

УДК 551.1/4, 571.15, 552.12, 552.512

DOI: 10.24930/2500-302X-2024-24-4-686-709

Геологическое положение и вещественный состав песчаников лиственной и марчетинской свит засурьинской серии Горного Алтая

А. К. Крутикова^{1,2}, И. Ю. Сафонова^{1,3}, О. Т. Обут^{1,4}, А. А. Перфилова^{1,2},
И. А. Савинский¹, Н. В. Сенников^{1,4}, Б. Ган⁵

¹Новосибирский государственный университет, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1, e-mail: a.krutikova20@gmail.com

²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, г. Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3

³Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург,
ул. Академика Вонсовского, 15

⁴Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, г. Новосибирск,
пр-т Академика Коптюга, 3

⁵Юго-Западный университет Цзяотун, факультет наук о Земле и инженерной экологии, 611756, г. Чэнду, Китай

Поступила в редакцию 03.05.2023 г., принята к печати 07.12.2023 г.

Объект исследования. Песчаники лиственной и марчетинской свит засурьинской серии Горного Алтая. **Цель.** Реконструкция состава материнских пород и геодинамической позиции бассейна осадконакопления песчаников засурьинской серии. **Материалы и методы.** Исследовалось стратиграфическое положение граувакк в разрезах. Выполнены петрографические исследования, использованы концентрации породообразующих оксидов, полученных методом рентгенофлуоресцентного анализа. Проведена обработка и интерпретация полученных данных, построены классификационные диаграммы. **Результаты.** Описано геологическое положение песчаников лиственной (участок Молчаниха) и марчетинской (участок Марчета) свит, свидетельствующее об их принадлежности к аккреционному комплексу. Построены абрисы и вертикальные разрезы. По петрографическим и геохимическим данным песчаники соответствуют осадкам первого цикла седиментации – грауваккам. Среди материнских пород песчаников лиственной свиты преобладали гранитоиды и терригенные породы, второстепенные породы – вулканиды основного-среднего состава. Доминирующим материалом в области сноса для песчаников марчетинской свиты являлись вулканиды основного и среднего состава. **Выводы.** Интерпретация полученных геологических и геохимических данных показала, что граувакки лиственной и марчетинской свит образовались при разрушении внутриокеанической дуги, при этом песчаники лиственной свиты накапливались в задуговом бассейне, а песчаники марчетинской – в преддуговом.

Ключевые слова: Центрально-Азиатский складчатый пояс, Горный Алтай, засурьинская серия, поздний кембрий – ранний ордовик, граувакки

Источник финансирования

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-20022) и государственного задания Министерства науки и образования РФ (проекты 122041400044-2, ИГМ СО РАН и FSUS-2020-0039, НГУ)

Geological position and composition of sandstones in the Listvenny and Marcheta Formations of the Zasur'ya Series, Gorny Altai

Anastasia K. Krutikova^{1,2}, Inna Yu. Safonova^{1,3}, Olga T. Obut^{1,4}, Alina A. Perfilova^{1,2},
Ilya A. Savinskiy¹, Nikolay V. Sennikov^{1,4}, Baoping Gan⁵

¹Novosibirsk State University, 1 Pirogov st., Novosibirsk 630090, Russia, e-mail: a.krutikova20@gmail.com

²V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia

³A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia

⁴A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, SB RAS, 3 Academician Koptyug av., Novosibirsk 630090, Russia

⁵Faculty of Geosciences and Environmental Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

Received 03.05.2023, accepted 07.12.2023

Для цитирования: Крутикова А.К., Сафонова И.Ю., Обут О.Т., Перфилова А.А., Савинский И.А., Сенников Н.В., Ган Б. (2024) Геологическое положение и вещественный состав песчаников лиственной и марчетинской свит засурьинской серии Горного Алтая. *Литосфера*, 24(4), 686–709. <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-686-709>

For citation: Krutikova A.K., Safonova I.Yu., Obut O.T., Perfilova A.A., Savinskiy I.A., Sennikov N.V., Gan B. (2024) Geological position and composition of sandstones in the Listvenny and Marcheta Formations of the Zasur'ya Series, Gorny Altai. *Lithosphere (Russia)*, 24(4), 686–709. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/2500-302X-2024-24-4-686-709>

© А.К. Крутикова, И.Ю. Сафонова, О.Т. Обут, А.А. Перфилова, И.А. Савинский, Н.В. Сенников, Б. Ган, 2024

Research subject. Sandstones in the Listvenny and Marcheta Formations of the Zasur'ya Series, Gorny Altai. **Aim.** Reconstruction of the parent rocks and geodynamic position of the sedimentation basin of sandstones of the Zasur'ya Series. **Materials and Methods.** The stratigraphic position of greywackes was studied. Petrographic descriptions were carried out using whole-rock compositions obtained by X-ray fluorescence (XFR) analysis. The obtained data were analyzed; classification diagrams were compiled. **Results.** The geological position of the sandstones of the Listvenny Fm. (Molchanikha Locality) and Marcheta Fm. (Marcheta Locality) shows their sediments as part of an accretionary complex. Planar and vertical cross-sections for both localities were constructed. According to petrographic and geochemical data, the sandstones correspond to greywackes, i.e., first-cycle sedimentation rocks. The provenance of the Listvenny sandstones was dominated by intermediate and felsic rocks. The provenance of the Marcheta sandstones was dominated by mafic to intermediate igneous rocks. **Conclusions.** According to the studied geological and geochemical data, the greywackes of the Listvenny and Marcheta fms. were formed by destruction of an intra-oceanic arc. The sandstones of the Listvenny Fm. accumulated in a back-arc basin, and the sandstones of the Marcheta Fm. accumulated in a forearc basin.

Keywords: Central Asian Orogenic Belt, Gorny Altai, Zasur'ya Series, late Cambrian – early Ordovician, greywackes

Funding information

The study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 21-77-20022) and the state order of the Ministry of Science and Education of the Russian Federation (projects 122041400044-2, IGM SB RAN and FSUS-2020-0039, NSU)

ВВЕДЕНИЕ

Субдукция океанической коры и образование магматических и осадочных комплексов на конвергентных окраинах тихоокеанского типа являются важнейшими процессами в геологической истории Земли. С ними связан надсубдукционный магматизм внутриокеанических и континентальных дуг. Разрушение островодужных магматических пород и снос эродированного материала в преддуговой бассейн и глубоководный желоб, в меньшей степени – в задуговой бассейн, приводит к формированию характерных обломочных пород – граувакк, в том числе и в составе турбидитовой ассоциации. Позже, в ходе океанической субдукции, такие песчаники могут входить в состав аккреционных комплексов (Isozaki et al., 1990; Wakita, Metcalfe, 2005; Kemkin et al., 2016; Safonova et al., 2021, 2022). По составу песчаники, связанные с разрушением внутриокеанических дуг, практически идентичны магматическим породам дуг, представленных в области сноса. При этом при субдукции и закрытии океана магматические дуги могут быть частично или даже полностью утрачены из геологической летописи вследствие поверхностной или субдукционной эрозии (Сафонова, Ханчук, 2021). В отличие от них большая часть песчаников и ассоциирующихся с ними осадочных пород остается на поверхности, позволяя нам определить природу бывшей магматической дуги. Например, если в состав песчаников входят обломки пород, соответствующих основным и средним магматическим сериям, то исходная дуга, вероятно, была внутриокеанической. Другой пример: если петрографический состав песчаников указывает на доминирование в области сноса андезитов и более кислых разностей, то разрушалась, скорее всего, континентальная дуга или активная континентальная окраина (Dickinson, Suczek, 1979; Bhatia, Crook, 1986; и др.).

Во внутриконтинентальных орогенах, таких как Центрально-Азиатский складчатый пояс (ЦАСП) – крупнейший фанерозойский аккреционный ороген мира, образованный в ходе эволюции и закрытия Палеоазиатского океана (ПАО) (Зоненшайн и др., 1990; Dobretsov et al., 1995; Buslov et al., 2001; Windley et al., 2007; Safonova et al., 2011; Kröner et al., 2014; и др.), песчаники входят в состав всех аккреционных комплексов (Перфилова и др., 2022а, б; Safonova et al., 2021, 2022; Konopelko et al., 2021; и др.) или образуют мощные турбидитовые толщи глубоководных бассейнов (Kruk et al., 2017). Для северо-западной части Горного Алтая таких данных о вещественном составе ранее не получено.

В данной статье представлены первые данные по песчаникам засурьинской серии Горного Алтая (лиственная и марчетинская свиты). Актуальность изучения геологического положения и состава песчаников засурьинской серии обусловлена необходимостью уточнения взаимоотношений песчаников с глубоководными кремнистыми осадками – ленточными кремнями, кремнистыми аргиллитами и алевролитами, определения состава и геодинамических обстановок формирования пород в питающей провинции, а также бассейнов осадконакопления.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА РЕГИОНА

Образования засурьинской серии распространены в пределах Чарыш-Теректинской зоны северо-западной части Горного Алтая (рис. 1), находящегося в западной части Алтае-Саянской складчатой области (АССО). В свою очередь, АССО расположена в северо-западной части ЦАСП (Зоненшайн и др., 1990; Buslov et al., 2001; Dobretsov et al., 2003; Safonova, 2009). Многими исследователями АССО рассматривается как аккреционно-

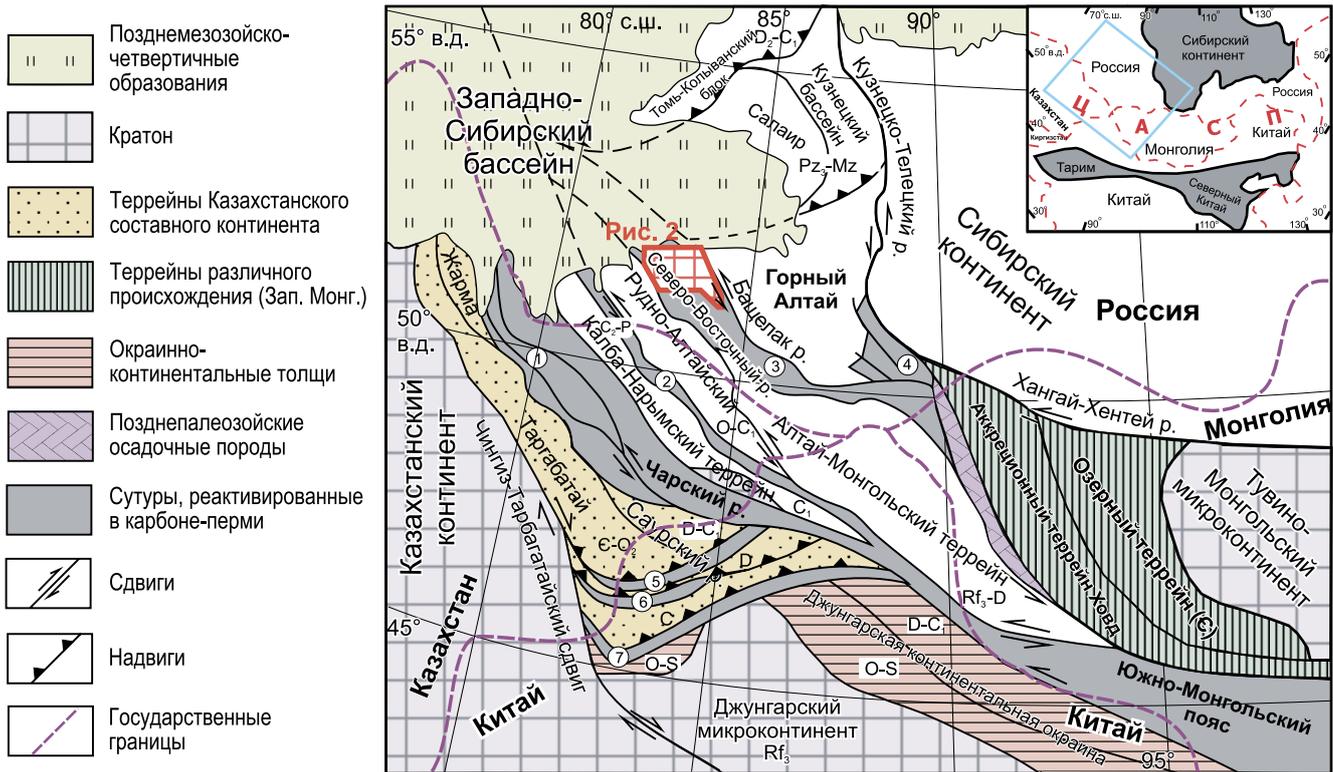


Рис. 1. Тектоническая схема западной части Алтае-Саянской складчатой области.

