями шеар-зон и сопровождаются ранним зеленосланцевым

дислокационным метаморфизмом (Булар, Оночолах, Хотунское, Дуэт, Юр и др.). Позднеорогенные месторождения (Нежданинское, Задержнинское, Лазурное и другие) формировались в апте субсинхронно с крупными надсубдукционными гранитоидными массивами и поздним дислокационным метаморфизмом. На месторождении Маринское совмещена ранне- и позднеорогенная золоторудная минерализация, что позволяет изучить общие и специфические черты минералого-химического состава разновозрастных руд, связанных с одним позднеюрско-раннемеловым аккреционным событием на восточной конвергентной окраине Сибирского кратона.

В кварц-карбонат-серицитовых метасоматитах раннеорогенных согласных и продольно-секущих жил проявлена вкрапленность пирита-3.1 кубического габитуса, размером до 5 мм (пиритовая метасоматическая ассоциация). Для пирита-3.1 типичны дефицит S, повышенные концентрации As до 2.0 мас. %. Наряду с типоморфными элементами-примесями (Co, Ni, Pb, Cu, Zn) характерна примесь золота-1 (до 5.1 г/т), равномерно распределенная в объеме кристаллов, что, возможно, указывает на его структурно-связанную форму. *Жильная арсенопирит-пирит-серицит-кварцевая ассоциация* представлена серым, средне- и крупнозернистым кварцем-1 с гнездовидными агрегатами (до 20 мм) арсенопирита-1 и редкой вкрапленностью кубического пирита-3.2. Мелкочешуйчатые агрегаты серицита заполняют межзерновое пространство. Химический состав пирита-3.2 отличается от состава метасоматического пирита-3.1. Содержание As в пирите-3.2 не превышает 0.7 мас. %, Au до 2.4 г/т. Среди типоморфных элементов-примесей уменьшается концентрация Co и Cu и повышается Ni, Pb и Zn (табл. 1). Ранние стадии минералообразования завершаются формированием катакластических текстур.

Таблица 1. Средние содержания элементов-примесей в рудных минералах месторождения Маринское, по данным ЛА-ИСП-МС, г/т

Table 1. Average contents of trace elements in ore minerals of the Marinskoye deposit, according to LA-ICP-MS data, g/t

Минерал	Co	Ni	Pb	Zn	Cu	Sb	Se	Te	Bi	Cd	Hg	Au	Ag
Py-3.1, n=13	203.1	77.8	25.7	6.1	38.9	2.5	36.6	0.5	0.9	-	0.2	3.4	1.0
Py-3.2, n=13	26.2	386.4	483.9	153.1	4.2	3.9	22.1	0.5	0.5	1.9	0.3	0.3	2.5
Py-4.1, n=15	110.2	219.6	9.3	17.2	18.7	4.1	6.1	0.3	0.4	0.1	0.4	0.2	0.6
Py-4.2, n=10	39.4	70.3	73.5	102.4	11.4	25.1	14.5	2.4	0.6	10.5	1.1	2.1	4.8
Apy, n=11	2955	348.2	263.1	102.2	44.9	96.3	93.9	358.9	0.3	3.5	0.9	1.3	4.9
Gn-1, n=5	-	0.7	-	1.4	6.2	2320	974.2	26.9	1799	269.9	0.3	-	2645
Gn-2, n=5	-	1.2	-	2.2	87.0	2413	926.0	21.5	1796	57.6	-	-	3224
Sp, n=10	23.6	0.8	1.5	-	34.5	0.7	8.5	-	-	8667	117.1	-	2.3

Примечание: n – количество анализов.

Минералы *золото-полисульфидно-кварцевой ассоциации* заполняют трещины и дефекты в ранних минералах. Галенит-1, пирротин и самородное золото-2 образуют аллотриоморфные включения, заполняют трещины и формируют редкие гнездовидные агрегаты в кварце и ранних сульфидах. Для пирротина характерна примесь Ni (до 0.8 мас. %). В галените-1 кроме типоморфных примесей Bi, Sb, Ag, Se, Cd и Cu, установлена микропримесь Te. Золото-2, низкопробное (от 657 до 783‰), помимо Ag в нем также установлены примеси Hg (до 0.08 мас. %) и Cu (до 0.03 мас. %). Размер золотин достигает ~2 мм. В завершении раннеорогенного этапа минералообразования формируется поздняя *буланжерит-Fe-доломитовая ассоциация*. Fe-доломит образует гнездовидные агрегаты, а буланжерит формирует включения в галените-1, размером до 30 мкм.

В околорудных метасоматитах позднеорогенных поперечных кварц-карбонатных жил прожилково-вкрапленные текстуры формируют кварц-3 и пирит-4.1 (*пирит-кварцевая ассоциация*). Кварц-3 белого цвета, мелко- и среднезернистый с гребенчатой структурой. Кристаллы пирита-4.1 пентагондодекаэдрического габитуса размером до ~5 мм. Химический состав пирита-4.1 отличается от пирита-3.1 большей вариативностью концентраций элементов-примесей и пониженным содержанием Au (до 0.6 г/т). Поперечные жилы сложены массивным средне- и крупнозернистым кварцем-4 с гипидиоморфной структурой и вторичной текстурой брекчирования и катаклаза. В центральных частях жил наблюдается друзовидный кварц, в призальбандовых частях — скопления пирита-4.2 (*пирит-серицит-кварцевая жильная ассоциация*). Для пирита-4.2 характерны низкие содержания As (до 0.3 мас.%) и повышенные концентрации Au (до 19 г/т). Минералы *золото-полисульфидно-кварцевой ассоциации* формируют гнезда галенит-сфалерит-халькопиритового состава размером до ~10х15 мм с аллотриоморфными включениями самородного золота-3. Белый, мелко- и среднезернистый кварц-5 цементирует трещины в жильном кварце и в ранних сульфидах. Золото-3 низкопробное (от 601 до 719‰), с примесями Hg (до 0.13 мас. %) и Cu (до 0.03 мас.%). В галените-2, как и в раннем галените-1, установлены микропримеси Ag, Sb, Bi, Se, Cd и Te. Для галенита-2 характерны повышенные содержания Cu (табл. 1), а для халькопирита отмечаются Zn до 3.8 мас. %.

Сульфосольно-карбонатная ассоциация представлена редкими включениями сульфосолей Ag в галените-2, редко пирите-4.1 и 4.2, а также электрума в золоте-2. Проявлены микроагрегаты (до 50 мкм) сульфосолей серебра — аргентотетраэдрит, фрейеслебенит, диафорит и стефанит. В микропросечках золота-2 развивается электрум (405 – 595‰) с примесью Hg (до 0.35мас. %) и Cu (до 0.02 мас. %). Карбонаты образуют гнездовидные и редкие аллотриоморфные агрегаты.

Исследование показали наличие поздней *теллуридной ассоциации*. Теллуриды Au и Ag представлены петцитом, креннеритом, кервеллеитом,

гёсситом и бенлеонардитом. Их овальные и каплевидные включения достигают размера до 80 мкм в галените-1, редко в пирите-3.2 и арсенопирите-1.

Проведенные исследования показали, что проявленные на месторождении Маринское два этапа минералообразования характеризуются различным минеральным составом, возможно, связанными с эволюцией глубинных рудообразующих систем [5]. Специфика позднеюрского раннеорогенного этапа заключается в наличии в околорудных метасоматитах вкрапленности пирита с примесью структурно-связанного золота, в согласных и продольно-секущих жилах гнезд Fe-доломита, арсенопирита и сульфосольной минерализации. Для позднеорогенного этапа (аптский век раннего мела) характерны развитие в околорудных метасоматитах и в призальбандовых частях поперечных кварц-карбонатных жил, вкрапленность пирита пентагондодекаэдрического габитуса, присутствие включений низкопробного золота, электрума и сульфосолей серебра в пирите-4.2 и галените-2. В завершении этого этапа формировалась Au-Ag-Te минерализация, характерная для раннемелового золотого оруденения восточного фланга Яно-Колымского орогенного пояса [2] и Аллах-Юньской зоны Охотско-Корякского орогенного пояса [1].

Пробоподготовка и аналитические работы выполнены по плану НИР ИГАБМ СО РАН (проект FUFG-2024-0006),минералогические исследования проведены при поддержке гранта РНФ (№ 23-47-00064), геохимические исследования проведены при поддержке гранта РНФ (№ 24-17-00057).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Анисимова Г.С., Кардратьева Л.А., Кардашевская В.Н., Мустафин С.К.** Особенности золото-серебро-висмут-теллуровой минерализации Аллах-Юньской металлогенической зоны (Северо-Восток России) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2021. Т. 26. № 3. С. 5-30.

2. **Горячев Н.А., Соцкая О.Т., Горячев И.Н., Михалицына Т.И.** Минералого-геохимические особенности раннемелового золотого оруденения восточного фланга Яно-Колымского орогенного пояса (Магаданская область, Россия) // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 6. С. 80-95.

3. **Фридовский В.Ю., Гамянин Г.Н., Горячев Н.А.** Геолого-генетическая модель формирования стратифицированных золотокварцевых месторождений Южного Верхоянья // Отечественная геология. 2006. № 5. С. 33-37.

4. **Fridovsky V.Yu., Tarasov Ya.A, Polufuntikova L.I., Kudrin M.V.** The Role of Multi Stage Deformations in the Formation of the Aptian Orogenic Gold Mineralization of the Allakh-Yun Zone of the Okhotsk–Koryak Belt by the Example of the Marinskoye Deposit // Doklady Earth Sciences. 2025. V. 520. N 18. P. 18-25.

5. **Goryachev N.A, Fridovsky V.Yu.** Overview of early cretaceous gold mineralization in the orogenic belt of the eastern margin of the Siberian craton: geological and genetic features // Frontiers in Earth Science. 2024. V. 11. P. 1252729.

РЕКОНСТРУКЦИЯ ЭТАПОВ ФОРМИРОВАНИЯ КАРКАСА РАЗРЫВНЫХ НАРУШЕНИЙ СТРЕЛЬЦОВСКОГО РУДНОГО ПОЛЯ НА ОСНОВЕ ТЕКТОНОФИЗИЧЕСКОГО ПОДХОДА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛОКАЛИЗАЦИИ УРАНОВЫХ РУД И ПРОГНОЗА ПЕРСПЕКТИВНЫХ УЧАСТКОВ

С.А. Устинов[1], И.С. Тубольцев[1,2], В.А. Петров[1], В.А. Минаев[1]

[1]Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, e-mail: stevesa@mail.ru

[2]Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, г. Москва, e-mail: tubolcev@vims-geo.ru

Аннотация. Для Стрельцовского рудного поля, расположенного в Краснокаменском районе Забайкальского края и включающего 19 молибден-урановых жильно-штокверковых месторождений проведён тектонофизический анализ каркаса разрывных нарушений. Это позволило реконструировать кинематику разрывных структур с учетом возможных параметров поля напряжений-деформаций, а также этапы их эволюции от палеозойского времени до формирования кальдеры и основного рудообразующего процесса в позднем мезозое. Первый этап тектогенеза отвечает периоду аккреции террейнов к Сибирскому кратону. Второй этап связан с началом тектономагматической активизации в регионе и формированием кальдеры в узле сочленения глубинных северо-восточных разломов и активизированных северо-западных структур. Третий этап отражает заложение многочисленных субмеридиональных систем разломов и характеризует наибольшую интенсивность рудообразующего процесса. Визуализация гидравлически активных сегментов разрывов на установленном рудном этапе позволила выявить области, перспективные для постановки дальнейших поисково-оценочных работ в пределах рудного поля.

RECONSTRUCTION OF THE STAGES OF FORMATION OF THE FRAMEWORK OF FAULTS OF THE STRELTSOVSKY ORE FIELD BASED ON THE TECTONOPHYSICAL APPROACH TO IDENTIFY THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF THE LOCALIZATION OF URANIUM ORES AND FORECAST PROMISING AREAS

S.A. Ustinov[1], I.S. Tuboltsev[1,2], V.A. Petrov[1], V.A. Minaev[1]

[1]Institute of Geology of Ore Deposits, Petrography, Mineralogy and Geochemistry RAS, Moscow, e-mail: stevesa@mail.ru

[2]All-Russian Research Institute of Mineral Raw Materials
n.a. N.M. Fedorovsky, Moscow,
e-mail: tubolcev@vims-geo.ru

Abstract. A tectonophysical analysis of the fault framework was performed for the Streltsovskoye ore field located in the Krasnokamensk district of the Transbaikal area and including 19 molybdenum-uranium vein-stockwork deposits. This made it possible to reconstruct the kinematics of fault structures taking into account possible parameters of the stress-strain field, as well as the stages of their evolution from the Paleozoic to the formation of the caldera and the main ore-forming process in the Late Mesozoic. The first stage of tectogenesis corresponds to the period of accretion of terranes to the Siberian craton. The second stage is associated with the onset of tectonomagmatic activation in the region and the formation of a caldera at the junction of deep northeastern faults and activated northwestern structures. The third stage reflects the formation of numerous submeridional fault systems and characterizes the greatest intensity of the ore-forming process. Visualization of hydraulically active fracture segments at the established ore stage made it possible to identify areas that are promising for further exploration and evaluation work within the ore field.

Стрельцовское рудное поле (СРП), расположенное в Краснокаменском районе Забайкальского края, включает 19 молибден-урановых жильно-штокверковых месторождений с общими остаточными запасами урана около 140 тыс. тонн и в настоящее время является основным поставщиком урана для обеспечения нужд атомной промышленности страны. Проблема восполнения ресурсов СРП, как объекта с налаженной инфраструктурой и полным производственным циклом от добываемой руды до конечного продукта (концентрата), по мере отработки месторождений, приобретает особую актуальность.

Месторождения СРП сосредоточены в пределах одноименной кальдеры площадью около 140 км^2. Кальдера сформировалась в восточной части Тулукуевской впадины в завершающие этапы позднемезозойской тектономагматической активизации в результате обрушения блока, расположенного над близповерхностной магматической камерой, в связи с извержением из нее кислых расплавов [1]. По современным представлениям и по данным проведенных геолого-геофизических работ, четкие границы рудного поля не определены до сих пор. На основе анализа гравитационного поля сделан вывод о том, что к северу кольцевые разломы кальдеры расходятся, а общая форма структуры соответствует «песочным часам» [6]. Единичные скважины, пробуренные на севере в районе месторождения Полевое, погребенного под нижнемеловыми осадками, вскрыли разрез образований нижнего вулканогенного этажа, включая дациты и фельзиты [2]. Несмотря на

это, изученность северной площади в полном разрезе до кристаллического фундамента остается исключительно слабой.

Большинство месторождений сосредоточено в пределах Аргунской тектонически ослабленной зоны в Восточном и Западном блоках, и лишь небольшие запасы металла локализованы в Северном блоке в зоне Меридионального разлома. Рудные залежи обнаружены как в осадочно-вулканогенных породах верхнего структурного этажа, так и в породах нижнего структурного этажа в гранитоидном фундаменте. Совмещение в едином геологическом пространстве рудоподводящих, рудоконтролирующих и рудовмещающих структурных элементов, сквозных разломов и экранирующих поверхностей создавало благоприятные гидродинамические и обусловленные ими физико-химические условия в области рудоотложения, что явилось важнейшим фактором формирования крупных месторождений СРП [1].

При этом, существующие представления об этапности формирования и активизации обозначенных разрывных структур в зависимости от параметров поля напряжений- деформаций (ПНД) на период рудоотложения [3, 4] нуждаются в дополнительной верификации и визуализации в виде наглядных схем и структурно-тектонических моделей с целью выявления перспективных участков для постановки дальнейших поисково-оценочных работ. Различные сегменты закартированных в результате геологоразведочных работ разрывных зон на протяжении всей геологической истории имеют разное время заложения, активизации и реактивации, а также характеризовались наибольшей гидравлической активностью в определенный период, в зависимости от параметров действовавшего ПНД, и могли находиться в различных геодинамических обстановках от сжатия до растяжения, значительно влиявших на условия миграции флюидов. Следовательно, для реконструкции этих обстановок необходимо выявить ориентировки главных осей напряжений и кинематический тип каждой структуры в период их заложения или активизации.

Данная задача в представляемом исследовании решена на основе авторского подхода с использованием модели сдвига П.Л. Хэнкока, в которой приводится наиболее полная сводная схема рядов первичных и вторичных оперяющих структур, наблюдаемых в зонах сдвига до образования магистрального разрыва и после его формирования [7]. Рассматриваемая модель лежит в основе программного обеспечения «Lineament Stress Calculator» (автор А.Д. Свечеревский, ИГЕМ РАН), которое применялось для тектонофизической интерпретации закартированных разрывных структур в пределах СРП [2]. Такой подход позволил реконструировать кинематику разломов с учетом возможных параметров ПНД, а также этапы их эволюции от палеозойского времени до формирования кальдеры и основного рудообразующего процесса в позднем мезозое. Первый этап характеризуется субширотным сжатием и, наиболее вероятно, отвечает периоду аккреции террейнов к Сибирскому

кратону, до формирования кальдеры. Магистральными структурами являлись глубинные северо-восточные разломы, маркирующие аккреционные швы и функционировавшие как правые сдвиги. Меньшее развитие получили структуры северо-западного простирания, которые являлись первичными антитетическими (левыми) сдвигами по отношению к основным разломам.

Второй этап тектогенеза зафиксирован по инверсии главных осей ПНД, что привело к более мощному развитию северо-западных разломов, которые активизировались уже как правые сдвиги. Данный этап связан с началом тектономагматической активизации в регионе и формированием кальдеры в узле сочленения глубинных северо-восточных разломов, заложенных на предыдущем этапе, и активизированных северо-западных структур. В том числе, данный период знаменует начало рудного процесса. Данный вывод подтверждается приуроченностью отдельных крупных рудных тел к мощным разломным зонам северо-западного простирания, разделяющим кальдеру на блоки.

Третий этап связан с заложением многочисленных субмеридиональных систем разломов и характеризует наибольшую интенсивность рудообразующего процесса. К данным структурам приурочено большинство рудных тел СРП. Установленная ориентировка оси сжатия имела северо-западное простирание, что определило развитие субмеридиональных структур как левых сдвигов. Данная ситуация коррелирует с результатами, полученными в рамках более ранних исследований при тектонофизической интерпретации микро- и макротрещинноватости в образцах пород и горных выработках на месторождении Антей с помощью классических [3] и микроструктурных [5] методов.

На основе расчёта коэффициента тенденции к сдвигу с учетом установленных параметров выявленных этапов тектогенеза созданы схемы плотности гидравлически активных сегментов закартированных разрывных структур. Для параметров ПНД третьего этапа проекции рудных тел СРП в большей степени отвечают положению пространственных максимумов гидравлически активных зон, что также подтверждает вывод о наибольшей связи данного этапа с процессом рудообразования. Помимо известных рудных тел, в результате визуализации гидравлически активных сегментов разрывов на рассматриваемом этапе тектогенеза удалось выявить области, которые могут быть рекомендованы в качестве перспективных для постановки дальнейших поисково-оценочных работ в пределах СРП, что поспособствует наращиванию минерально-сырьевой базы урана ПАО «ППГХО», занимающегося отработкой месторождений рудного поля.

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИГЕМ РАН.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ищукова Л.П., Авдеев Б.В., Губкин Г.Н., Игошин Ю.А., Макушин М.Ф., и др.** Геология Урулюнгуевского рудного района и молибден-урановых месторождений Стрельцовского рудного поля. М.: Геоинформмарк, 1998. 382 с.

2. **Ищукова Л.П., Модников И.С., Сычев И.В. и др.** Урановые месторождения Стрельцовского рудного поля в Забайкалье. Иркутск: Геологоразведка, 2007. 260 с.

3. **Петров В.А. Полуэктов В.В., Насимов Р.М., Щукин С.И., Хаммер Й.** Природные и техногенные изменения напряженно-деформированного состояния пород на урановом месторождении в гранитах // Физика Земли. 2009. № 11. С. 86-93.

4. **Петров В.А., Андреева О.В., Полуэктов В.В.** Характер магматизма, гидротермально-метасоматических и фильтрационно-транспортных процессов в урановосных вулканогенных структурах // Вулканология и сейсмология. 2023. № 5. С. 3-25.

5. **Устинов С.А., Петров В.А., Полуэктов В.В.** Использование планарных систем флюидных включений в структурно-геологических исследованиях гидротермальных месторождений (на примере месторождения Антей) // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2014. № 1. С. 36-41.

6. **Шумилин М.В.** О возможности новых крупных открытий в Стрельцовском рудном поле // Геология рудных месторождений. 2007. Т. 49. № 5. С. 471-473.

7. **Hancock P.L.** Brittle microtectonics: principles and practice // Journal of Structural Geology. 1985. V. 7. N 3/4. P. 437-457.

ГРАФИТ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МИНЕРАЛЫ ПИКРИТОВ АРИАДНЕНСКОГО МАССИВА УЛЬТРАБАЗИТ-БАЗИТОВ (ПРИМОРЬЕ)

А.И. Ханчук, В.П. Молчанов, А.Н. Голич, Д.В. Андросов

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: vpmol@mail.ru

Аннотация. На юге Дальнего Востока России в пределах Сихотэ-Алинского орогенного пояса выявлены металлоносные (титан, золото, платина и др.) позднемезозойские интрузии ультрабазит-базитов. Во внешнем контуре одной из них, Ариадненской, установлены дайки флюидоэксплозивных брекчий щелочных пикритов, характеризующиеся довольно высокой степенью углеродизации и обогащением редкоземельными элементами (РЗЭ), а также Ba, Sr, Zr, V, Cr, Nb, Zn. Наиболее распространёнными минералами-концентраторами РЗЭ являются монацит-(Ce) и лукасит-(Ce). Суммарное содержание лантаноидов, среди которых доминируют легкие РЗЭ, изменяется синхронно с концентрацией углеродистого вещества в виде графита. Изотопно-углеродные исследования свидетельствуют об участии в формировании графит-редкоземельной минерализации мантийных и коровых процессов. Предполагается, что ассоциация графита с минералами РЗЭ может служить в качестве одного из индикаторов при прогнозной оценке общего рудного потенциала ультраосновного магматизма.