Цифрами в кружках отмечены сутурные зоны, по (Buslov et al., 2001): 1 – Чарская, 2 – Иртышская, 3 – Чарыш-Теректинская, 4 – Курайская, 5 – Барлик-Хонгулен, 6 – Майли, 7 – Далабутэ; р. – разлом.

Fig. 1. Tectonic scheme of the western Altai-Sayan folded area.

The numbers in the circles indicate the suture zones, according to (Buslov et al., 2001): 1 – Chara, 2 – Irtysh, 3 – Charysh-Terekta, 4 – Kurai, 5 – Barlik-Khongulen, 6 – Mailskaya, 7 – Dalabute; p. – fault.

коллизийный пояс, сформированный в зоне сочленения Сибирского и Казахстанского палеоконтинентов (Зоненшайн и др., 1990; Берзин и др., 1994; Буслов и др., 2000, 2003; Buslov et al., 2001; Dobretsov et al., 2003; Safonova et al., 2004, 2011; Safonova, Santosh, 2014; и др.). ACCO характеризуется мозаичной структурой, в которой выделяются фрагменты океанической коры в составе аккреционных комплексов, островодужные террейны неопротерозой–раннепалеозойского возраста и древние микроконтиненты (см. рис. 1). Различные террейны ACCO разделены разновозрастными сдвигами, сформированными в результате закрытия ПАО и последующих коллизийных и орогенных процессов (Buslov et al., 2001; Буслов и др., 2003). В эволюции структур ACCO отражены два крупных коллизийных этапа: позднедевонско-раннекаменноугольный и позднекаменноугольно-пермский, соответственно связанные со столкновением Алтае-Монгольского террейна с Сибирским континентом, а затем Казахстанского и Сибирского континентов (Буслов, 1998). В результа-

те коллизии в зоне столкновения Сибирского и Казахстанского континентов активизировались левосторонние сдвиги с амплитудой в сотни километров, которые завершили формирование сутурных зон: Чарской, Иртышской, Чарыш-Теректинской, Курайской, Барлик-Хонгулен, Майли и Далабутэ (см. рис. 1) (Буслов и др., 2003).

Чарыш-Теректинская сутурная зона является одной из главных тектонических структур северо-западного Горного Алтая. Она находится в зоне сочленения Горно-Алтайского, Рудно-Алтайского и Алтае-Монгольского террейнов (см. рис. 1), простираясь на 740 км при ширине до 120 км. От Горно-Алтайского террейна она отделена Башчелацким разломом, а от Рудно-Алтайского и Алтае-Монгольского – Северо-Восточным разломом (см. рис. 1). Чарыш-Теректинская зона включает в себя фрагменты океанической коры ПАО раннепалеозойского возраста (Буслов и др., 1999, 2000; Buslov et al., 2001; Сенников и др., 2001, 2003; Safonova et al., 2011). Образования засурьинской серии образуются в ходе раннепалеозойской эволюции ПАО.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ, СОСТАВ И ВОЗРАСТ ЗАСУРЬИНСКОЙ СЕРИИ

В середине прошлого века в северо-западной части Горного Алтая засурьинская серия выделялась в качестве подсвиты в составе пестроцветной свиты (Тихонов, 1956). Позже при крупномасштабной геологической съемке региона (1979–1990 гг.) установлена сильная дислоцированность всех толщ, что сделало невозможным определение четких взаимоотношений выделенных ранее стратиграфических подразделений и, следовательно, их геологического возраста. Позднекембрийско-раннеордовикский возраст пород засурьинской свиты установлен на основании микропалеонтологических данных из кремней и кремнистых аргиллитов как аксайский-флоский века (Ивата и др., 1997). Учитывая сложное строение и значительную продолжительность формирования отложений свиты, Н.В. Сенников с коллегами предложили использовать это подразделение в ранге серии с делением его на три самостоятельные свиты (снизу вверх): листовенную, талицкую и марчетинскую (Сенников и др., 2001). По микропалеонтологическим находкам определены возрасты всех свит засурьинской серии (Сенников и др., 2003, 2011), но их точные возрастные границы остаются неизвестными, так как не все из верхних и нижних горизонтов свит надежно охарактеризованы микрофауной. Более того, микрофаунистические остатки найдены только в глубоководных кремнистых осадочных породах (кремни и кремнистые аргиллиты), хотя в состав засурьинской серии входят также алевролиты, песчаники и эффузивные породы.

С точки зрения литологического состава и возраста пород в северо-западной части Чарыш-Теректинской зоны выделено три структурно-фациальные зоны (с запада на восток): Чарышско-Инская, Талицкая и Ануйско-Чуйская (рис. 2) (Ивата и др., 1997; Сенников и др., 2001, 2003, 2011, 2018). Чарышско-Инская зона представляет собой терригенно-флишoidalный комплекс, включающий в себя черносланцевые образования маралихинской свиты (С?), зеленоцветные терригенные отложения чарышской свиты (С₂), базальты, кремнистые и терригенные отложения листовенной свиты (С₃) засурьинской серии (Сенников и др., 2011). Пестроцветные песчаники, реже алевролиты, гравелиты, конгломераты относятся к суеткинской свите (О₁, тремадокский ярус). Начиная с середины флоского яруса разрез ордовика представлен непрерывной последовательностью терригенных, реже терригенно-карбонатных и карбонатных (в том числе рифогенных) образований воскресенской, бугрышихинской, ханхаринской, техтеньской свит, низов свиты Вторых Утесов, охарактеризованных комплексами пелагических и бентосных групп фауны (Сенников и др., 2018). Талицкая зона сло-

жена отложениями нижнего ордовика, входящими в состав талицкой (тремадокский ярус) и марчетинской (флоский ярус) свит засурьинской серии. В состав Ануйско-Чуйской зоны входят ордовикские отложения, сходные с таковыми Чарышско-Инской единицы. Но отложения, условно отнесенные к тремадокскому ярусу (О₁), представлены пестроцветными песчаниками, реже алевролитами, гравелитами, конгломератами суеткинской и текелинской свит, палеонтологически не охарактеризованы. В северной части зоны выделяются базальты, кремни и сероцветные песчаники марчетинской свиты (О₁) и грубообломочная булхутинская свита катийского яруса (О₃) (Сенников и др., 2018). Отложения засурьинской серии представлены во всех трех зонах (см. рис. 2) и имеют тектонические контакты со смежными геологическими структурами иного возраста и происхождения (Буслов и др., 1999, 2000). Ранее изучены магматические породы (Буслов и др., 1999; Buslov et al., 2001; Safonova et al., 2011) и биостратиграфия глубоководных осадочных пород (кремней, кремнистых аргиллитов) (Ивата и др., 1997; Сенников и др., 2001, 2003) засурьинской серии.

Нижняя листовенная свита состоит из базальтов, кремней, кремнистых аргиллитов, алевролитов и песчаников. Стратиграфически выше базальтов залегают пачки красноцветных кремней, которые перекрываются красными и серыми аргиллитами и алевролитами, переслаивающимися с песчаниками серо-зеленого цвета (рис. 3) (Сенников и др., 2011; Safonova et al., 2011). В кремнях фиксируется микрослоистость (от 0.01–0.02 до 1–2 мм; ленточные кремни), образующаяся за счет красного и коричневого оттенков пород. Границы как между слоями кремней, так и между их слоями и микрослоями относительно четкие, субпараллельные, свидетельствующие об отсутствии волнового воздействия и придонных течений. Оползневые текстуры, конседиментационная асимметричная микроскладчатость (Z-складки) и полусферические отдельные диаметром 10–20 см в кремнях и кремнистых аргиллитах предполагают оползание полулитофицированного осадка по склонам океанических островов (Сенников и др., 2003; Safonova et al., 2011).

Согласно (Ивата и др., 1997; Buslov et al., 2001; Safonova et al., 2011), по геохимическим критериям базальты относятся к типу MORB (middle oceanic ridge basalt/базальты срединно-океанических хребтов) и OIB (oceanic island basalt/базальты океанических островов). Лиственная свита палеонтологически охарактеризована конодонтами и радиолариями аксайского и батырбайского веков позднего кембрия, найденными в красноцветных кремнях (Сенников и др., 2003). Нами проанализированы детритовые цирконы из образца песчаника с участка Молчаниха (см. рис. 2). Распреде-

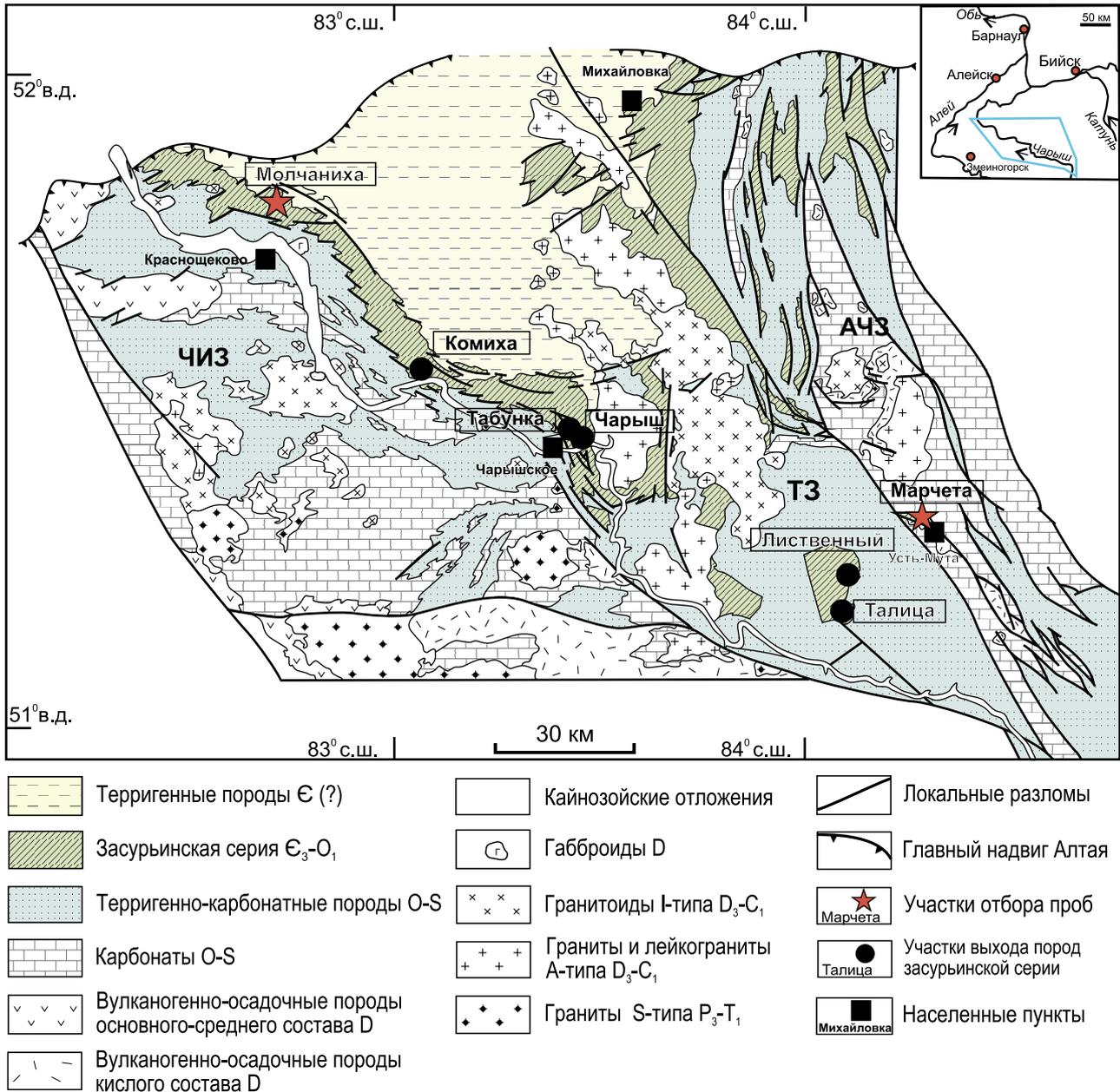


Рис. 2. Геологическая схема северной части Чарыш-Теректинской сдвиговой зоны.