GRAPHITE AND RARE EARTH MINERALS OF PICRITES OF THE ARIADNE ULTRABASITE-BASITE MASSIF (PRIMORYE)

A.I. Khanchuk, V.P. Molchanov, A.N. Golich, D.V. Androsov

Far East Geological Institute of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences,Vladivostok, e-mail: vpmol@mail.ru

Abstract. In the south of the Russian Far East, metalliferous (titanium, gold, platinum, etc.) Late Mesozoic intrusions of ultrabasic basiteshave been identified within the Sikhote-Alin orogenic belt. In the outer contour of one of them, the Ariadna dike, there are dikes of fluidoexplosivebreccias of alkaline picrites, characterized by a fairly high degree of carbonation and enrichment with rare earth elements (REE), as well as Ba, Sr, Zr, V, Cr, Nb, Zn. The most common minerals concentrating REE are monazite-(Ce) and lucasite-(Ce). The total content of lanthanides, dominated by light REE, varies synchronously with the concentration of carbonaceous matter in the form of graphite. Isotope-carbon studies indicate the involvement of mantle and crustal processes in the formation of graphite-rare earth mineralization. It is assumed that the association of graphite with REE minerals can serve as one of

the indicators in the predictive assessment of the total ore potential of ultrabasic magmatism.

В последние годы на юге Дальнего Востока России в пределах западного сегмента Сихотэ-Алинского орогенного пояса установлены углеродизированные (до 1.5-2.0 мас. %) массивы высокотитанистых ультрабазит-базитов, аккумулирующие значительные ресурсы стратегических и критически важных металлов [3]. Одним из модельных объектов может послужить Ариадненский массив, в ультрамафитах центральной части которого локализовано проявление золото-платиноидной минерализации, в мафитах — золото-титановые руды, в северо-восточном экзоконтакте и околоинтрузивной зоне — соответственно золото-сурьмяное и золото-медное рудопроявления. Особый интерес вызывает присутствие к югу от интрузии нескольких даек флюидоэксплозивных брекчий щелочных пикритов, обогащенных РЗЭ, послуживших предметами минералого-геохимических и изотопных исследований.

В геологическом строении изученной площади принимают участие ранне-среднеюрские турбидиты и микститы (субдукционный меланж) верхней части юрско-раннемеловой аккреционной призмы с включениями позднепалеозойских и раннемезозойских кремней, известняков и базальтов. Аккреционная призма прорвана в конце средней юры Ариадненской интрузией ультраосновного состава, юго-западная часть которой сложена ультраосновными породами первой фазы — перидотитами и оливиновыми пироксенитами, постепенно переходящими к центру в ильменитовые и амфиболовые габбро. На северо-востоке интрузива преобладают диориты, монцодиориты и сиениты второй фазы. Ко второй фазе отнесены также немногочисленные, маломощные дайки диабазов, сиенитов, трахибазальтов в интрузии первой фазы [4]. К юго-восточному экзоконтакту плутона приурочено несколько даек флюидоэксплозивных брекчий пикритов (с востока на запад): Малиновская, Магнитная, Карбонатитовая.

Пикриты слагают сравнительно небольшие крутопадающие тела в песчаниках и алевролитах. Макроскопически они представляют собой серовато-зеленоватые породы порфировой структуры и массивной текстуры. Основная масса состоит из микролитов пироксена и вулканического стекла с вкрапленниками оливина, пироксена и рудного минерала. Изредка в основной массе пироксен проявляется в виде лейстовидных зерен, интенсивно замещаемых керсутитом, флогопитом и карбонатом.

Состав пикритов характеризуется довольно высокой железистостью (до 16.0 мас. %) и глиноземистостью (Al_2O_3 до 8.0 мас. %). Это умерено-высокощелочные породы, отличающиеся высокими концентрациями титана (TiO_2 до 5.0 мас. %) и кальция (CaO до 16.0 мас. %), а также V, Cr, Ni, Zr. Для пикритов типичны высокие суммарные содержания (до 1700 г/т) РЗЭ,

полого-наклонный тренд их распределения и отсутствие ярко выраженных аномалий. На мультиэлементной диаграмме пикриты образуют единую серию с общим минимумом по K, Hf и максимумом по Th и Pb. Распределение некогерентных литофильных элементов свидетельствует об обогащении пикритов крупноионными (Sr, Ba) литофильными элементами и обеднении высокозарядными (Ta). Нормированные к хондриту графики распределения редкоземельных металлов характеризуются выдержанным обогащением легких РЗЭ (La, Ce, Pr, Nd) по отношению к тяжелым лантаноидам. В целом, суммарные содержания РЗЭ в пикритах Ариадненского массива изменяются синхронно с концентрацией углеродистого вещества: чем выше сумма РЗЭ, тем больше степень углеродизации.

Основными носителями РЗЭ в пикритах являются монацит-(Ce) (Ce,La,Nd) PO4 и лукасит-(Ce) (Ce,Nd,La)$(Ti,Fe)_2(O,OH)_6$. Монацит, представленный цериевой разновидностью, обычно встречается в виде мелких включений, не превышающих 20 мкм, часто приуроченных к крупным зернам апатита в ассоциации с кварцем. В его составе преобладает Ce_2O_3 (до 38.0 мас. %), в то время как La_2O_3 и Nd_2O_3 характеризуются значительно меньшими содержаниями (соответственно до 26.4 и 10.6 мас. %). Концентрация Pr_2O_3 не превышает 3.3 мас. %.

Еще одной редкоземельной фазой в пикритах является разновидность лукасита-(Ce), встречающаяся в виде микровключений в титаномагнетите и ильмените. В его химическом составе доминируют Ce_2O_3 (до 26 мас. %) и Nd_2O_3 (до 16 мас. %). La_2O_3 и Pr_2O_3 присутствуют в гораздо меньших количествах (не более, соответственно, 8.0 и 4.0 мас. %). В отдельных случаях фиксируется наличие примеси Sm_2O_3 и Gd_2O_3 (не более 2-3 мас. %).

Изученные пикриты характеризуются довольно высокой степенью углеродизации (содержание углерода, по данным элементного анализа, достигает 6.0 мас. %). При оптических исследованиях было отмечено, что углеродистое вещество в пикритах фиксируется в виде частых вкрапленных обособлений, которые находятся как в межзерновом пространстве, так и в самих минералах. Размер этих частиц редко превышает 0.1 мм.

Для выяснения природы углеродистого вещества партия проб пикритов прошла разделение флотационным методом на пенный и камерный продукты. В первом из них концентрируется углеродистое вещество, во втором — редкоземельные минералы. Рентгенофазовый анализ выделенного углеродистого вещества показал, что его основу составляет самородный углерод в форме графита.

Образование графита в природе, как отмечалось ранее [1], возможно при метаморфизме органического вещества, воздействии магматических интрузий на карбонатные породы, восстановлении из флюида мантийного происхождения, насыщенного CH_4, CO, CO_2. Поскольку эти источники характеризуются различными величинами изотопных соотношений $^{13}C/^{12}C$,

то эти параметры можно считать индикаторами генезиса графита. Так, изотопные характеристики углерода органического вещества варьируют в диапазоне $\delta^{13}C$ от -17 до -40‰ при средних значениях $\delta^{13}C$ от — 26 до - 28‰ [5]. Морские карбонаты ($\delta^{13}C$ от -2.0 до +2.0‰) и мантийный углерод (от - 4.5 до - 6.0‰) значительно обогащены тяжелым изотопом ^{13}C относительно органического вещества [6].

Изотопные характеристики углерода графитов Малиновской дайки обладают высокой степенью гомогенности, укладываясь в узкий интервал от -7.7 до -7.9‰, заметно облегченный относительно мантийного источника углерода. Еще более изотопно-легкими оказались графиты дайки Магнитной ($\delta^{13}C$ от -8.3 до -8.5‰) и Карбонатитовой ($\delta^{13}C$ от -9.1 до -9.8‰). Изотопное фракционирование обусловлено, скорее всего, изменениями физико-химических характеристик мантийных флюидов (Eh-pH, температуры) в западном направлении. В сущности, изотопно-легкий состав углерода в графитах даек может свидетельствовать об участии в их формировании коровых процессов. Наиболее вероятным источником углерода являются породы аккреционной призмы, для которой характерно обогащение всех пород органическим веществом, а палеоокенических кремневых отложений — редкоземельными элементами [2]. В процессе становления Ариадненской интрузии, вероятно, в ходе временной остановки субдукции и внедрения подслэбовой астеносферы произошло контаминирование этих пород углеродом и, возможно, мобилизация и концентрация редких земель.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить в дайках брекчий щелочных пикритов Ариадненского массива промышленно перспективной графит-редкоземельной минерализации. В ее формировании участвовали мантийные и коровые процессы. Представляется, что присутствие ассоциации графита и минералов РЗЭ имеют определенное прогнозное значение при поиске рудных объектов ариадненского типа. С другой стороны, обнаружение промышленно перспективных высокоуглеродистых рудных образований окажет заметное влияние на разработку технологии извлечения полезных компонентов.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 23-17-00093 (https://rscf.ru/project/23-17-00093).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Галимов Э.М.** Геохимия стабильных изотопов углерода. М: Недра, 1968. 226 с.

2. **Кемкин И.В., Ханчук А.И., Кемкина Р.А.** Геохимические особенности кремней Самаркинского террейна (Сихотэ-Алинь) и размеры аккретированной палеоокеанической плиты // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 2. С. 143-157. https://doi.org/10.15372/GiG20180201

3. **Молчанов В.П., Ханчук А.И., Андросов Д.В.** Минералы золота и платины в позднемезозойском Ариадненском ультрабазит-базитовом массиве (Сихотэ-Алинский орогенный пояс) // Тихоокеанская геология. 2024. Т. 43. № 5. С. 103–118. https://doi.org/10.30911/0207-4028-2024-43-5-103-118.

4. **Ханчук А.И., Молчанов В.П.** Рудоносность позднемезозойского Ариадненского массива ультрабазитов, базитов и гранитоидов (Сихоте-Алинский орогенный пояс) // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 6. С. 5–19. https://doi.org/10.30911/0207-4028-2023-42-6-5-19.

5. **Hoefs J.** StableIsotope Geochemistry. Berlin: Springer, 2015. 402 p.

6. **Luque F., Crespo Feo, E., Barrenechea, J., Ortega L.** Carbon isotopes of graphite: Implications on fluid history// Geoscience Frontiers. 2012. N 3. P. 197-207.

МИНЕРАЛЬНЫЕ ВОДЫ ПРИМОРСКОГО КРАЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Б.И. Челнокова[1], И.В. Брагин[2], А.А. Павлов[2]

[1]Дальневосточный научный центр физиологии и патологии дыхания, Владивостокский филиал – Научно-исследовательский институт медицинской климатологии и восстановительного лечения, г. Владивосток, e-mail: berta-20@mail.ru

[2]Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, г. Владивосток, e-mail: bragin_ivan@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена комплексному изучению минеральных вод Приморского края как уникального природного ресурса, имеющего народно-хозяйственное, научное и бальнеологическое значение. Рассматриваются их классификация, критерии отнесения к полезным ископаемым, а также роль в качестве индикатора глубинных геологических процессов и инструмента для поиска рудных месторождений. Особое внимание уделено анализу состояния гидроминеральной базы санаторно-курортного комплекса региона. Отмечается, что несмотря на богатство и разнообразие ресурсов (свыше ста проявлений, включая три провинции вод), их использование не превышает 10–30% от оценённых запасов. Подчёркивается необходимость постоянного мониторинга химического состава вод для обеспечения экологической безопасности и рациональной эксплуатации. Делается вывод о том, что сохранение, освоение и комплексное изучение минеральных вод Приморья является важной государственной задачей, инвестиции в которую способствуют устойчивому развитию, здравоохранению и укреплению научно-технологического потенциала региона.

MINERAL WATERS OF PRIMORSKY KRAI: CURRENT STATE AND PROSPECTS OF SCIENTIFIC AND PRACTICAL USE

B.I. Chelnokova[1], I.V. Bragin[2], A.A. Pavlov[2]

[1]Far Eastern Scientific Center of Physiology and Pathology of Respiration, Vladivostok branch – Scientific Research Institute of Medical Climatology and Rehabilitation Treatment, Vladivostok, e-mail: berta-20@mail.ru

[2]Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, e-mail: bragin_ivan@mail.ru

Abstract. The article is devoted to a comprehensive study of the mineral waters of Primorsky Krai as a unique natural resource of national economic, scientific and balneological importance. Their classification, criteria for attribution to minerals, as well as their role as an indicator of deep geological processes and a tool for searching for ore deposits are considered. Special attention is paid to the analysis of the state of the hydromineral base of the sanatorium-resort complex of the region. It is noted that despite the richness and diversity of resources (over 100 manifestations, including three provinces of waters), their use does not exceed 10-30% of the estimated reserves. The need for constant monitoring of the chemical composition of waters is emphasized to ensure environmental safety and rational operation. It is concluded that the conservation, development and comprehensive study of the mineral waters of Primorye is an important state task, investments in which contribute to sustainable development, public health and strengthening the scientific and technological potential of the region.

Минеральные воды представляют собой уникальный природный ресурс, находящийся на стыке геологии, гидрогеологии, медицины и курортологии. Их комплексное изучение является междисциплинарной задачей, имеющей значительное народно-хозяйственное и научное значение. С точки зрения геологии и горного дела, минеральные воды являются полезным ископаемым. Критериями их отнесения к категории «минеральные» являются повышенная минерализация (общая или по специфическим компонентам), содержание биологически активных компонентов (CO_2, H_2S, As, Rn и др.) и/или специфические физические свойства (температура, радиоактивность). Они рассматриваются как жидкие руды, месторождения которых имеют строгие границы, подсчитанные запасы и подлежат охране от истощения и загрязнения. Минеральные воды – это природные растворы, формирующиеся в недрах Земли. Их химический и изотопный состав является индикатором глубинных геологических и гидрогеологических процессов. При этом химический состав вод (микроэлементы, редкоземельные элементы, газы) служит поисковым признаком на рудные месторождения. Например, аномальные концентрации лития, цезия, рубидия в водах могут указывать на наличие редкометалльных гранитов в глубине. Вместе с этим, термальные флюиды являются спутником современной вулканической и сейсмической активности. Мониторинг изменения их температуры, химического состава (особенно соотношения изотопов гелия, концентрации CO_2, H_2, Rn) используется для прогноза вулканических извержений и оценки сейсмической опасности. Помимо этого, минеральные водоносные горизонты часто являются стратегическими запасами питьевой воды. Изучение их гидрохимии позволяет отслеживать загрязнение со стороны поверхности (нитраты, тяжелые металлы, органические загрязнители) и принимать меры по охране подземной гидросферы.

Немаловажным аспектом изучения минеральных вод является бальнеологический. Его основа – изучение механизмов воздействия вод на организм человека через питьевое лечение, ванны, ингаляции и другие процедуры. Эффект обусловлен комплексным влиянием ионного состава (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, Cl^{-}, HCO_3^{-}, SO_4^{2-}); наличия биологически активных компонентов (радон, сероводород, углекислый газ, метакремниевая кислота), а также физических свойств (температура, радиоактивность, pH). На основе детального изучения состава и свойств вод разрабатываются показания и противопоказания для лечения конкретных заболеваний (болезни ЖКТ, опорно-двигательного аппарата, нервной, сердечно-сосудистой систем, кожи); методики применения (дозировка, температура, продолжительность процедур); стандарты для курортов. Наличие уникальных минеральных вод является мощным драйвером развития регионов. Создание новых и развитие существующих курортов, таких как Шмаковка, Чистоводное, Горноводное, привлекает инвестиции, создаёт рабочие места и формирует положительный имидж территории края.

В Приморье широко распространены разнообразные гидроминеральные ресурсы, многие из которых используются уже более 70-ти лет. Поисково-разведочные работы, проведённые во второй половине прошлого века, позволили произвести учет запасов минеральных вод Приморья. По данным Гидрогеологической экспедиции Приморского края, насчитывалось около 75-ти различных проявлений минеральных вод, большей частью холодных (4–12 °С) [1, 2]. По нашим оценкам, на начало XXI в. обнаружено более ста проявлений минеральных вод, разгрузка большинства из которых на поверхности проявляется очень слабо. Термальные минеральные воды выявлены только на восточном побережье края [3]. Они относятся к низкотемпературным и поэтому не могут использоваться для целей энергетики. В Приморском крае выделены три провинции минеральных вод: холодных углекислых вод областей молодой магматической деятельности; азотных щелочных терм областей новейших тектонических движений; азотных, азотно-метановых и метановых вод артезианских бассейнов платформ, краевых прогибов и складчатых областей. Наблюдения за химическим составом вод при эксплуатации месторождений Шмаковское, Горноводненское, Ласточка, Чистоводненское и др. ведутся с начала двадцатого века.

Следует отметить, что химический состав вод – очень хрупкая система, которая изменяется не только в силу естественных (геолого-гидрогеологических) причин, но и реагирует на любое вмешательство в технологию эксплуатации месторождения. При использовании вод с целью профилактики и лечения человека необходим постоянный контроль за химическим, бактериологическим и радиологическим составом [4]. В последнее время бурно развивается предпринимательская деятельность в сфере розлива минеральных вод, введены в эксплуатацию новые скважины и месторождения, в результате

чего увеличились объемы извлекаемых вод из скважин, что изменяет время взаимодействия в системе «вода-порода». Изменение состава воды происходит также в скважинах, длительно работающих без профилактических работ. Мониторинг химического состава минеральных вод Дальнего Востока показал, что при рациональной эксплуатации месторождений сохраняется относительно стабильное гидрохимическое состояние вод с незначительными колебаниями минерализации, ионного состава в зависимости от сезона года и количества атмосферных осадков.

Природные лечебные факторы являются привычными для человека, ответные реакции на них закреплены генетически, при их применении обычно не бывает осложнений, характерных для лекарственной терапии, поэтому их можно использовать длительно, курсами и практически всю жизнь для восстановления и сохранения здоровья и увеличения продолжительности периода активной жизни. Месторождения минеральных вод являются уникальными природными объектами. Создать их искусственно невозможно. Их сохранение, освоение и рациональная эксплуатация являются важной национальной задачей настоящего и будущего.

Анализ состояния гидроминеральной базы санаторно-курортного комплекса Приморского края показывает, что использование богатейших природных ресурсов весьма незначительно и не отвечает текущим потребностям региона. Так, в Приморье количество используемых минеральных вод не превышает 10 – 30 % от оценённых прогнозных ресурсов. Минеральные воды определенного типа разведаны в количествах, перекрывающих возможные перспективные потребности территории (месторождение Шмаковское), в то время как в водах других типов ощущается недостаток. Наиболее ценными в бальнеологическом отношении являются гидрокарбонатные натриевые или смешанные по катионам воды (месторождение Ласточка) [1]. Опыт эксплуатации, региональная оценка ресурсов лечебных минеральных вод свидетельствуют о том, что наиболее перспективными для разведки и освоения являются: из углекислых вод Алчанское, Покровское проявления, Дмитриевское и Горноводненское месторождения; из азотно-метановых минеральных вод новым направлением в использовании для Дальнего Востока являются Раздольненское и Борисовское проявления, воды группы Речица. В итоге, практически все районы территории края могут быть обеспечены минеральными водами, пригодными для использования в лечебно-профилактических целях.

Комплексное изучение минеральных вод является ярким примером того, как фундаментальные научные исследования напрямую служат практическим целям, а инвестиции в исследование минеральных вод – вклад в устойчивое развитие, здравоохранение и научно-технологический потенциал страны.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №25-27-20091) и Правительства Приморского края.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Челноков А.Н.** Подземные минеральные воды Приморья (распространение, ресурсы и особенности формирования): дис. … канд. геол.-минер. наук. Владивосток, 1997. 165 с.

2. **Челноков Г.А., Харитонова Н.А.** Углекислые минеральные воды юга Дальнего Востока. Владивосток: Дальнаука, 2008. 165 с.

3. **Чудаев О.В.** Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 216 с.

4. **Чудаева В.А., Чудаев О.В., Челноков А.Н., Эдмундс У.М., Шанд П.** Минеральные воды Приморья (химический аспект). Владивосток: Дальнаука, 1999. 160 с.

МЕТАЛЛОГЕНИЯ ЗОЛОТА ПАЛЕОЗОН СУБДУКЦИИ И КОЛЛИЗИИ АЛТАЕ-САЯНСКОЙ СКЛАДЧАТОЙ ОБЛАСТИ

А.И. Черных

ООО «УК Полюс», г. Москва, e-mail: chernykhai@polyus.com

Аннотация. На основании сопоставления геологических и изотопно-геохронологических данных по рудовмещающим, рудогенерирующим комплексам пород, рудам и метасоматитам выделены шесть металлогенических эпох формирования золотого и сопутствующего оруденения. Показано, что наиболее значимая роль для формирования золоторудного потенциала региона принадлежит вендско-ранне – среднекембрийским островодужным и офиолитовым задуговым и средне-позднекембрийско – ордовикским аккреционно-коллизионным комплексам пород. В надсубдукционных условиях характерно формирование золотосодержащего колчеданно-полиметаллического (VMS) и золото-сульфидно-кварцевого типа (IR) оруденения. В аккреционно-коллизионной обстановке золото-кварцевого (IR), золото-сульфидно-кварцевого (IR), золото-(кварц)-сульфидного (Orogenic), золото-скарнового (IRsk), золотосодержащего молибден-меднопорфирового типов оруденения (PT).

METALLOGENY OF GOLD OF PALEOZONES OF SUBDUCTION AND COLLISION OF THE ALTAI-SAYAN FOLDED BELT

A.I. Chernykh

PJSC «Polyus», Moscow, e-mail: chernykhai@polyus.com

Abstract. Metallogenic epochs of gold and associated mineralization formation are distinguished based on comparison of geological and isotope-geochronological data on ore-hosting, ore-generating rock complexes, ores and metasomatites. It is shown that the most significant role in the formation of the gold ore potential of the region belongs to the Vendian-Early - Middle Cambrian island-arc and ophiolitic back-arc and Middle-Late Cambrian - Ordovician accretion-collisional rock complexes. Formation of gold-bearing pyrite-polymetallic (VMS) and gold-sulfide-quartz (IR) type mineralization is typical for supra-subduction conditions. For gold-quartz (IR), gold-sulfide-quartz (IR), gold-(quartz)-sulfide (Orogenic), gold-skarn (IRsk), gold-bearing molybdenum-copper porphyry types of mineralization (PT) formation is characteristic in an accretion-collisional setting.