Показаны взаимоотношения образований океанического происхождения засурийской серии и шельфовых осадочных толщ и интрузивных комплексов структурно-фациальных зон северо-западного Горного Алтая: Чарышско-Инской (ЧИЗ), Талицкой (ТЗ) и Ануйско-Чуйской (АЧЗ), по (Сенников и др., 2003).

Fig. 2. Geological scheme of the northern Charysh-Terekta suture-shear zone.

The relationships between oceanic units of the Zasu'rya Series and shelf sedimentary rocks and magmatic complexes of other structural-formation zones of north-western Gorny Altai are shown: Charysh-Inya (ЧИЗ), Talitsa (ТЗ), Anui-Chua (АЧЗ), according to (Sennikov et al., 2003).

ние U-Pb возрастов имеет унимодальный характер с пиком на уровне 488 млн лет. Присутствуют единичные зерна с докембрийскими возрастами. Максимальный возраст осадконакопления (MDA, maximum deposition age), который оценивается по самым молодым возрастным группам цирконов из

песчаников, составляет примерно 465 ± 5 млн лет (Крутикова и др., 2023). Талицкая свита относится к средней части засурийской серии и представляет собой чередование пачек серых, зеленых и редко пестрых аргиллитов, алевролитов и песчаников (см. рис. 3).

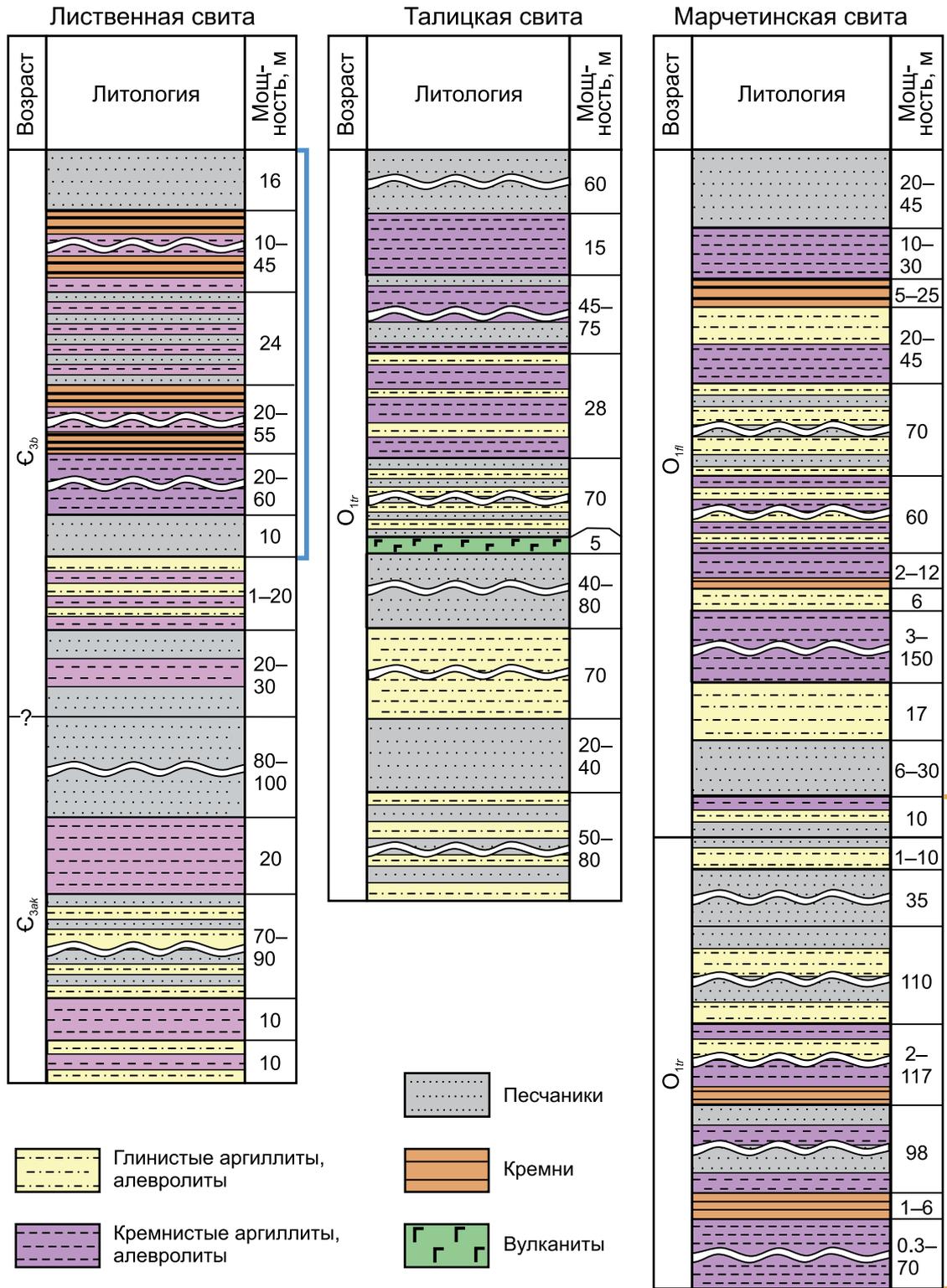


Рис. 3. Обобщенные стратиграфические колонки пород засурьинской серии, составлены по материалам (Сенников и др., 2011).

Линиями отмечено стратиграфическое положение участков: синяя – участок Молчаниха, оранжевая – участок Марчета.

Fig. 3. Generalized stratigraphic columns of the Zasur'ya Series, based on (Sennikov et al., 2011).

The blue and orange lines indicate the stratigraphic position of the sections under study at the Molchanikha and Marcheta localities, respectively.

В подчиненном количестве находятся базальты, которые также соответствуют типу OIB (Ивата и др., 1997; Buslov et al., 2001; Safonova et al., 2011). Раннеордовикский возраст свиты определен по радиоляриям и конодонтам тремадокского века в кремнистых аргиллитах из верхней части свиты (Сенников и др., 2011). Марчетинская свита состоит из кремней, аргиллитов, алевролитов, песчаников и редких прослоев туфопесчаников (см. рис. 3) (Ивата и др., 1997; Buslov et al., 2001; Safonova et al., 2011). В осадочных породах также присутствуют следы подводно-оползневых явлений (Сенников и др., 2001; Safonova et al., 2011). Возраст свиты определен по находкам конодонтов и радиолярий как тремадокский–флоский века нижнего ордовика (Сенников и др., 2011, 2015; Obut, 2023). Для образца песчаника марчетинской свиты с участка Марчета также получено унимодальное распределение U-Pb возрастов с пиком на уровне 485 млн лет, но без докембрийских зерен. MDA составляет 464 ± 5 млн лет (Крутикова и др., 2023).

Осадочные породы всех трех свит представляют собой образования, соответствующие последовательности стратиграфии океанической плиты (СОП) от базальтов океанического дна и океанических поднятий до пелагических осадков (ленточные, радиоляриевые кремни), гемипелагических отложений (кремнистые аргиллиты, алевролиты, сланцы) и, наконец, обломочных пород глубоководного желоба (аргиллиты, алевролиты, песчаники, конгломераты) (Izosaki et al., 1990; Wakita, Metcalfe, 2005; Safonova, 2009; Maruyama et al., 2010; Wakita, 2012; Kusky et al., 2013; Safonova, Santosh, 2014; и др.). Магматические и осадочные образования СОП соответственно изливались или отлагались на океаническом дне по мере движения океанической плиты от места зарождения океани-

ческой коры в зоне срединно-океанического хребта до ее поглощения в зоне субдукции. И если океаническое происхождение базальтов и кремнистых осадков (пелагических и гемипелагических) засурьинской серии уже давно и надежно обосновано (Ивата и др., 1997; Buslov et al., 2001; Safonova et al., 2011; Сенников и др., 2011, 2015; Obut, 2023), то вещественный состав песчаников и условия их осадконакопления оставались неизученными. В работе представлены первые результаты изучения песчаников листовенной и марчетинской свит засурьинской серии (табл. 1).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При изучении песчаников засурьинской серии особое внимание уделено полевым работам, в ходе которых уточнялись их взаимоотношения с другими образованиями засурьинской серии на основе детальных описаний разрезов и картирования. В рамках изучения их петрографического состава проведен подсчет зерен в шлифах в количестве не менее 300 зерен/обломков для каждого образца классическим методом вдоль параллельных линий (Ingersoll et al., 1984; Weltje, 2002). Учитывались зерна моно- и поликристаллического кварца (Qm , Qp), плагиоклаза (Pl), калиевого полевого шпата (Kfs), обломки вулканических (Lv), осадочных (Ls) и метаморфических (Lm) пород. К монокристаллическим разновидностям кварца относятся зерна, состоящие из одного кристалла, к поликристаллическим – агрегаты кристаллов (Pettijohn et al., 1972). Количество каждого вида обломков переводилось на процентное содержание, рассчитывались суммы зерен кварца ($Qt = Qm + Qp$), полевых шпатов ($F = Kfs + Pl$) и фрагментов обломков пород ($R = Qp + Ls + Lv + Lm$).

Таблица 1. Общая характеристика песчаников листовенной и марчетинской свит

Table 1. Description of sandstones of the Listvenny and Marcheta formations

Участок (свита)	Образец	Литология	Координаты	
			Широта, N	Долгота, E
Молчаниха (лиственная)	SSS-4-1	Мелко- и среднезернистые песчаники	51°44'54.0"	82°47'29.5"
	SSS-4-2	То же	51°44'54.0"	82°47'29.5"
	MOL-20-01	Средне- и крупнозернистые песчаники	51°45'00.6"	82°47'35.5"
	MOL-20-02	Мелко- и среднезернистые песчаники	51°45'00.6"	82°47'35.5"
	MOL-20-03	То же	51°45'05.9"	82°47'33.9"
	Zs-06-21	—	51°44'55.1"	82°47'29.7"
	Zs-07-21	—	51°45'00.5"	82°47'36.1"
Марчета (марчетинская)	MR-20-01	Мелко- и среднезернистые песчаники	51°14'59.1"	84°43'3.3"
	MR-20-02/2	Крупнозернистые песчаники	51°15'00.6"	84°42'59.7"
	MR-20-04	Средне- и крупнозернистые песчаники	51°15'07.4"	84°42'44.7"
	Zs-14-21	Среднезернистые песчаники	51°14'59.8"	84°43'02.8"
	Zs-15-21	То же	51°15'00.2"	84°43'10.5"
	MR-21-01	Крупнозернистые песчаники	51°15'23.7"	84°43'38.6"
	MR-21-03	Мелко- и среднезернистые песчаники	51°15'24.6"	84°43'38.5"

Анализ вещественного состава песчаников выполнен в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований (ЦКП МИИ) ИГМ СО РАН. Концентрации породообразующих оксидов (SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 (общ.), MnO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , п.п.п. – потери при прокаливании, сумма) определены методом рентгенофлуоресцентного анализа (РФА) на рентгеновском спектрометре ARL-9900 XL, Швейцария (аналитик Н.Г. Карманова). Погрешность определения не превышает таковую для второй категории точности по третьему классу точности с нижними границами определяемых содержаний 0.1–0.00n % (ОСТ 41-08-205-99). Потери при прокаливании и содержания CaO в образцах незначительны, поэтому дополнительные пересчеты не были выполнены.

Для классификации песчаников по их вещественному составу и определения геодинамических обстановок формирования пород в области сноса использовались как наиболее популярные, традиционные и неоднократно показавшие свою надежность диаграммы на основе петрографических данных (Шутов, 1967; Dickinson et al., 1983) и геохимических данных (Pettijohn et al., 1972; Nesbitt, Young, 1982; Cox, Lowe, 1995), так и новые диаграммы (Garzanti, 2019). Ранее эти диаграммы многократно использованы соавторами при публикации результатов изучения граувакк из аналогичных структур других регионов ЦАСП (Konopelko et al., 2021; Safonova et al., 2021, 2022; Перфилова и др., 2022а, б). Для оценки степени выветривания пород в области сноса и зрелости осадков использовались геохимические индексы CIA (Chemical Index of Alteration, химический индекс выветривания) (Nesbitt, Young, 1982) и ICV (Index of Chemical Variability, индекс вариабельности состава) (Cox, Lowe, 1995). Для пород с низкой степенью выветривания характерны значения $\text{CIA} < 70$, тогда как значения $\text{CIA} > 70$ указывают на значительное выветривание в области сноса. Значение индекса зрелости осадков $\text{ICV} > 1$ предполагает высокое содержание неглинистых силикатных минералов в отложениях, тогда как значения $\text{ICV} < 1$ указывает на высокое содержание глинистых минералов. Также использовались петрохимические модули для оценки наличия обломков вулканических пород основного состава (Юдович, Кетрис, 2000).

ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ УЧАСТКОВ МОЛЧАНИХА И МАРЧЕТА

Участок Молчаниха

Участок Молчаниха расположен в 10 км на С-СВ от пос. Краснощеково на левом борту р. Молчаниха (см. рис. 2, 4а). В пределах участка распространены образования листовенной свиты: ленточные и

массивные кремни, кремнистые аргиллиты и песчаники, визуально похожие на граувакки – серые или зеленые, плохо сортированные, с плохо окатанными обломками (см. табл. 1, рис. 5, 6). Разрез начинается с мелко- и среднезернистых темно-серых песчаников, которые перекрыты мощными толщами коричневых и серо-зеленых сильно рассланцованных кремнистых аргиллитов (см. рис. 5). В средней части разреза находятся массивные, местами ленточные, темно-красные кремни (см. рис. 4б). Микропалеонтологические находки конодонтов и радиолярий определяют возраст свиты как батырбайский век позднего кембрия (Сенников и др., 2011). В верхней части разреза доминируют коричневые и красные массивные кремни и зеленые, местами красные, кремнистые аргиллиты (см. рис. 4в). Далее наблюдается ритмичное чередование темно-серых плохо сортированных среднезернистых песчаников с блочной отдельностью и сильно рассланцованных аргиллитов (см. рис. 4г). Толщи аргиллитов сильно деформированы в результате левостороннего сдвига (см. рис. 4д), трещины заполнены кварцем и оксидами железа. Завершают разрез серые мелкозернистые песчаники (см. рис. 5). Все пачки кремней, аргиллитов и песчаников крутопадающие с азимутом падения на Ю-ЮВ и чередуются между собой. Контакты между пачками визуально скрыты в местах задернованных понижений рельефа, поэтому мы их рассматриваем в качестве тектонических и проводим границы между пачками условно посередине таких понижений рельефа. Изученные песчаники отобраны из нижних и верхних частей разреза (см. рис. 5, 6).

Участок Марчета

Участок Марчета расположен в районе пос. Усть-Мута (см. рис. 2). Изучен разрез марчетинской свиты на левом борту р. Марчета (рис. 7а). Образования свиты представлены кремнями, аргиллитами, алевролитами и песчаниками (см. табл. 1, рис. 8, 9). Разрез начинается с ленточных кремней (см. рис. 7б) и тонкослоистых кремнистых аргиллитов светло-коричневого цвета (см. рис. 7в, 8, 9). Выше по разрезу они сменяются коричнево-серыми и зеленоватыми кремнистыми и глинистыми аргиллитами (см. рис. 8). Далее наблюдается толща темно-красных массивных кремней с обильными вкраплениями гематита, образующих холмы высотой до 6 м и шириной 40–50 м. Прямые контакты с вмещающими алевролитами хорошо прослеживаются. Выше по разрезу фиксируются мелкозернистые песчаники со слоистой текстурой (см. рис. 7г, 8), а более крупнозернистые разновидности имеют массивную текстуру с блочной отдельностью. Отмечено ритмичное переслаивание глинистых аргиллитов и песчаников. Аргиллиты и мелкозернистые песчаники с текстурами оползания осадка, в

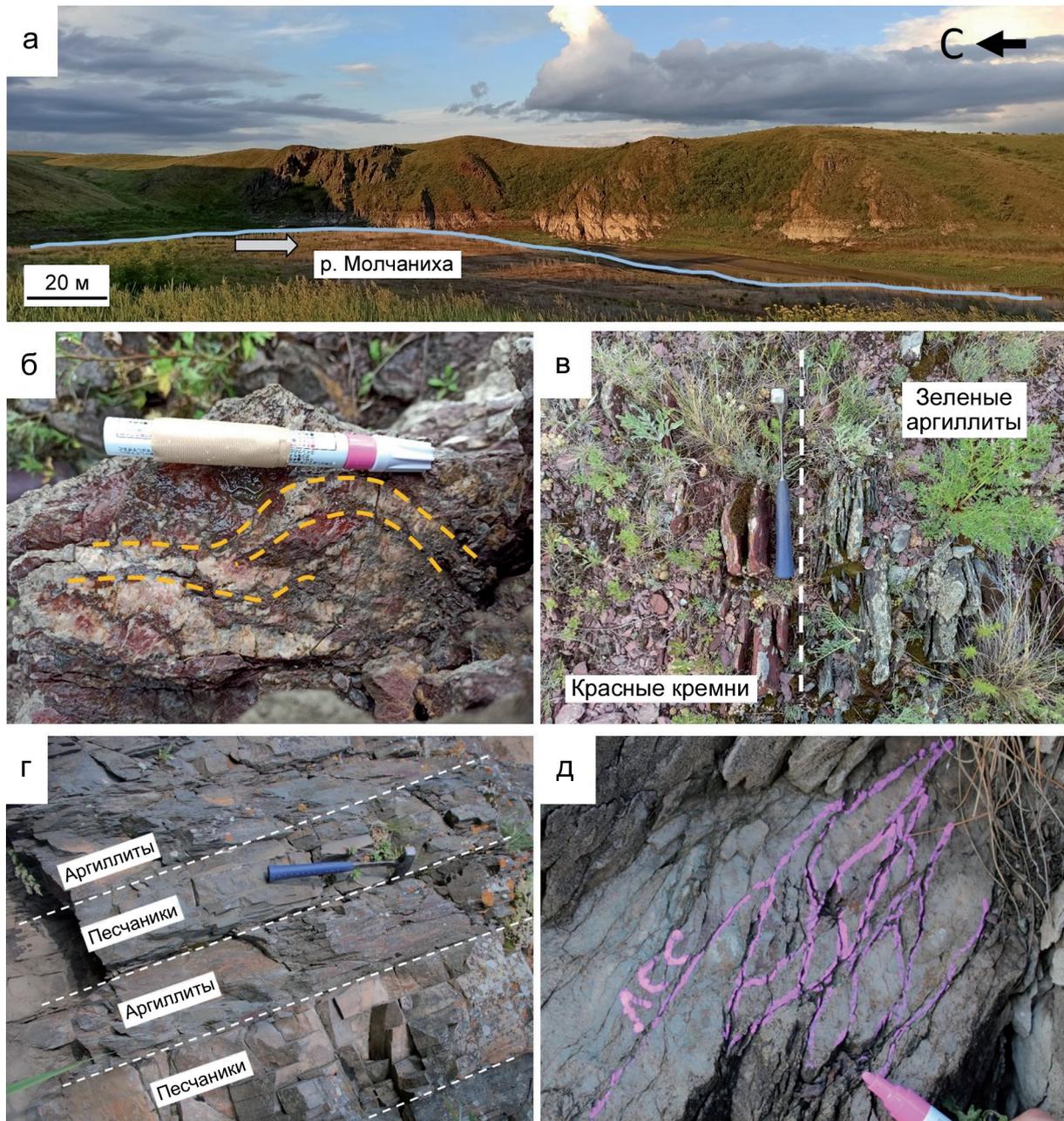


Рис. 4. Полевые фотографии участка Молчаниха.

а – общий вид; б – ленточные кремни; в – контакт красных кремней и зеленых аргиллитов; г – песчаники, переслаивающиеся с кремнистыми аргиллитами; д – деформации в кремнистых аргиллитах (левосторонний сдвиг).

Fig. 4. Field photos of the Molchanikha Locality.

а – overview; б – ribbon chert; в – contact between red-brown chert and green mudstone; г – rhythmically bedded sandstones and mudstones; д – sinistral strike-slip deformations in siliceous mudstones.

более крупнозернистых разностях зафиксированы класты аргиллитов (см. рис. 7г). Такие текстуры и взаимоотношение литотипов характерны для турбидитов. Серо-зеленые разнозернистые песчаники отличаются низкой степенью сортировки материала, а зеленые аргиллиты сильно рассланцованы.

В кремнистых аргиллитах наблюдаются складки оползания. На более крупных обнажениях хорошо видны дуплекс-структуры, сформированные в результате правостороннего сдвига (см. рис. 7д). Далее по разрезу обнажаются темно-красные кремнистые аргиллиты, возраст которых определен по ко-

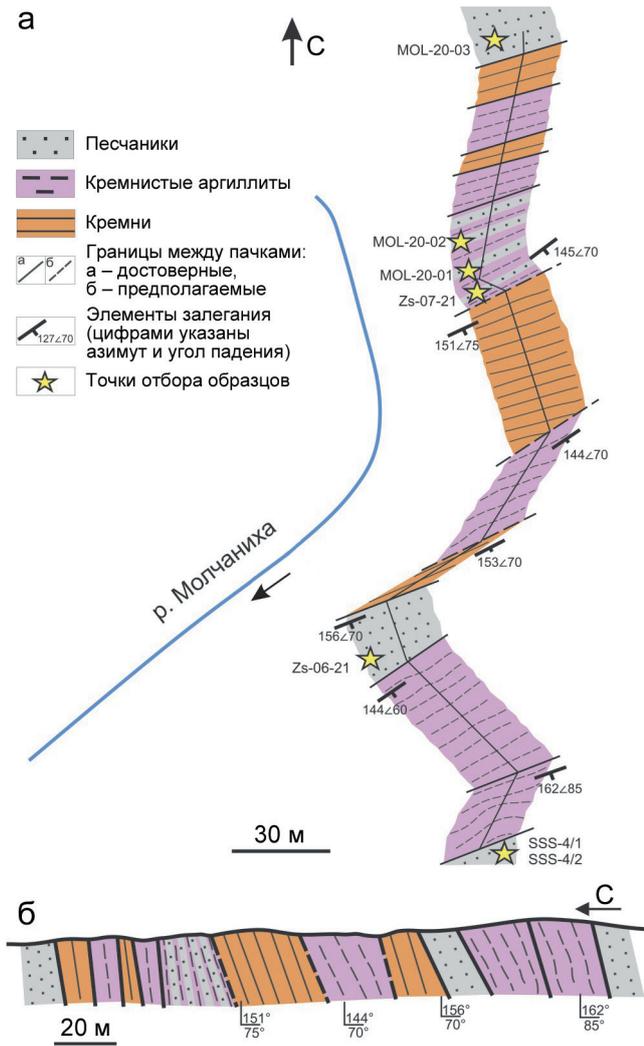


Рис. 5. Геологические схемы для участка Молчаниха.

а – абрис с точками отбора образцов, б – вертикальный разрез.

Fig. 5. Geological schemes for the Molchanikha Locality.

а – planar cross-section with sampling points, б – vertical cross-section.

нодонтам и радиоляриям в интервале тремадокского и флоского веков раннего ордовика (см. рис. 9) (Сенников и др., 2011; Obut, 2023). Темно-красные кремнистые аргиллиты сменяются серыми глинистыми аргиллитами, азимут простирания которых меняется от 80 до 0° (см. рис. 8а). Резкое изменение элементов залегания и геоморфологические особенности рельефа предполагают наличие разломной зоны (см. рис. 8а).

Выше разлома наблюдается переслаивание мелкозернистых песчаников и сильно рассланцованных зеленых аргиллитов, которые примыкают к

тектоническому контакту с углом падения слоев 65° и азимутом падения 245° (см. рис. 8а). Разрез завершает толща глинистых алевролитов светло-зеленого цвета. Азимут падения толщ – на ЮВ, углы падения меняются от 45–50° до практически вертикальных (80–85°) (см. рис. 8б). Изученные песчаники отобраны преимущественно из средней и в меньшей степени из верхней части разреза (см. рис. 9).

ПЕТРОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕСЧАНИКОВ

Серые или темно-серые песчаники с участка Молчаниха (см. рис. 5, 6) представлены мелко- и среднезернистыми плохо сортированными разновидностями (рис. 10а, б). Цемент отсутствует, общий объем порового обломочного матрикса не превышает 15% от площади шлифа (см. рис. 10а). Зерна встречаются от неокатанных до полуокатанных. Породообразующая часть состоит из обломков вулканических (20–36% от общего количества диагностированных обломков) и осадочных (кремни, кремнистые аргиллиты; 16–28%) пород, полевых шпатов (16–29%) и кварца (18–35%). Кварц представлен моно- (13–25%) и поликристаллическими (5–15%) разновидностями с волнистым и блочным погасанием соответственно. Плохо окатанные таблитчатые зерна плагиоклазов (10–19%) имеют полисинтетическое двойникование. Для более крупных полуокатанных разновидностей характерна серицитизация. Калиевые полевые шпаты представлены микроклином (6–10%), местами с микроклиновой решеткой. По отдельным зернам развита пелитизация.

Обломки вулканических пород, преимущественно базальты и андезиты, имеют гиалопелитовую, интерсентальную, микролитовую структуры. Порфировые вкрапленники представлены крупными таблитчатыми зернами плагиоклаза, беспорядочно или одинаково ориентированным и погруженными в стекловатый базис. Также присутствуют обломки кислых пород с незакономерными сростками кварца, полевых шпатов и слюды и гранитной структурой (не более 11%). Из аксессуарных минералов встречаются циркон, сфен, оксиды железа, эпидот, мусковит и хлорит. По классификации В.Д. Шутова (1967), песчаники соответствуют полевошпатовым и кварц-полевошпатовым грауваккам (рис. 11).

Песчаники с участка Марчета (см. рис. 7–9) зеленые и зеленовато-серые средне- и крупнозернистые (см. рис. 10в, г). Поровый матрикс сложен тонкозернистым обломочным материалом. Его количество составляет не более 20% от площади шлифа. Степень сортировки материала слабая. Обломочная часть представлена породами магматического (24–49%) и осадочного (14–24%) происхо-

№ пачки	Мощность, м	Литология
13	16	Песчаники мелкозернистые серые
12	13	Кремни темно-красные, массивные
11	12	Аргиллиты кремнистые коричневые, выше по разрезу переходят в зеленые сильнорассланцованные
10	7	Кремни коричневые, массивные
9	10	Аргиллиты кремнистые зеленые, выше по разрезу переходят в красные
8	24	Ритмичное переслаивание аргиллитов кремнистых серых с фиолетовым оттенком и песчаников мелко- и среднезернистых серо-зеленых
7	36	Кремни темно-красные, массивные, местами ленточные, содержат скелеты радиолярий
6	30	Аргиллиты кремнистые зеленые, сильно-рассланцованные
5	17	Кремни темно-коричневые, массивные
4	15	Песчаники мелко- и среднезернистые серые
3	26	Аргиллиты кремнистые серо-зеленые
2	24	Аргиллиты кремнистые коричневые, сильно-рассланцованные
1	10	Песчаники мелко- и среднезернистые темно-серые

Рис. 6. Литологическая колонка для участка Молчаниха с точками отбора образцов.

Пояснения – см. рис. 5.

Fig. 6. Lithological column of the Molchanikha Locality with sampling points.

Explanations – see Fig. 5.

ждения, плагиоклазом (14–21%), калиевым полевым шпатом (1–15%), моно- (7–17%) и поликристаллическим кварцем (4–7%) (см. рис. 11). Мономинеральные зерна кварца имеют волнистое погасание и низкую степень окатанности. Кристаллокласты плагиоклазов плохой окатанности, без вторичных изменений, с тонким полисинтетическим двойникованием или же частично серицити-

зированы. Обломки осадочных пород представлены кремнями, кремнистыми аргиллитами и мелкозернистыми песчаниками. Эффузивы имеют основной и средний состав, также с порфирами вкрапленниками плагиоклазов. Обломки гранитоидов находятся в резко подчиненном количестве (не более 6%). По классификации В.Д. Шуртова (1967), песчаники марчетинской свиты соот-

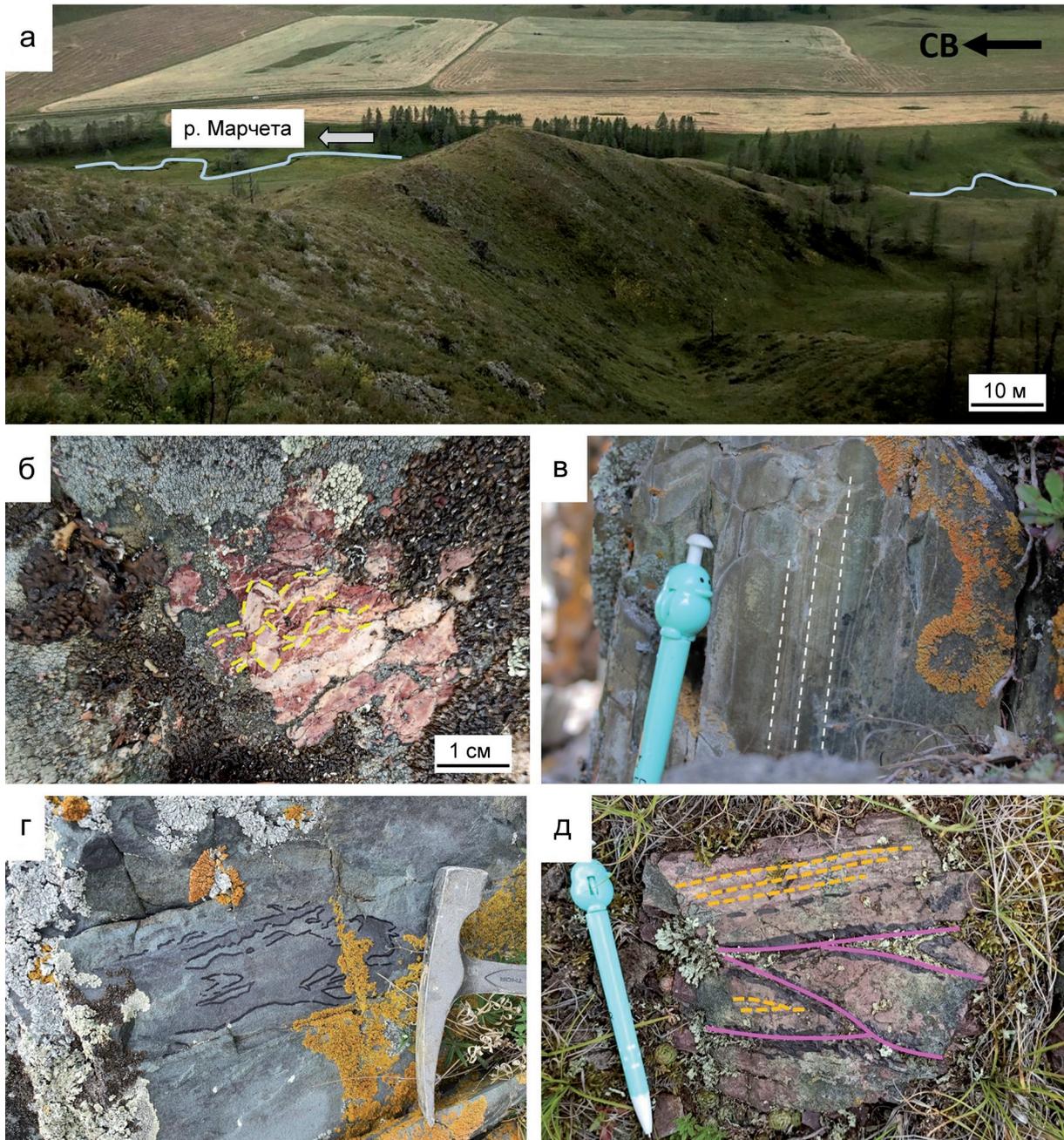


Рис. 7. Полевые фотографии участка Марчета.

а – общий вид; б – ленточные кремни; в – тонкослоистые аргиллиты; г – класты аргиллитов в песчаниках; д – контакт ленточных кремнистых аргиллитов (желтые линии) и аргиллитов, деформированных правосторонним сдвигом (розовые линии).

Fig. 7. Field photos of the Marcheta Locality.

а – overview; б – ribbon chert; в – thin-bedded mudstone; г – mudstone rip-up clasts in sandstones; д – bedded siliceous mudstone (yellow lines) in contact with deformed mudstone, dextral strike-slipping (pink lines).

ветствуют кварц-полевошпатовым грауваккам (см. рис. 11). Акцессорные минералы во всех образцах представлены цирконом, сфеном, оксидами железа, эпидотом, мусковитом и хлоритом. Таким об-

разом, серые или зеленые песчаники лиственничной и марчетинской свит с низкой сортировкой и окатанностью обломков по петрографическому составу являются граувакками.

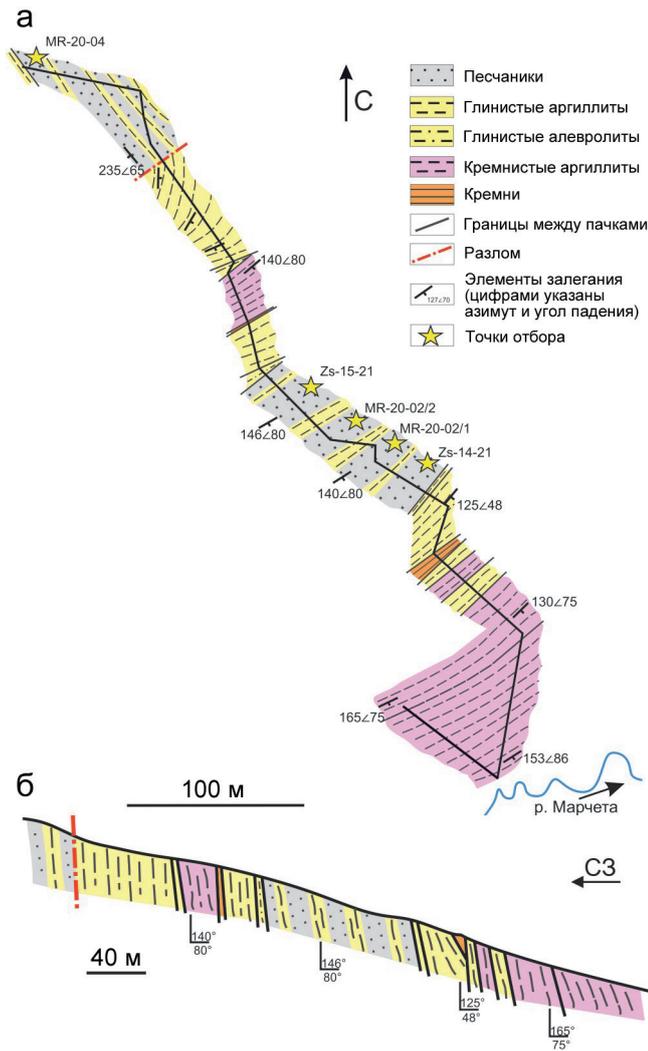


Рис. 8. Геологические схемы для участка Марчета.

а – абрис с точками отбора образцов, б – вертикальный разрез.

Fig. 8. Geological schemes for the Marcheta Locality.

а – planar cross-section with sampling points, б – vertical cross-section.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕСЧАНИКОВ

Геохимическая характеристика песчаников лиственной и марчетинской свит засурьинской серии проведена на основе 14 химических анализов породообразующих оксидов. Для песчаников лиственной свиты отмечаются следующие содержания породообразующих оксидов: $\text{SiO}_2 = 64.8\text{--}70.3$, $\text{TiO}_2 = 0.7\text{--}1.1$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = 12.0\text{--}14.5$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 5.2\text{--}$

7.0 , $\text{MgO} = 1.8\text{--}2.6$ мас. %. Для песчаников марчетинской свиты характерны более низкие концентрации SiO_2 ($55.1\text{--}65.4$ мас. %), сходные концентрации TiO_2 ($0.7\text{--}1.2$ мас. %) и повышенные Al_2O_3 ($14.1\text{--}18.0$ мас. %), Fe_2O_3 ($6.7\text{--}8.8$ мас. %), и MgO ($2.8\text{--}4.0$ мас. %) (табл. 2). На классификационной диаграмме Петтиджона (Pettijohn et al., 1972) точки составов песчаников находятся в области граувакк (рис. 12а). Для оценки зрелости осадков и степени изменения пород в области сноса использованы индексы CIA (Nesbitt, Young, 1982) и ICV (Cox, Lowe, 1995) – см. раздел “Методы исследований” (рис. 12б). Значения CIA для песчаников лиственной и марчетинской свит соответствуют интервалу от 47 до 61, что свидетельствует о невысокой степени химического выветривания. Значения ICV в изученных песчаниках обеих свит изменяются в интервале от 2.1 до 2.7, подразумевая низкое содержание глинистых минералов (иллит, каолинит, мусковит) (см. рис. 12б), что характерно для пород первого цикла седиментации (Юдович, Кетрис, 2000).