В коллизионных, островодужных и задуговых океанических геодинамических обстановках происходит формирование разнообразных по составу и часто крупных месторождений металлических полезных ископаемых. С целью

изучения закономерностей формирования оруденения благородных и цветных металлов Алтае-Саянской складчатой области (АССО) определены основные особенности распространения прямых и косвенных признаков различного типа руд, рудоконтролирующие факторы, проанализированы данные о возрасте рудогенерирующих, рудовмещающих и рудоматеринских комплексов пород, рудоносных метасоматитов и золотосодержащих руд. Создана база данных из 710 изотопных датировок, полученных преимущественно U-Pb (SHRIMP-II, SIMS), а также Sm-Nd, Rb-Sr, Ar-Ar и Re-Os методами. Проведено сопоставление изотопных датировок по различным рудным районам и узлам между собой и с геологическими материалами. В работах Г.А. Бабина, М.М. Буслова, Е.В. Ветрова, И.В. Гаськова, А.И. Гусева, Н.И. Гусева, Ю.А. Калинина, Н.Н. Крука, Е.А. Наумова, С.А. Руднева, И.Ю. Сафоновой, А.Н. Уварова, А.И. Черных и др. приведено наибольшее количество изотопно-геохронологических данных, полученных при проведении геологосъемочных и научно-исследовательских работ. Комплексный анализ изотопно-геохронологических и геологических данных позволил обосновать выделение шести металлогенических эпох, отвечающих наиболее крупным этапам геодинамической эволюции АССО и отличающихся масштабом золотого оруденения и набором его типов.

1. Позднерифейско – вендская эпоха характеризуется незначительным распространением золотого и золотосодержащего оруденения, что во многом обусловлено ограниченным распространением позднерифейских метаморфических и магматических комплексов на изученной территории. Формирование позднерифейских толщ предполагается в надсубдукционных условиях на окраинах Палеоазиатского океана. Образование вендских терригенно-карбонатных пород связывается с океаническими поднятиями (симаунтами). Для металлогенической эпохи характерно формирование золото-(кварц)-сульфидного оруденения OG (Orogenic gold) и ассоциация Au с As, Cu, Pb, Zn.

2. Золотоносность вендско-раннекембрийско – среднекембрийской эпохи определяется широким развитием надсубдукционных вулканогенных и интрузивных комплексов пород энсиматической островодужной и задуговой офиолитовой природы. Становление таких комплексов в Западно-Саянской и Алтае-Салаирской субпровинциях началось в позднем венде на границе с кембрием. Однако наиболее масштабно островодужный и задуговый магматизм проявились в раннем-среднем кембрии в пределах Алатауссko-Тувинской субпровинции.

Для вендско-среднекембрийских надсубдукционных пород характерна сидеро-халькофильная специализация и, по крайней мере, на отдельных площадях — повышенное фоновое содержание Au. Это связано с образованием вулканогенно-осадочных пород в бассейнах, сопряженных с областями мантийного островодужного и задугового (междугового) океанического магматизма. Кроме того, для разрезов ранне-среднекембрийских комплексов

характерна частая смена петрографических разностей пород, обладающих различиями в физико-механических свойствах. Это определило их как благоприятную среду для формирования зон трещиноватости и проницаемости для гидротермальных растворов, при последующих складчатых и тектонических деформациях на аккреционно-коллизионном этапе.

Большая часть коренных и россыпных золоторудных объектов АССО пространственно ассоциирует именно с ранне-среднекембрийскими вулканогенно-осадочными породами. В полихронных рудных районах и узлах продуктивность золотого и золотосодержащего оруденения более молодых эпох во многом определяется наличием или отсутствием ранне-среднекембрийских пород с признаками золотоносности. Для этой металлогенической эпохи характерно преобладание оруденения золото-сульфидно-кварцевого IR (Intrusion Related), реже золото-скарнового типа (IRsk) и золотосодержащего колчеданно-полиметаллического (VMS), и для эпохи типичной является ассоциация Au с Fe, Mn, Pb, Zn, Cu.

3. Золотое оруденение средне-позднекембрийско – ордовикской эпохи, на данный момент, имеет наибольшее промышленное значение в АССО. Отличительной особенностью эпохи является широкое распространение крупных интрузивов габбродиорит-гранодиорит-гранитоидного состава аккреционно-коллизионной природы в Алатаусско-Тувинской субпровинции. Участки с максимальной золотоносностью наблюдаются в узлах, в которых средне-позднекембрийско – ордовикские массивы прорывают интенсивно дислоцированные при аккреционно-коллизионных событиях вулканогенно-осадочные породы с признаками золотоносности, сформированными в надсубдукционной обстановке вендско-раннекембрийско — среднекембрийского возраста. Чаще всего золоторудные объекты приурочены к эндо- и экзоконтактовым зонам интрузий и участкам смятия, метаморфизма, рассланцевания вулканогенно-осадочных пород. Именно пространственное совмещение золотоносных пород надсубдукционных обстановок формирования и аккреционно-коллизионного этапов развития региона определяет большой масштаб золотого оруденения.

Средне-позднекембрийско – ордовикская эпоха отличается широким распространением месторождений, в том числе крупных, золото-кварцевого (IR), золото-сульфидно-кварцевого (IR, OR) и золото-скарнового типов (IRsk), а также золото-сульфидно-кварцевых объектов типа RIRG. Предполагается, что при аккреции ранне-среднекембрийских островодужных блоков пород происходило формирование золотосодержащего молибден-меднопорфирового оруденеиея (MoCuPT). Так как аккреционные события в разных сегментах островной дуги отличались по времени [1], то и возраст молибден-меднопорфировых объектов варьирует на уровне 495-523 млн лет. Для оруденения этой металлогенической эпохи характерна ассоциация Au с Fe, Cu, Mo, W.

4. Золотое и золотосодержащее оруденение позднесилурийско-раннедевонско – девонской эпохи наиболее широко проявлено в пределах Алтае-Салаирской субпровинции. Оруденение связано с фрагментированными девонскими вулкано-плутоническими поясами, формирование которых происходило в условиях активной континентальной окраины андского типа. С вулканогенными и субвулканическими породами эпохи связано образование оруденения эпитермального золото-серебряного типа низко-, средне- и высокосульфидизированных подтипов LS, IS, HS (Epithermal type) [2], с интрузиями – золото-скарнового и золотосодержащего скарновожелезорудного типов (IRsk), реже золото-кварцевого типа IR, в том числе RIRG. Кроме того, выделяются мелкие объекты медно-молибденпорфирового типа (MoPT) с низким содержанием золота. Концентрация признаков золотого оруденения позднесилурийско-раннедевонско – девонской эпохи наблюдается на участках, где девонские вулкано-плутонические пояса накладываются на кембрийский островодужный фундамент. Это отражает важную роль вендско-кембрийских надсубдукционных комплексов в формировании золоторудного потенциала ACCO. Для золотого оруденения металлогенической эпохи типична ассоциация Au с Ag, Cu, Fe, Pb, Zn.

5. Наибольшее количество признаков золотого и золотосодержащего оруденения позднедевонско – раннекарбоновой эпохи, на данный момент, установлено в пределах Западно-Саянской субпровинции. Золотое оруденение связано с транспрессионно-коллизионным этапом эволюции региона. В это время предполагается активизация ранее сформированных региональных разломов и заложение новых, в связи с коллизией Казахстано-Байкальского составного континента с Сибирским кратоном. Данная эпоха характеризуется развитием признаков штокверкового и жильного золото-сульфидно-кварцевого оруденения (OG) вдоль линейных наиболее крупных зон складчато-разрывных дислокаций. В отдельных локальных структурах pull-apart, образуются центры магматизма (небольшие штоки и поля даек), часто средне-кислого субщелочного состава, с которыми может быть связано возникновение медно-порфирового оруденения, иногда с высоким содержанием золота (CuAu PT). Максимальная золотоносность наблюдается на участках, где сульфидно-кварцевые прожилки прорывают золотоносные поздневендско-раннекембрийские островодужные и задуговые вулканогенно-осадочные отложения. Для данной эпохи типична ассоциация Au с As, Cu, Te, Bi.

6. Формирование золотого оруденения пермско – триасовой металлогенической эпохи связано с внутриплитным плюмовым магматизмом. Оно локализуется в зонах разломов и маркируется поясами даек долеритов, реже массивов гранитоидов, и низкотемпературных метасоматитов. На отдельных участках, приуроченных к бортам Кузнецкого прогиба, отмечается повышенная золотоносность позднедевонско-раннекарбоновых терригенных и карбонатно-терригенных пород. Предполагается, что эти отложения,

наряду с мантийными источниками металлов, могли служить основой для образования более позднего золотого оруденения пермско-триасовой эпохи. Для пермско – триасовой эпохи характерно развитие эпитермальной минерализации золото-(кварц)-сульфидного типа в углеродистых терригенно-карбонатных толщах CT (Carlin type), в ассоциации с ртутной, сурьмяной и флюоритовой минерализацией. Золотое оруденение этой эпохи ассоциирует с As, Sb, Hg, Ba.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабин Г. А., Шокальский С.П.** Основные черты геологического строения Алтае-Саянской складчатой области (тектоническое районирование, стратиграфия, магматизм, история геологического развития) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2017. № 6. С. 19-37.

2. **Chernykh A.I., Leibham P.N., Sokolova L.A. et al.** The Devonian Kalarskoe Epithermal Occurrence of the Kaburchak Au-Ag Cluster in the Altai-Sayan Folded Area, Russia: Geological Setting, Mineralogical, Geochemical, and Geochronological Features // Minerals. 2024. V. 14. N 7. P. 708. https://doi.org/10.3390/min/14070708

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ GEONEM – ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ПРОГНОЗА БЛАГОРОДНОМЕТАЛЛЬНЫХ РЕСУРСОВ: РАЗРАБОТКА И ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

С.Л. Шевырев, Н.Г. Борискина

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
г. Владивосток, e-mail: shevirev@mail.ru

Аннотация. Проведение геологической съемки территории, картирования и прогноза ресурсов благородных металлов требует создания ее геодинамической модели. Программное средство GeoNEM основывается на методе вычислительной динамики геологических сред, рассматриваемых в качестве предельно высоковязких жидкостей, называемом «маркеры-в-ячейке» («marker-in-cell»(MIC)). Это прикладное программное обеспечение, написанное на языке Python, позволяет получить представление о скорости, длительности геодинамического процесса, формируемых складчатых и разрывных структурах, внедрении расплавов и их контаминации. Программа имеет встроенный визуальный редактор геодинамических моделей и рендерер, запускаемый из командной строки или графического пользовательского интерфейса и была апробирована для моделирования геодинамики формирования рудоносных структур Дальнего Востока России.

GEONEM SOFTWARE FOR NUMERIC MODELING FOR MINERAL PROSPECTIVITY OF PRECIOUS METALS: DEVELOPMENT AND USER EXPERIENCE

S.L. Shevyrev, N.G. Boriskina

Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok,
e-mail: shevirev@mail.ru

Abstract. Conducting of the geological mapping and mineral prospectivity research for precious metal resources demands understanding of geological evolution of the target area. GeoNEM software uses computational dynamics method of the geological media, namely «marker-in-cell»(MIC). This application developed in Python allows to understand velocity and duration of the geodynamic process, forming plicative and disjunctive structures, intrusion of melts and their contamination. Software has built-in model editor and renderer with command-line and graphic user interface and was tested on modeling of ore-bearing structures of Russian Far East.

Численное моделирование может являться мощным средством для проведения геологического исследования и проверки гипотез, однако,

несмотря на это, используется явно недостаточно в геологической практике. Многие исследователи продолжают предпочитать интуицию и умозрительные построения численным моделям. Причинами этого выбора могут служить как недостатки традиционных подходов к организации исследований, так и отсутствие специализированного программного обеспечения. Для компенсации последнего из указанных недостатков было разработано специализированное программное обеспечение GeoNEM (Geodynamic Numeric Exploratory Modeler). Программное обеспечение представляет собой оболочку для решения термомеханической вязко-эласто-пластической модели MIC, предложенной [Gerya, 2019] и включает две программы: GeoNEM Model Editor и GeoNEM Renderer, предназначенные для разработки геодинамических моделей и их рассчета, соответственно. Программа разработана на языке программирования Python с использованием библиотек numpy, cython, scipy, pyqt5 и matplotlib.

Cython используется для ускорения циклического перебора маркеров, в которых сохраняются физические свойства вещества модели. Преимуществом перед ускорением с библиотекой *numba* является поддержка в *Cython* разреженных матриц scipy, позволяющих оптимизировать использование оперативной памяти [1].

Метод MIC рассматривает моделируемые среды в виде эйлеровых сеток, состоящие из узлов и соединяющих их ребер, между которыми заключены подвижные лагранжевы маркеры, перемещающиеся между узлами в поле скоростей. В процессе вычислений происходит интерполяция свойств материалов с маркеров на узлы сетки, вычисление физических свойств для этих узлов, создание матрицы коэффициентов для решения уравнения Навье-Стокса методом конечных разностей, получение матриц физических параметров, перемещение маркеров в соответствии с их скоростями, проверка превышения пороговых значений: предела насыщения для деформаций, температуры плавления для превращения материала в расплав и перехода к следующей итерации.

GeoNEM Model Editor позволяет выполнить визуальный дизайн 2D модели, включающий в себя разметку ее пространства с применением трех инструментов: блоков, карандаша и кисти (рис. 1) и состоит из отдельных участков, для которых выбирается вещество и его состояние. Созданная модель сохраняется в файле формата json и доступна для открытия, чтения и внесения правок пользователем.

После того, как модель создана, установлены необходимые для ее работы параметры, можно выполнить ее загрузку и рендеринг в программе GeoNEM Renderer. Последняя может работать с помощью интерфейса командной строки (CLI) или графического пользовательского интерфейса (GUI) (рис. 2).

Результатом работы рендерера являются сохраняемые на диске компьютера пользователя графические изображения, отражающие распределение значений вещества и физических параметров: плотности, вязкости, напряжения, деформации, температуры и доли расплава. При желании пользователя, эти параметры могут быть сохранены дополнительно в виде таблиц в формате csv.

Пример отражает процесс внедрения мантийных базальтоидных выплавок, контаминированных мантийным и коровым веществом, в глубинный разлом и завершается формированием вулканической структуры. Эволюция вещества модели за 2850 циклов (шагов) ее существования приведена на рисунке 3.

Можно говорить, что GeoNEM представляет собой пользовательский инструмент для проведения геодинамического моделирования, сопровождающего концептуальные геологические построения.

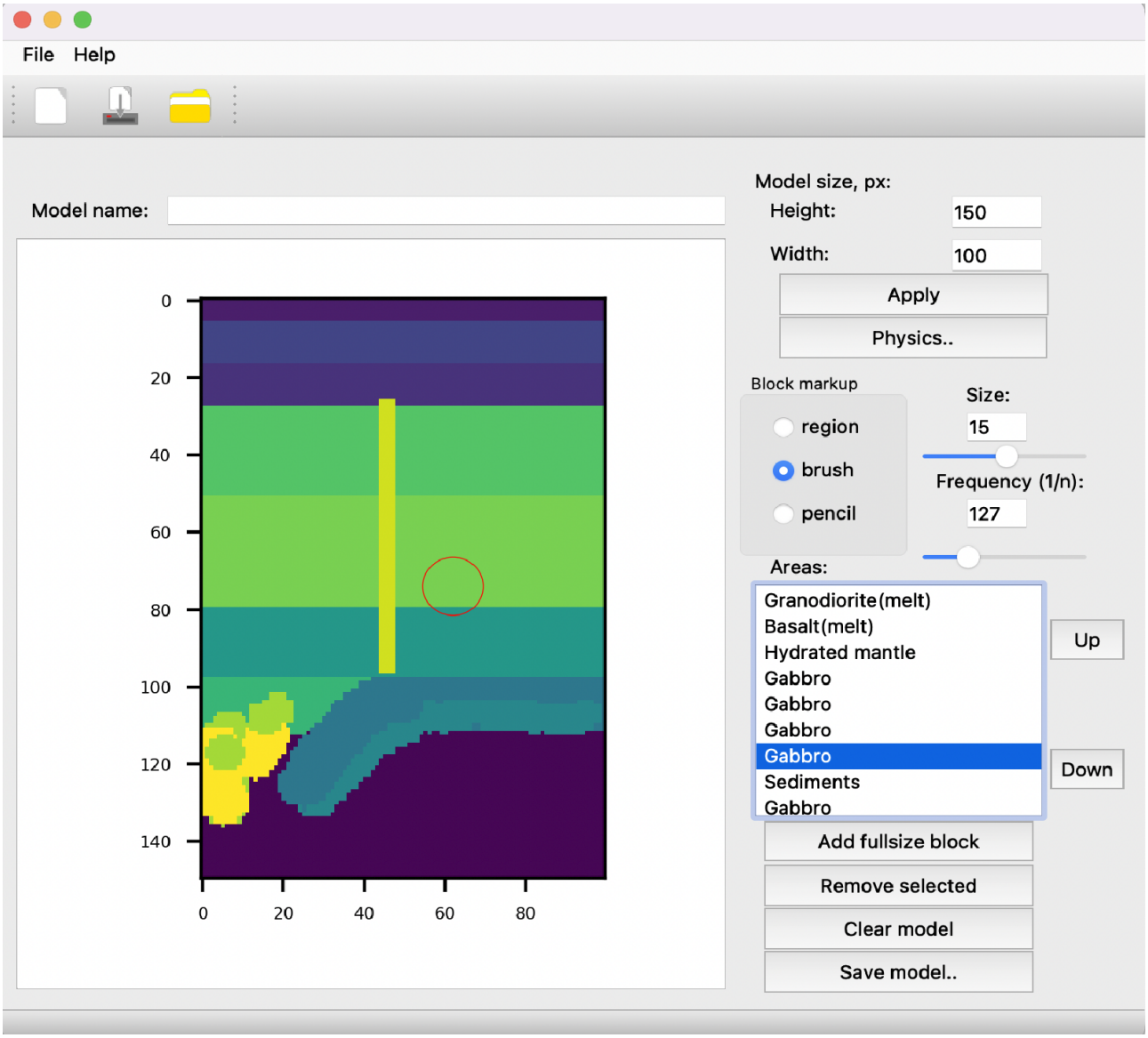


Рисунок 1. Графический пользовательский интерфейс программы GeoNEM Model Editor.

Figure 1. Graphic user interface of the GeoNEM Model Editor software.

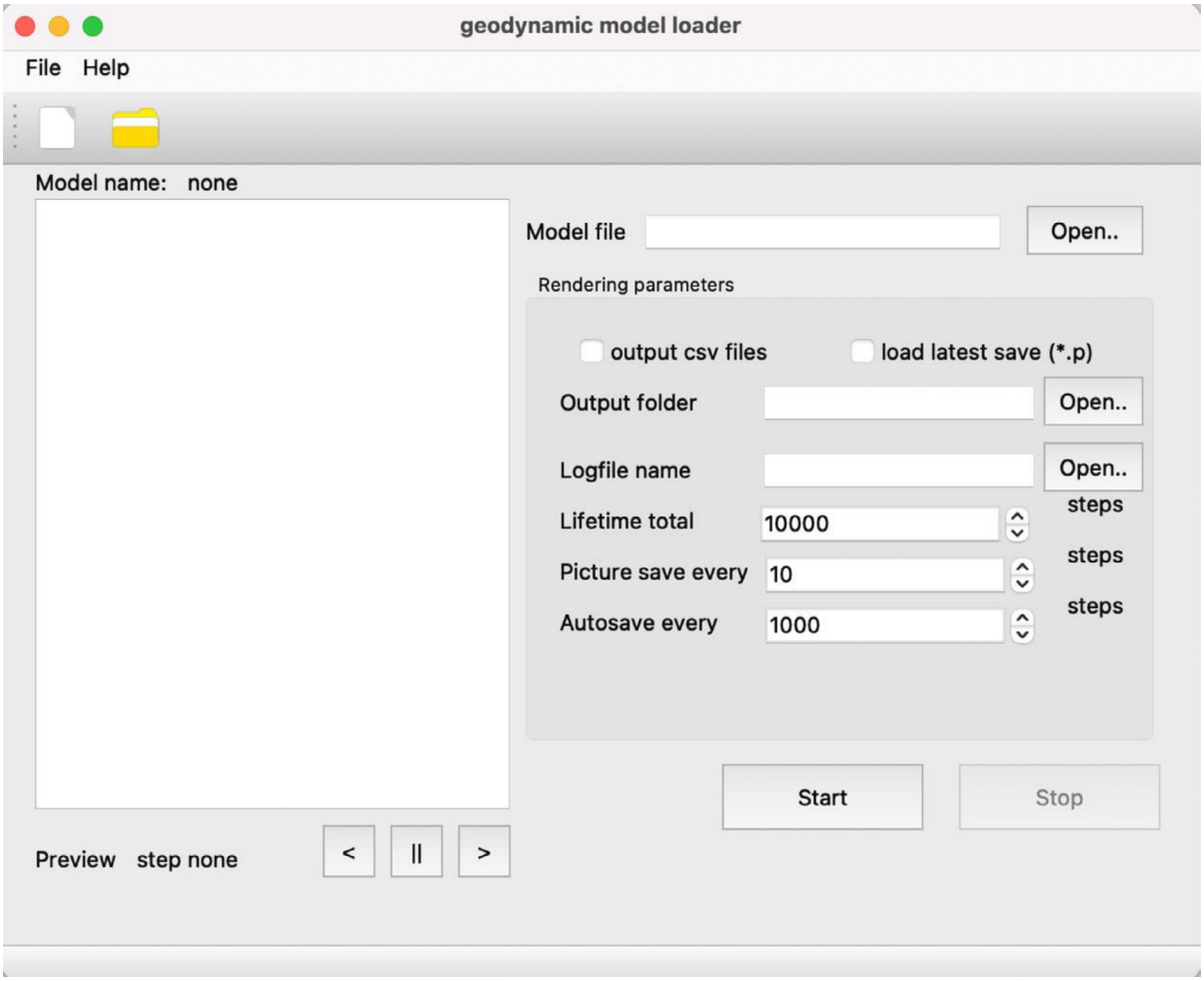


Рисунок 2. Графический пользовательский интерфейс программы GeoNEM Renderer.

Figure 2. Graphic user interface of the GeoNEM Renderer software.