Для песчаников лиственной свиты свойственны следующие значения петрохимических модулей: алюмокремниевый (АМ) = $0.17\text{--}0.22$, железистый (ЖМ) = $0.42\text{--}0.51$, титановый (ТМ) = $0.06\text{--}0.08$, фемический (ФМ) = $0.11\text{--}0.14$, щелочной (ЩМ) = $2.20\text{--}6.15$, гидролизатный (ГМ) = $0.26\text{--}0.34$ и нормированный щелочной (НКМ) = $0.30\text{--}0.38$. Для песчаников марчетинской свиты характерны повышенные значения АМ ($0.22\text{--}0.32$), ФМ ($0.15\text{--}0.23$), ГМ ($0.34\text{--}0.50$) и ЩМ ($2.75\text{--}17.96$), сопоставимые значения ЖМ ($0.43\text{--}0.49$) и ТМ ($0.05\text{--}0.07$) и пониженные НКМ ($0.27\text{--}0.31$). Это предполагает, что в первичной области сноса песчаников лиственной свиты преобладали более кислые породы, чем в таковой марчетинской. Снижение доли ГМ в песчаниках лиственной и марчетинской свит связано с возрастанием в них доли кварца. Отрицательная корреляция между НКМ и ГМ (рис. 13) свидетельствует о том, что песчаники и лиственной, и марчетинской свит представляют собой осадочные породы первого цикла седиментации, к которым относятся, в первую очередь, граувакки (Юдович, Кетрис, 2000).

На бинарных диаграммах для песчаников засурьинской серии отмечаются отчетливые отрицательные тренды по TiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Fe_2O_3 , CaO с ростом SiO_2 (рис. 14). Такие тренды характерны для магматических серий основного и среднего состава надсубдукционного происхождения (Tatsumi, 2005). На бинарных диаграммах видно, что песчаники марчетинской свиты по петрохимическому составу можно разделить на две группы: первая содержит $\text{SiO}_2 = 55.1\text{--}58.6$ мас. %, вторая содержит $\text{SiO}_2 = 64.6\text{--}65.4$ мас. % и сходна с песчаниками лиственной свиты (см. рис. 14).

№ пачки	МОЩНОСТЬ, м	Литология
35	50	Аргиллиты глинистые табачно-зеленые
34	2	Аргиллиты глинисто-кремнистые красновато-серые
33	30	Песчаники мелкозернистые зеленые и грязно-серые
32	10	Алевролиты зеленые и грязно-серые. К верхней части пачки постепенно переходят в аргиллиты
31	30	Песчаники мелкозернистые, плохо сортированные, массивные, неясно-слоистые, зеленого и грязно-серого цвета
30	1.5	Алевролиты глинистые лиловые
29	35	Песчаники мелкозернистые, слабосортированные, зеленого цвета
28	15	Аргиллиты глинистые табачно-серые
27	10	Алевролиты глинистые грязно-серые
26	8	Аргиллиты кремнисто-глинистые сургучные
25	5	Алевролиты глинистые светло-зеленые
24	110	Переслаивание аргиллитов и мелкозернистых песчаников зеленого цвета
23	117	Аргиллиты глинистые серые, табачно-серые
		Аргиллиты глинистые и глинисто-кремнистые сургучно-красные
		Аргиллиты кремнисто-глинистые ярко-зеленые
		Кремни (возможно, ороговикованные) красные, местами желтоватые
22	3	Аргиллиты глинистые зеленые
21	28	Алевролиты ярко-зеленого цвета
20	0.7	Переслаивание песчаников (местами гравелитов) крупнозернистых зеленовато-серых и аргиллитов глинистых, комковатых, мелкозернистых песчаников табачно-зеленого цвета. В верхах породы приобретают оттенки серо-зеленые и цвета морской волны
19	34	Аргиллиты глинистые серые с лиловым оттенком, с микролинзами кремней серого цвета
18	5	Аргиллиты глинистые серые с лиловым оттенком
11-17	97.5	Аргиллиты массивные, неяснослоистые, цвета морской волны
9-10	1.6	Кремни массивные, неяснослоистые, с обильными вкраплениями рудных минералов (гематит). Цвет пород красный. Пачка линзовидной формы длиной около 40 м
8	0.3	Аргиллиты глинистые, массивные, неяснослоистые, цвета морской волны. Имеется слой мощностью 10–15 см с линзами (с "пережимами") красноцветных пород вышележащей шестой пачки (линзы 10 x 5 см)
7	23	Породы аналогичные породам второй пачки, но полосчатость отсутствует
6	2-6	Аргиллиты глинистые, массивные, комковатые, неяснослоистые, кремневые и светло-коричневые
5	7	Аргиллиты кремнисто-глинистые, тонкополосчатые – 0.5 см (за счет оттенков цвета и повышенной кремнистости), табачно-серые и светло-зеленоватые
4	8	
3	10	
2	25	
1	70	Аргиллиты слабокремнистые, глинистые, тонкополосчатые. Цвет пород светло-зеленый, табачный. В нижних 10 м пачки наблюдается тонкая (1–2 см) плитчатость, далее породы становятся массивными и комковатыми

Рис. 9. Литологическая колонка для участка Марчета (Сенников и др., 2001) с точками отбора образцов. Пояснения – см. рис. 8.

Fig. 9. Lithological column of the Marcheta Locality (Sennikov et al., 2001) with sampling points. Explanations – see Fig. 8.

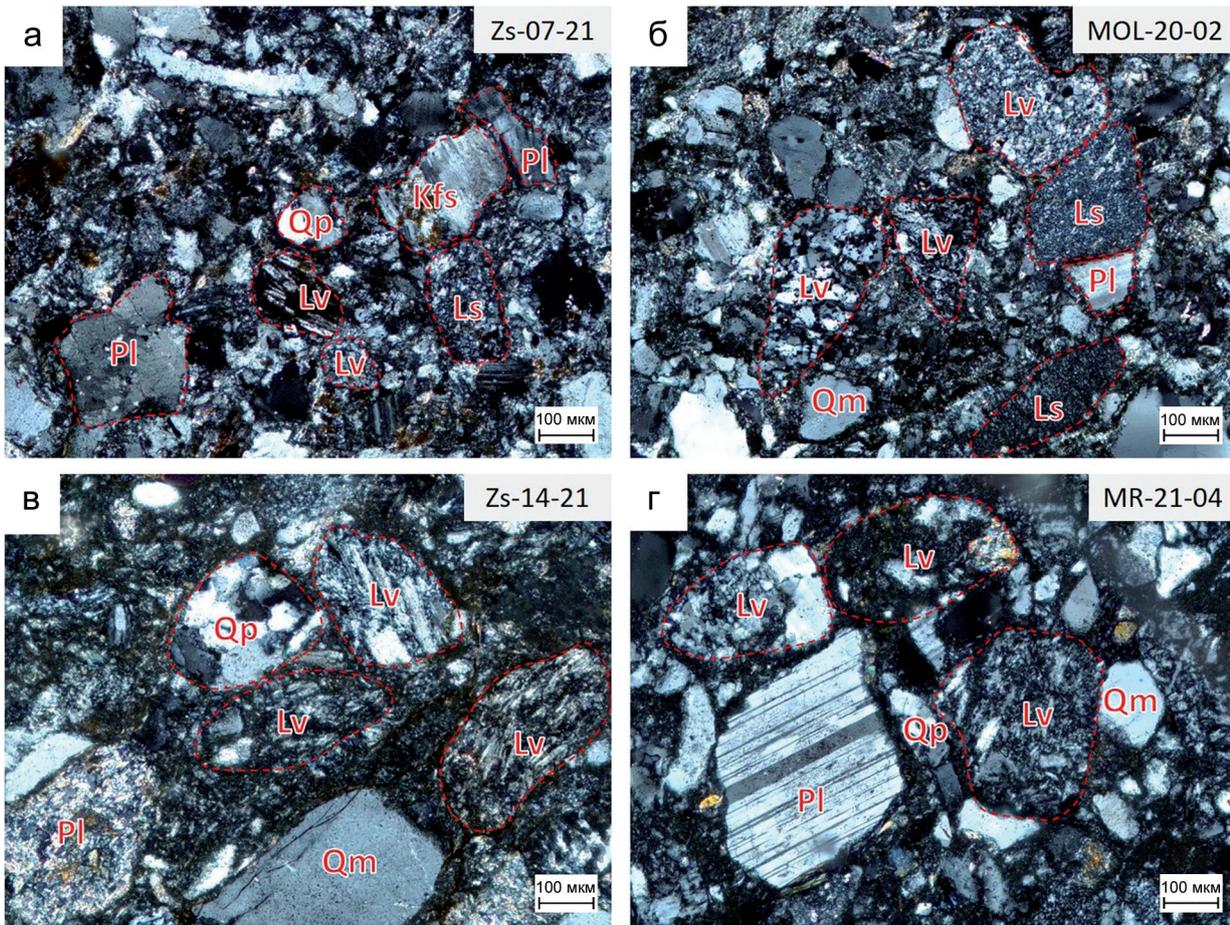


Рис. 10. Фотографии петрографических шлифов песчаников.

а, б – участок Молчаниха (лиственная свита); в, г – участок Марчета (марчетинская свита). *Qm* – монокристаллический кварц, *Qp* – поликристаллический кварц, *Pl* – плагиоклаз, *Kfs* – калиевый полевой шпат, обломки вулканических (*Lv*) и осадочных (*Ls*) пород.

Fig. 10. Microphotographs of thin sections of sandstones.

а, б – Molchanikha Locality (Listvenny Fm.); в, г – Marcheta Locality (Marcheta Fm.). *Qm* – monocrystalline quartz, *Qp* – polycrystalline quartz, *Pl* – plagioclase, *Kfs* – potassium feldspar, lithic fragments of volcanic (*Lv*) and sedimentary (*Ls*) rocks.



Рис. 11. Классификационная диаграмма для песчаников, по (Шутов, 1967).

F – сумма полевых шпатов ($F = Kfs + Pl$), *R* – сумма фрагментов обломков пород ($R = Qp + Ls + Lv + Lm$).

Fig. 11. Classification diagram for sandstones, according to (Shutov, 1967).

F – total feldspar ($F = Kfs + Pl$), *R* – total lithic fragments ($R = Qp + Ls + Lv + Lm$).

Таблица 2. Состав породообразующих оксидов в образцах песчаников лиственной и марчетинской свит

Table 2. Whole-rock compositions of sandstones of the Listvenny and Marcheta formations

№ п.п.	Образец	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	П.п.п.	SUM
1	SSS-4-1	67.9	0.8	13.0	5.8	0.1	2.4	1.6	4.1	0.7	0.20	3.1	99.7
2	SSS-4-2	68.4	0.9	12.1	6.0	0.1	2.0	2.0	3.8	0.8	0.21	3.1	99.6
3	MOL-20-01	64.8	0.9	14.2	6.7	0.1	2.2	1.6	3.8	1.3	0.23	3.7	99.6
4	MOL-20-02	66.2	1.1	14.5	7.0	0.1	2.3	0.7	4.1	1.3	0.27	2.7	100.3
5	MOL-20-03	70.3	0.7	12.2	5.2	0.1	2.4	1.4	3.7	0.8	0.15	3.1	100.1
6	Zs-06-21	67.7	0.7	12.0	6.3	0.2	2.6	2.6	2.5	1.0	0.15	4.2	100.1
7	Zs-07-21	65.7	0.8	13.2	6.7	0.1	1.8	3.3	2.8	1.3	0.20	4.3	100.1
8	MR-20-01	64.6	0.8	15.0	6.7	0.1	2.8	1.5	5.3	0.3	0.21	2.7	100.0
9	MR-20-02/2	56.6	1.0	17.0	8.7	0.1	3.2	4.0	4.6	0.5	0.25	3.3	99.5
10	MR-20-04	65.4	0.7	14.1	7.2	0.1	3.2	2.7	3.8	0.2	0.1	2.4	100.2
11	Zs-14-21	58.6	1.2	16.8	8.7	0.2	3.4	2.5	4.2	1.1	0.21	3.3	100.1
12	Zs-15-21	56.2	1.1	18.0	8.8	0.1	4.0	3.5	3.5	1.3	0.25	3.3	100.1
13	MR-21-01	57.0	0.9	16.9	8.5	0.1	3.6	4.9	4.4	0.8	0.23	2.7	100.1
14	MR-21-03	55.1	1.0	17.0	8.7	0.1	3.5	6.1	4.1	1.0	0.25	3.4	100.2

Примечание. 1–7 – песчаники лиственной свиты, 8–14 – песчаники марчетинской свиты.

Note. 1–7 – sandstones of the Listvenny formation, 8–14 – sandstones of the Marcheta formation.

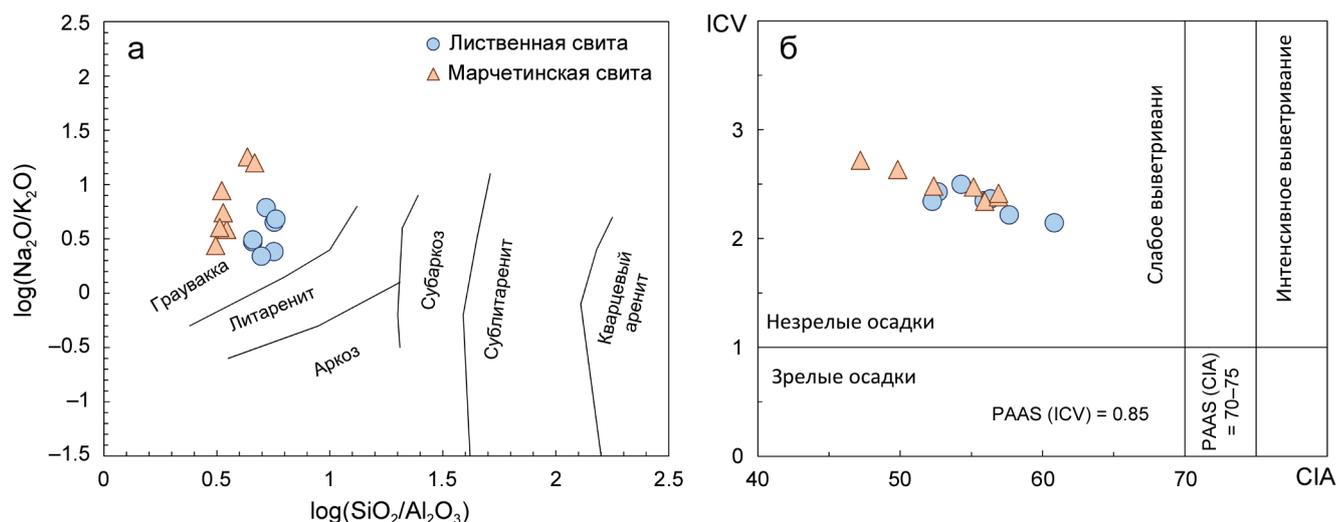


Рис. 12. Классификационная диаграмма для песчаников засурьинской серии (Pettijohn et al., 1972) (а) и диаграмма химический индекс выветривания CIA (Nesbitt, Young, 1982)–индекс вариабельности по составу ICV (Cox, Lowe, 1995) (б).

Fig. 12. Classification diagram for sandstones of the Zasur'ya Series (Pettijohn et al., 1972) (a) and diagram of the chemical index of alteration CIA (Nesbitt, Young, 1982)–index of compositional variability ICV (Cox, Lowe, 1995) (b).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Ассоциация океанических пород засурьинской серии, а также их закономерные структурные взаимоотношения соответствуют модели СОП, отложения которой входят в состав аккреционных комплексов (Isozaki et al., 1990). В процессе аккреции образуются дуплекс-структуры, состоящие из повторяющихся пачек пород СОП

(Maruyama et al., 2010; Safonova et al., 2016). Это может быть полная последовательность СОП, т. е. базальты–кремни–кремнистые аргиллиты–песчаники, либо в них могут отсутствовать какие-то элементы в зависимости от интенсивности аккреционных процессов, степени консолидации океанических осадков, их возраста, изменения направления аккреции, вовлечения в аккрецию поднятий на поверхности океанического дна и дру-

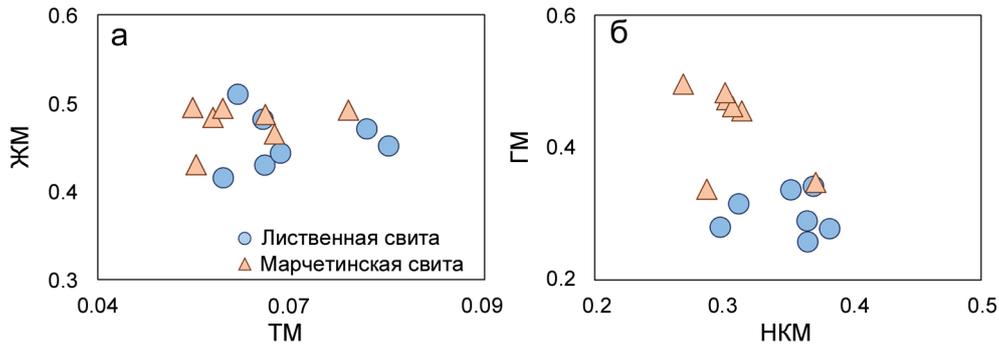


Рис. 13. Петрохимические модули для песчаников лиственной и марчетинской свит, по (Юдович, Кетрис, 2000).

Fig. 13. Petrochemical modules for the sandstones of the Listvenny and Marcheta fms, according to (Yudovich, Ketriss, 2000).

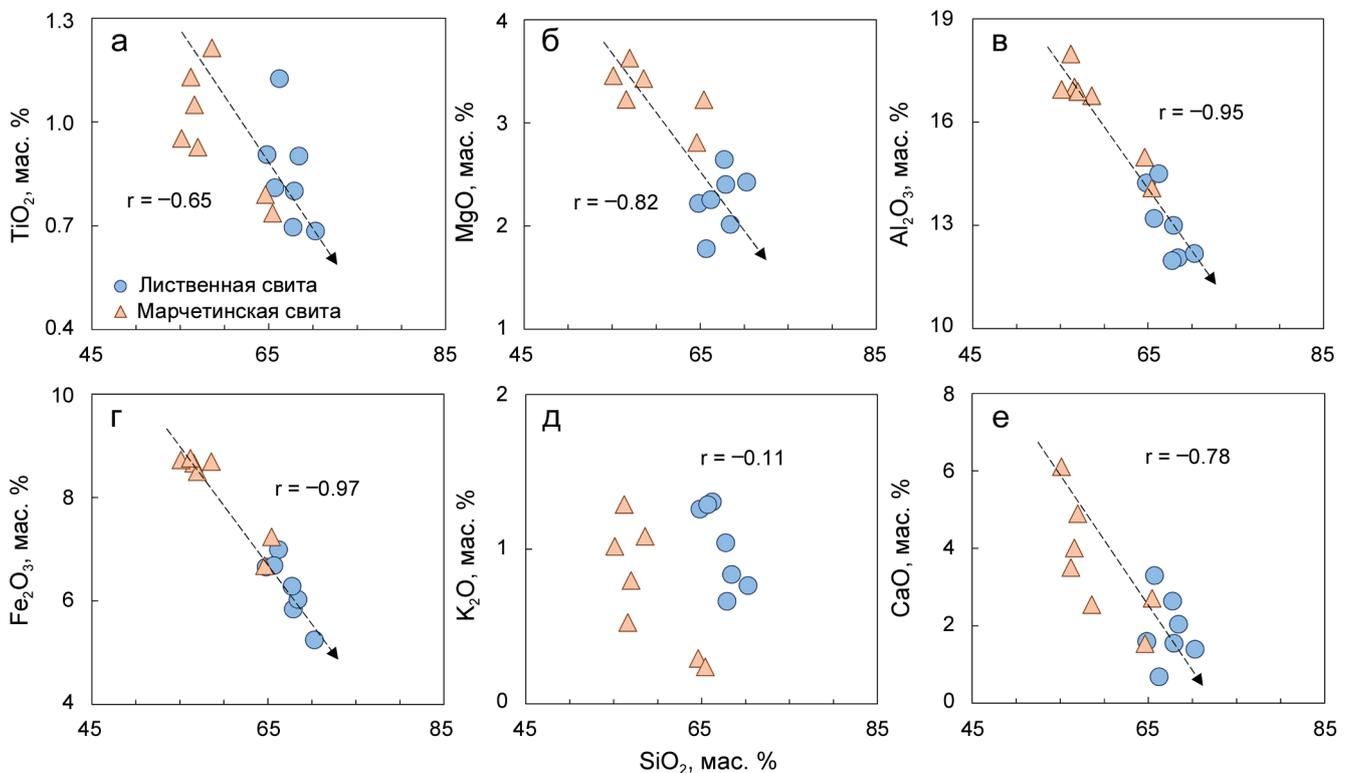


Рис. 14. Бинарные диаграммы SiO_2 -породообразующие окислы (а-е) для песчаников лиственной и марчетинской свит.

Fig. 14. Binary SiO_2 vs major oxides plots (a-e) for the sandstones of the Listvenny and Marcheta fms.

гих факторов (Safonova et al., 2016; Сафонова, Ханчук, 2021) (рис. 15).

На изученных разрезах участков Молчаниха (лиственная свита) и Марчета (марчетинская свита) наблюдается чередование крутопадающих пачек, состоящих из кремней, аргиллитов и песчаников, между которыми вероятны тектонические кон-

такты (см. рис. 4–9). Темно-красные кремни имеют массивную или ленточную текстуру (см. рис. 4б, 7б). Кремнистые аргиллиты коричневого, темно-красного или серо-зеленого цвета имеют слоистую текстуру, часто рассланцованы (см. рис. 4в, 7в). Граувакки слагают отдельные мощные толщи либо образуют ритмично чередующиеся пачки с гли-

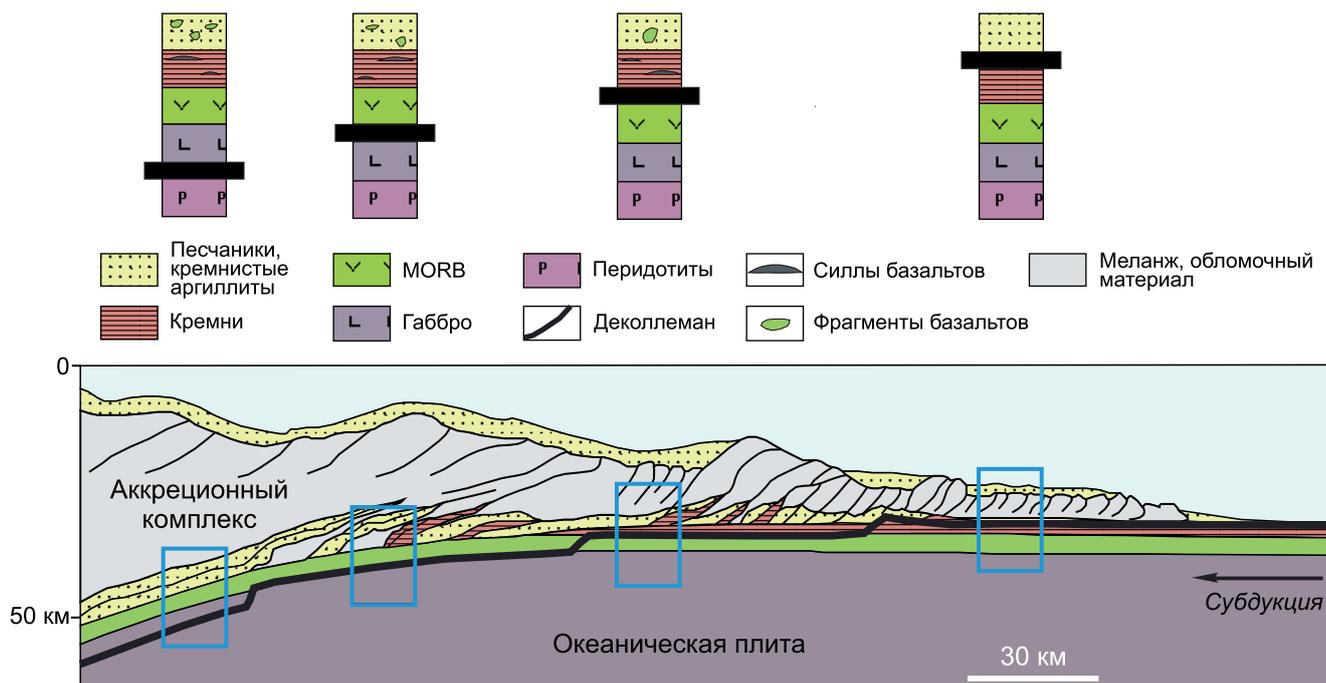


Рис. 15. Схема строения аккреционного комплекса Шиманто через желоб Нанкай, юго-западная Япония, на основе данных сейсмопрофилирования (модифицировано из (Safonova et al., 2016) по данным (Kuramoto et al., 2000; Gulick et al., 2004)).