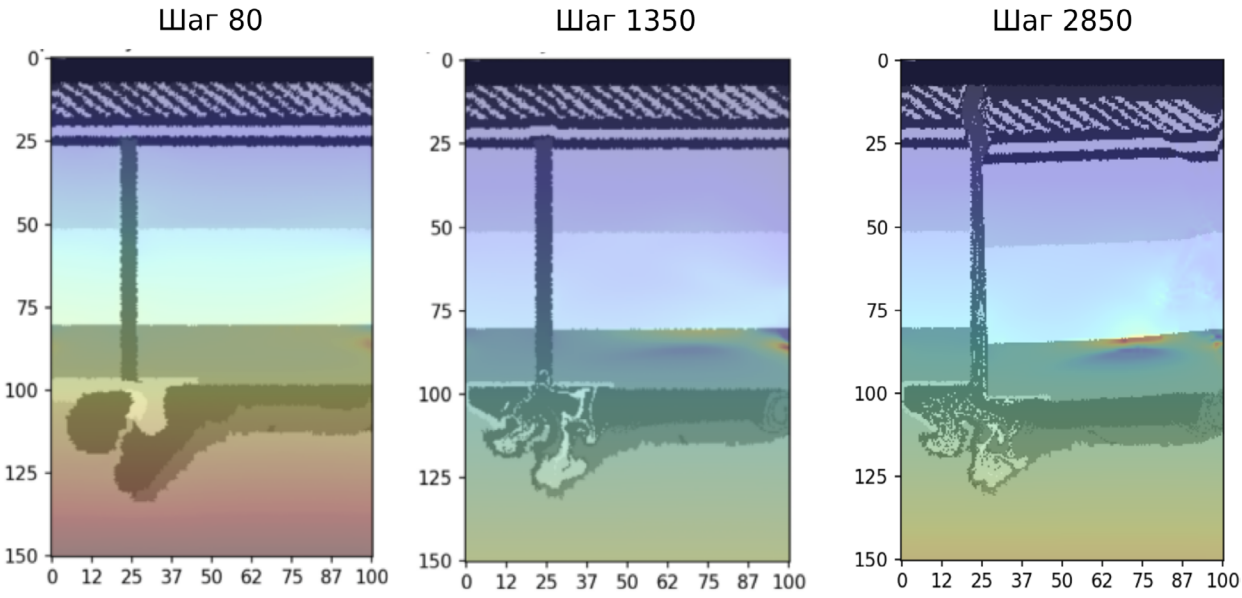


Рисунок 3. Эволюция модели внедрения магмы в проницаемую структуру (разлом), сформированный над слэбом, стагнированным в астеносфере.

Figure 3. Evoluiton of melt intruded into permeable structure (fault) over the stagnant astenospheric slab.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шевырев С., Борискина Н. Оптимизация методики расчетов региональных геологических моделей рудоносных изометрических структур в Python // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2024. Т. 61. № 1. С. 92–100. https://doi.org/10.31431/1816-5524-2024-1-61-92-100

2. Gerya T. Introduction to Numerical Geodynamic Modelling. 2nd Edition. Cambridge University Press. 2019. 454 p.

ПЕТРОМАГНИТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СКАРНОВО-ШЕЕЛИТОВОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ВОСТОК-2

А.Ю. Юрчук[1], Ю.В. Юрчук[2]

[1]Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск, e-mail: tyurka16@gmail.com

[2]ООО «ТЕКТОНИКА» г. Хабаровск

Аннотация. В докладе рассматривается петромагнитная характеристика скарново-шеелитового месторождения Восток-2 по результатам полевых работ 2024 года.

PETROMAGNETIC CHARACTERISTICS OF THE SKARN-SCHEELITE DEPOSIT VOSTOK-2

A.Yu. Yurchuk[1], Yu.V. Yurchuk[2]

[1]Yu.A. Kosygin Institute of Tectonics and Geophysics FEB RAS, Khabarovsk, e-mail: tyurka16@gmail.com

[2]TECTONIKA LLC, Khabarovsk

Abstract. The report discusses the petromagnetic characteristics of the Vostok-2 skarn-scheelite deposit based on the results of field work in 2024.

Балансовые запасы вольфрама Приморского края сосредоточены всего в 6 месторождениях и составляют 130.456 тыс.т или 13.89% от запасов России. Крупнейшие месторождения — Восток-2, Тигриное, Лермонтовское и Скрытое. Месторождение Восток-2 (0.81% общероссийских запасов) отрабатывает АО «Приморский ГОК» [2].

Петромагнитная характеристика скарново-шеелитового месторождения Восток-2 рассматривается по результатам работ 2024 года. Работы выполнены силами компании «ТЕКТОНИКА» по договору с Горнорудной компанией «АИР» (АО «ГРК «АИР»). Аэромагниторазведочные работы проводились в площадном варианте по сети маршрутов через 100 метров на высоте 45–65 м над поверхностью земли. Для геологической интерпретации результатов аэромагнитной съемки были проведены измерения магнитной восприимчивости руд из эталонной коллекции геологической службы рудника и на рудном складе. Проанализированы данные по физическим свойствам из отчета предшественников [1].

Таблица «статистических характеристик физических свойств горных пород геологической коллекции с участка Восток-2»[1] дает обширное и очень детальное представление о распределении магнитной восприимчивости по литологическим разностям. Свертка из 96 разновидностей горных пород в этой таблице до количества групп — классов, количество которых вполне соответствует изменчивости магнитного поля на площади, представлена в таблице 1.

Данные магнитной восприимчивости отражают характеристику литологических разностей и не дают представления о физических свойствах руд, за исключением того, что отмечены породы с вкрапленностью сульфидов, которые имеют повышенную магнитную восприимчивость 1480х10-5 ед. СИ. В связи с этим были проведены дополнительные измерения магнитной восприимчивости непосредственно руд. На рудном складе было выполнено 279 измерений, которые сгруппированы и сведены в таблицу 2.

Величина магнитной восприимчивости пироксеновых скарнов изменяется от 55.8 до 1958 ед. х10^{-5} ед. СИ. Значения магнитной восприимчивости менее уровня, который характерен для осадочных пород, составляет 8 из 13 значений, т.е. 61.54%, а контрастно высоких значений, но значительно меньших чем у андезитов и базальтов, всего 2 значения, или 15.38%. Вывод: для руды, представленной пироксеновыми скарнами, характерна низкая магнитная восприимчивость, соответствующая уровню магнитной восприимчивости алевролитов, песчаников и редко гранитов.

Таблица 1. Магнитная восприимчивость групп горных пород.

Table 1. Magnetic susceptibility of certain kinds of rocks.

№ п/п	Горные породы	Класс	Количество образцов	Магнитная восприимчивость, n*10^{-5} ед. СИ
1	Кварцит, Известняки, песчаники, Кремни, граниты измененные	1	468	52
2	Алевролиты, песчаники, редко граниты	2	533	154
3	Граниты, алевролиты	3	563	257
4	Гранодиориты, измененные: граниты, габбро, базальты;	4	578	514
5	Туфы дацитов, андезидацитов, Ороговикованные породы	5	44	661
6	Гранодиориты штока месторождения Восток-2	6	43	930
7	Диориты, Диоритовые, дацитовые порфириты (дайки), породы с вкрапленностью сульфидов	7	114	1400
8	Гранодиориты, андезиты, андезидациты, дациты;	8	91	2242
9	Лавы, туфолавы андезитов, дацитов	9	20	3335
10	Кремнистый аргиллит с магнетитом (метаморфизм)	10	6	11074
11	Андезитовая толща, Андезибазальты, базальты (экструзии)	11	164	13720
12	Базальты	12	27	35032
13	Всего значений		2651	

Таблица 2. Магнитная восприимчивость по измерениям на рудном складе

Table 2. Magnetic susceptibility as determined at the ore stockpile.

№ п/п	Наименование породы	Значение ед. 10^{-5} СИ	№ п/п	Наименование породы	Значение ед. 10^{-5} СИ
1	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	0.0	1	Скарн пироксеновый	55.8
2	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	2.9	2	Скарн пироксеновый	110.7
3	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	137.0	3	Скарн пироксеновый	115.2
4	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	343.4	4	Скарн пироксеновый	152.6
5	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	356.3	5	Скарн пироксеновый	154.0
6	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	412.4	6	Скарн пироксеновый	174.0
7	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	511.6	7	Скарн пироксеновый	206.8
8	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	729.1	8	Скарн пироксеновый	228.5
9	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	800.4	9	Скарн пироксеновый	384.0
10	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	912.2	10	Скарн пироксеновый	518.5
11	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	1028.2	11	Скарн пироксеновый	519.4
12	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	1915.3	12	Скарн пироксеновый	969.2
13	Кварц-шеелитово-сульфидные руды	2238.0	13	Скарн пироксеновый	1958.0
	Среднее значение	721.2		Среднее значение	426.7

Величина магнитной восприимчивости руды кварц-шеелитово-сульфидного состава изменяется от 0 до 2238 x10^{-5} ед. СИ (таб. 2). Контрастно высоких значений, но значительно меньших чем у андезитов и базальтов, 5 значений из 15, т.е. треть значений, или 33.33%. Основная часть измерений магнитной восприимчивости по рудам кварц-шеелитово-сульфидного состава – 7 значений, находится в диапазоне от 343.4 до 731.3 x10^{-5} ед. СИ, при среднем значении 516.5 x10^{-5} ед. СИ. Это уровень магнитной восприимчивости для гранодиоритов, измененных гранитов, габбро и базальтов, ороговикованных осадочных пород, он значительно уступает величине для вулканитов среднего и основного состава.

Геологический разрез на рисунке 1 взят с карты масштаба 1:50000, распределение магнитной восприимчивости по разрезу получено в результате инверсии магнитного поля по данным аэромагнитной съемки 2024 года в программе ZondMag2D.

1) Рудная зона месторождения проявляется как объем пород с низкими магнитными свойствами, в верхней части разреза просматривается падение зоны на северо-запад.

2) Локальная отрицательная аномалия магнитного поля, картирующая породы с низкими магнитными свойствами, вмещающие месторождение Восток-2, прослеживается почти на 20 км по простиранию, при мощности 700 – 1000 м.

3) Линия контакта пород с разной магнитной восприимчивостью, ограничивающая магнитную аномалию, круто падает на северо-запад согласно с падением даек диоритовых порфиритов

4) Выход триасовых кремнистых алевролитов нижней толщи на поверхность соответствует экстремальным значениям магнитного поля на

графике и в совокупности с дайками диоритовых порфиритов формирует блок пород с высокими магнитными свойствами, который прослеживается на глубину.

5) Шток гранодиоритов в разрезе прослеживается на глубину пониженными значениями магнитной восприимчивости: контакты, ограничивающие этот шток, конформны градиентам магнитной восприимчивости в разрезе.

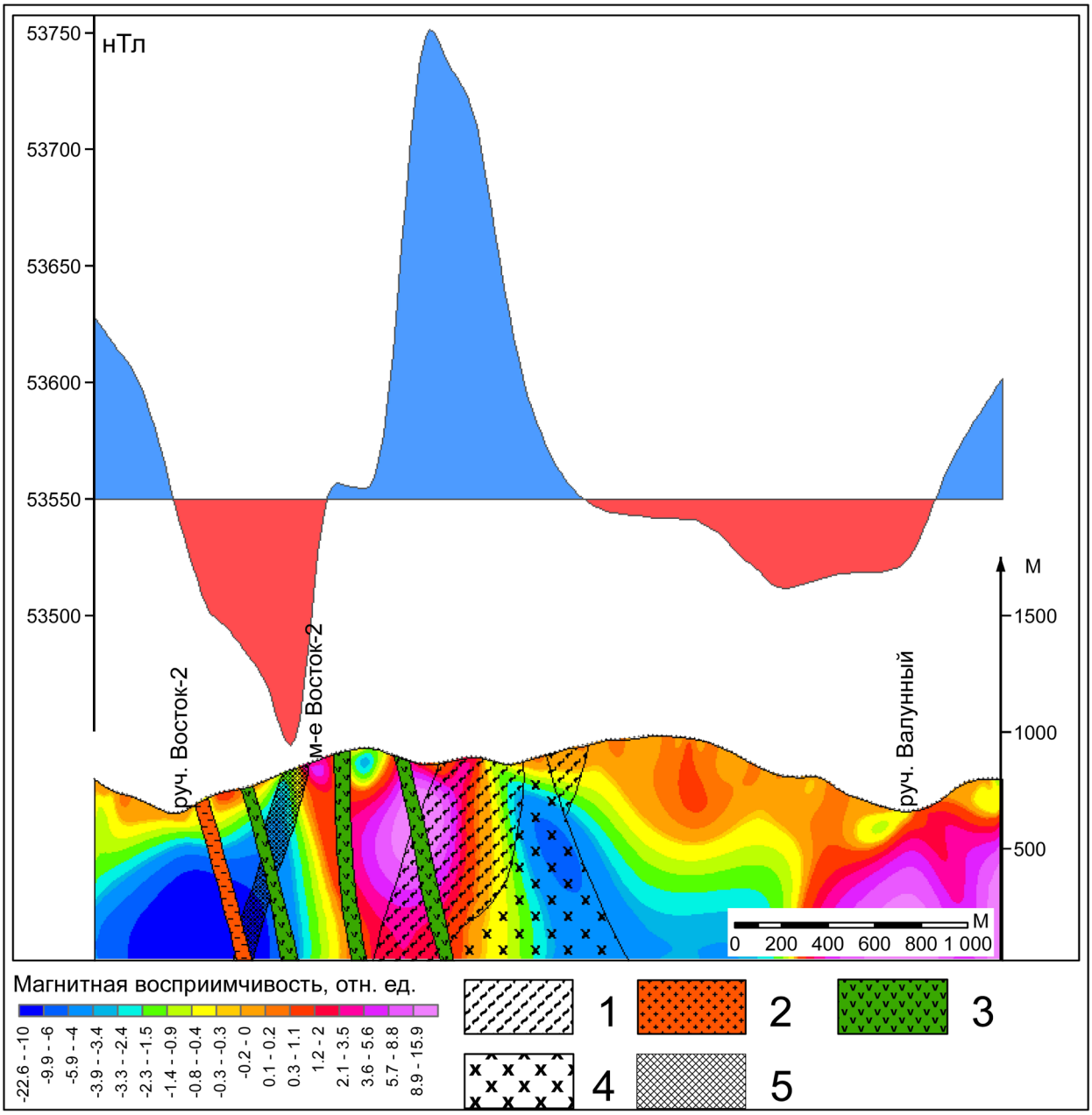


Рисунок 1. Геологический разрез и инверсия магнитного поля по месторождению Восток-2.
1) алевролиты кремнистые, часто с включением кремнистых пород, песчаников; 2) дайки гранит-порфиров; 3) дайки диоритовых порфиритов; 4) штоки гранодиоритов; 5) месторождение Восток-2.

Figure 1. Geological section and magnetic field inversion at the Vostok-2 deposit.
1) siliceous siltstones, often with inclusions of siliceous rocks, sandstones; 2) granite porphyry dikes; 3) diorite porphyry dikes; 4) granodiorite stocks; 5) Vostok-2 deposit.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Круглов С.В., Оковитый В.Н. и др.** «Геологическое строение и полезные ископаемые Восточного рудного узла» Отчет участка Восточный рудный узел Восточной партии о результатах проведения геологического доизучения с общими поисками масштаба 1: 25000 в 1988 – 1994 годы. Владивосток, 1994.

2. **Справка** о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Приморского края на 15.03.2021 г. Справка подготовлена ФГБУ «ВСЕГЕИ» в рамках выполнения Государственного задания Федерального агентства по недропользованию от 14.01.2021 №049-00016-21-00

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

В.Д. Абрамова 256
И.А. Александров 132, 221
В.И. Алексеев 252
С.В. Алексеев 92
Л.П. Алексеева 92
Е.Е. Амплиева 256
А.А. Андреев 108
Д.В. Андросов 175, 376
Г.С. Анисимова 318
А.В. Асеева 118
Е.В. Баданина 260
З.Г. Бадрединов 122
Р.В. Бадридинов 265
А.А. Балобаненко 92
Ш.К. Балтыбаев 39
В.В. Баранов 287
В.Н. Бахтина 270, 295
Н.В. Бердников 314, 339
А.У. Бойко 274, 354
Л.Н. Болдушевская 43
Н.Г. Борискина 391
С.Е. Борисовский 305
И.В. Брагин 381
Ю.М. Бронзова 165
А.К. Бронников 87
И.В. Брынько 187, 191, 210, 277
С.Ю. Будницкий 155, 221
С.С. Бурнатный 191
Н.А. Бушенкова 48
А.С. Бяков 187, 191, 210, 277
Т.И. Васильева 287
А.Г. Вахромеев 78, 237
И.Л. Ведерников 187, 191, 210, 277
Т.А. Веливецкая 210, 277
А.В. Вергунов 196
Р.В. Веселовский 104
Э.С. Вивдич 39
И.В. Викентьев 305
В.Е. Волкова 51
Е.А. Володина 104
С.В. Высоцкий 210, 277
О.А. Гаврюшкина 147
А.М. Гагиева 357
И.Г. Гвоздева 232
Б.Б. Герасимов 205, 282
Н.А. Гибшер 335
Г.З. Гильманова 18, 69, 290
А.С. Гладков 51
Д.П. Гладкочуб 237
А.Г. Гоев 55
А.Е. Голдырев 104
А.Н. Голич 376
А.И. Голубев 357
Н.В. Гореликова 59
Н.А. Горячев 295, 362
А.А. Гребенникова 270, 295
В.С. Гриненко 287
А.В. Гурова 127
А.А. Дебабова 104
И.М. Дербеко 64
А.Н. Диденко 18, 69, 87, 290
К.Н. Доброшевский 270, 295
А.А. Добрынина 92
Т.В. Донская 237
Н.А. Доронина 200
А.П. Жгилев 27
А.И. Журавлев 205
Н.В. Зарубина 155
Ю.Д. Захаров 210, 277
Л.А. Земскова 300
С.С. Зинякин 51
С.И. Иванников 300
А.И. Иванов 205
В.В. Иванов 215, 298, 300, 327
М.В. Иванов 215
В.В. Ивин 221
В.В. Ивина 221
А.В. Игнатьев 210, 277
А.Ю. Казанский 104
Ю.А. Калинин 51
С.А. Касаткин 331
О.Н. Кеня 215
П.К. Кепежинскас 314, 339
А.П. Кириенко 215
В.Е. Кириллов 265
М.В. Киселёв 132
Е.В. Ковальчук 256, 305
П.С. Козлов 136
Л.Г. Колесова 215
В.Б. Комаров 256, 305
Л.А. Кондратьева 282
В.Д. Кондратюк 48
А.В. Коновалов 95
А.Л. Коновалов 357

Е.В. Коптев 104
М.И. Копылов 309
Д.В. Костылев 55
П.Д. Котлер 127
А.Б. Котов 165
И.А. Кочкин 108
Н.Н. Крук 22
В.О. Крутикова 314
М.В. Кудрин 318, 367
О.Н. Кузьмина 322
К.А. Кукса 165
Р.В. Кутыгин 210, 277
А.Ю Кухта 260
А.В. Лавренчук 31
А.Ю. Лебедев 132
И.И. Лиханов 74, 136
Е.Е. Лоскутов 205
С.О. Максимов 141
А.И. Малиновский 227
Н.С. Маркин 300
Б.А. Марковский 122
Е.И. Медведев 221
М.А. Мизерная 322
Ю.А. Микишин 232
В.А. Минаев 112, 371
Н.В. Мисюркеева 78
А.Н. Митрохин 82, 327
М.С. Михайлов 51
Н.В. Моисеенко 350
В.П. Молчанов 376
З.Л. Мотова 237
П.Л. Неволин 327
М.Э. Николайчук 331
М.С. Никольский 305
А.Д. Ножкин 74, 136
М.Ю. Носырев 18, 69, 87, 290
Т.А. Ойцева 322
А.В. Округин 205
И.С. Окунев 300
А.А. Орехов 147
А.А. Павлов 381
В. Павловски-Глан 59
В.А. Пеллинен 242
А.Б. Перепелов 27
И.С. Перетяжко 151, 345
А.А. Перфилова 127
Т.И. Петренко 232
В.А. Петров 108, 112, 371
С.В. Петров 165
М.А. Петрова 335
С.П. Плетнев 99
Ю.В. Плоткина 165
В.Ф. Полин 155, 160
Л.И. Полуфунтикова 318, 367
О.П. Полянский 39
А.М. Попов 210
А.В. Поселюжная 215
Н.В. Потапова 339
Н.В. Правикова 104
В.В. Прийменко 357
И.А. Пуляева 345
В.В. Раткин 59
Д.А. Рогов 357
Ю.Л. Ронкин 74, 136
Е.А. Савина 151, 345
И.А. Савинский 127
Е.Б. Сальникова 165
И.Ю. Сафонова 127
П.П. Сафронов 350
В.Г. Свердлова 39
А.А. Светлаков 92, 242
А.Д. Свечеревский 108, 112
Т.Е. Седышева 99
Б.И. Семеняк 59
А.Д. Сенько 322
А.В. Сергеева 274, 354
Е.Д. Скильская 274, 354
Е.В. Скляров 31
П.Б. Соколов 165
В.Ю. Соловьёв 357, 362
К.К. Сохорев 170
О.Т. Соцкая 362
Е.В. Старикова 357
Ю.А. Степнова 95
М.В. Стифеева 165
Т.А. Ступина 48
Т.Н. Сурин 357
В.П. Сухоруков 51
В.Т. Съедин 99
Л.Ф. Сырицо 260
Б.Р. Тагиров 305
Я.А. Тарасов 318, 367
А.В. Тевелев 104
А.А. Тихвинская 104
П.А. Тишин 170
А.А. Томиленко 335
И.С. Тубольцев 371
О.М. Туркина 74
С.А. Устинов 108, 112, 371
Д.Г. Федосеев 309

В.Ю. Фридовский 318, 367
А.И. Ханчук 210, 215, 376
С.С. Цыпукова 27
А.А. Чащин 118, 175
Б.И. Челнокова 381
И.Ю. Чекрыжов 175
А.В. Черкашин 357
А.И. Черных 386
И.А. Чижова 59
А.В. Чистякова 104
Е.О. Шапаренко 335
С.Л. Шевырев 391
П.А. Шестаков 104
К.О. Шишканова 274, 354
В.В. Шухов 108, 112
Ю.Д. Щербаков 27
Е.А. Элбакидзе 246
А.Ю. Юрчук 396
Ю.В. Юрчук 396
В.В. Яковенко 160, 277
Ping-Ping Liu 180, 183
Ben Ma 180, 183
Inna Safonova 35
Ze-Xian Yao 183

Текстовое электронное издание

Материалы

VII Всероссийской конференции с международным участием

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ОБСТАНОВКАХ СУБДУКЦИИ, КОЛЛИЗИИ И СКОЛЬЖЕНИЯ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ

Компьютерная верстка Т.Б. Князева

Дальневосточный геологический институт ДВО РАН выражает искреннюю признательность и благодарность ООО "Термо Техно Инжиниринг" за финансовую поддержку VII Всероссийской конференции с международным участием "Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит".

Дальневосточный федеральный университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8.
Тел./факс: (423) 226-54-43, 265-24-24 (*2383)
E-mail: dvfutip@yandex.ru, editor_dvfu@mail.ru

Изготовитель CD-ROM
Дальневосточный федеральный университет
690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 8.

Подписано к использованию
Объем 58,1 Мб.