Видно, как в состав аккреционной призмы могут входить разные ассоциации СОП в зависимости от глубины поверхности срыва (деколлеман). В условиях более позднего эрозионного среза на поверхности могут выходить любые фрагменты аккреционного комплекса.

Fig. 15. A schematic structure of the Shimanto accretionary complex across the Nankai trough, SW Japan, based on seismic profiling data (modified from (Safonova et al., 2016) after (Kuramoto et al., 2000; Gulick et al., 2004)).

It shows how an accretionary prism incorporates OPS packages composed of various sediments and igneous rocks as a function of the depth of the surface of detachment (decollement). In case of later erosion, any fragment of the accretionary complex can be exposed.

нистыми аргиллитами, что напоминает турбидиты (см. рис. 4г, 7г). Надежно обосновать турбидитовую природу этих пачек традиционными подходами (закономерные изменения исходной размерности зерен, слоевые последовательности, иероглифы на нижних поверхностях наслоения) нет возможности из-за сложной структуры аккреционных комплексов, наличия многочисленных надвиговых дуплекс-структур, особенно в случае более позднего вовлечения комплексов в сдвиговые процессы (Буслов и др., 2000; Buslov et al., 2001). Для отложений участков Молчаниха и Марчета, так же как и для современных аккреционных призм Циркум-Пацифики (Wakita, 2012; Kemkin et al., 2016; Safonova et al., 2016), характерны субвертикальное залегание слоев, глубоководное происхождение осадочных образований (кремни, кремнистые аргиллиты и алевролиты), надвиговые дуплекс-структуры, сложенные чередующимися пачками одинакового состава (см. рис. 4д, 7д). Все это подтверждает аккреционную природу отложений засурынской

серии. Несмотря на сложность диагностики тех или иных ассоциаций и структурную позицию засурынской серии в составе Чарыш-Теректинской сдвиговой зоны (Buslov et al., 2001; Safonova et al., 2011), мы считаем, что эти ритмичные чередования песчаников и кремнистых глубоководных осадков представляют собой турбидиты, являющиеся частью отложений СОП (см. рис. 15) (Isozaki et al., 1990; Safonova et al., 2016). Подробное изучение предполагаемых турбидитов не проводилось, его предстоит осуществить в будущем.

Распределение U-Pb возрастов детритовых цирконов с близкими пиками (488 млн лет, листовенная свита; 485 млн лет, марчетинская свита) во всех случаях имеет унимодальный характер, что указывает на их происхождение в обстановке внутриокеанической дуги. Цирконов докембрийского возраста из более древних пород мало, они присутствуют только в образце листовенной свиты. Самые молодые U-Pb возрасты цирконов (460–465 млн лет) двух свит свидетельствуют о начале осадконакоп-

ления как минимум со среднего ордовика. Эти данные не согласуются с позднекембрийским возрастом кремней листовенной свиты и раннеордовикским возрастом кремнистых аргиллитов марчетинской свиты (Крутикова и др., 2023).

По петрографическому составу песчаники листовенной свиты относятся к кварц-полевошпатовым грауваккам (см. рис. 10, 11). Их отличительной особенностью является повышенное содержание обломков моно-, поликристаллического кварца и гранитоидов, полевых шпатов и терригенных пород, что привело к повышенному содержанию SiO_2 (65–70 мас. %) (см. рис. 10). Эти характеристики предполагают наличие в области сноса кислых магматических пород и терригенных пород. Песчаники марчетинской свиты также классифицируются как граувакки, но они отличаются от таковых листовенной свиты более низким содержанием обломков кварца (Qt до 22%) и повышенным содержанием обломков вулканических пород основного-среднего состава (Lv до 49%), что на-

шло отражение в более низких содержаниях SiO_2 (55–65 мас. %). Вероятно, эти песчаники накапливались в результате размыва основных-средних пород магматической дуги и в меньшей степени терригенных пород. По химическому составу песчаники обеих свит также являются граувакками (см. рис. 12а), т. е. осадками первого цикла седиментации, образованными при разрушении слабо-выветрелых пород (см. рис. 12б).

Согласно диаграмме В.Р. Дикинсона с соавторами (Dickinson et al., 1983), песчаники марчетинской свиты образовались в результате разрушения переходной островной дуги, а песчаники листовенной – при эрозии расчлененной (зрелой) или переходной островной дуги (рис. 16а). На диаграмме Э. Гарзанти (Garzanti, 2019) песчаники листовенной и марчетинской свит группируются в поле образований, формирующихся при размыве переходной дуги (рис. 16б). Согласно диаграмме М.Р. Бхатиа $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO}-\text{TiO}_2$ (Bhatia, 1983), песчаники марчетинской свиты и часть пород листовенной сви-

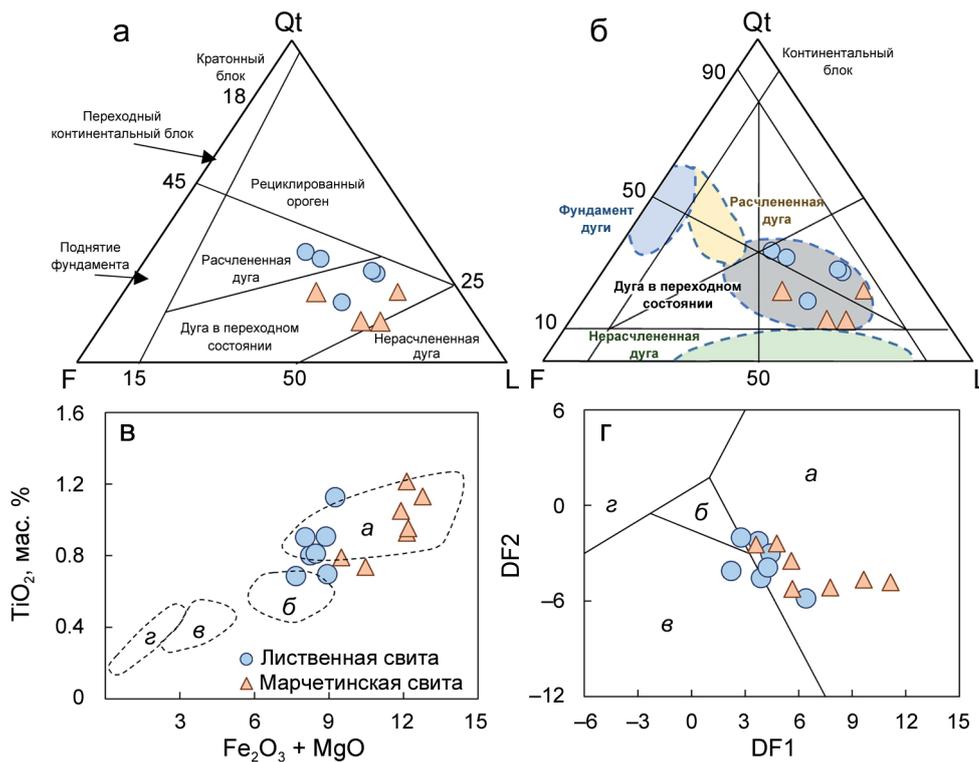


Рис. 16. Диаграммы с фигуративными точками составов песчаников листовенной и марчетинской свит.

а – (Dickinson et al., 1983); Qt – сумма зерен кварца ($Qt = Qm + Qp$), F – сумма полевых шпатов ($F = Kfs + Pl$), L – сумма фрагментов обломков пород ($L = Ls + Lv + Lm$); б – (Garzanti, 2019); в, г – (Bhatia, 1983) (а – океаническая дуга, б – континентальная дуга, в – активная континентальная окраина, г – пассивная окраина).

Fig. 16. Diagrams with figurative points of the compositions of the sandstones of the Listvenny and Marcheta fms.

а – (Dickinson et al., 1983); Qt – total quartz grains ($Qt = Qm + Qp$), F – total feldspar ($F = Kfs + Pl$), L – total rock fragments ($L = Ls + Lv + Lm$); б – (Garzanti, 2019); в, г – (Bhatia, 1983) (а – oceanic arc, б – continental arc, в – active continental margin, г – passive margin).

ты образовались при разрушении внутриокеанической дуги, а другая часть – при эрозии континентальной дуги (рис. 16в). По диаграмме М.Р. Бхатиа, основанной на дискриминантных функциях (DF1–DF2 (Bhatia, 1983)), песчаники марчетинской свиты и большая часть пород листовенной свиты возникли при разрушении океанической дуги, а другая часть – при эрозии активной континентальной окраины (рис. 16г).

Близкие U-Pb возрастные распределения детритовых цирконов и сходная нижняя граница осадконакопления, а также наличие обломков вулканических пород основного и среднего состава в песчаниках листовенной и марчетинской свит позволяют предположить, что источником материала являлась одна магматическая дуга. Но поскольку в песчаниках листовенной свиты присутствуют единичные зерна цирконов с докембрийскими возрастными, то их осадконакопление происходило в задуговом бассейне, в который попадали более древние кислые породы с континентальной окраины. Для более точной характеристики питающей провинции требуются дополнительные, в первую очередь изотопные, исследования.

Таким образом, совокупность геологических, петрографических и геохимических данных позволяет предположить наличие в питающей провинции песчаников листовенной свиты магматических пород как среднего, так и кислого состава, образованных в обстановке переходной и/или расчлененной дуги, а их накопление – в задуговом бассейне. В области сноса песчаников марчетинской свиты преобладали магматические породы преимущественно основного и среднего состава, образованные в обстановке переходной и/или нерасчлененной дуги, а их накопление происходило в преддуговом бассейне.

ВЫВОДЫ

На основе полученных результатов геологических, петрографических и геохимических исследований песчаников листовенной и марчетинской свит засурынской серии северо-западного Горного Алтая сделаны следующие выводы. Изученные песчаники находятся в ассоциации с глубоководными пелагическими (кремни) и гемипелагическими (кремнистые аргиллиты и алевролиты) осадочными породами. Все эти образования, вместе с описанными ранее океаническим базальтами, являются элементами последовательности стратиграфии океанической плиты. Вместе с пелагическими и гемипелагическими осадочными породами песчаники образуют повторяющиеся пакки пород, залегающие практически субвертикально. Такие литологические ассоциации и формы залегания характерны для аккреционных призм современных конвергентных окраин тихоокеанского типа.

По петрографическому и геохимическому составу песчаники листовенной и марчетинской свит соответствуют грауваккам и представляют собой незрелые, слабыветрелые осадочные породы первого цикла седиментации. Образовались песчаники обеих свит в процессе эрозии океанической магматической дуги и/или дуги переходного типа. Осадконакопление песчаников листовенной свиты, вероятно, проходило в задуговом бассейне, а песчаников марчетинской – в преддуговом бассейне. Для более точных тектонических реконструкций требуются дополнительные изотопные исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берзин Н.А., Колман Р.Г., Добрецов Н.Л., Зоненшайн Л.П., Чанг Э.З. (1994) Геодинамическая карта западной части Палеоазиатского океана. *Геология и геофизика*, **35**(7-8), 8-28.
- Буслов М.М. (1998) Террейновая тектоника и геодинамика складчатых областей мозаично-блокового типа (на примере Алтае-Саянского и Восточно-Казахстанского регионов). Автореф. дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 44 с.
- Буслов М.М., Ватанабе Т., Смирнова Л.В., Фудживара И., Ивата К., де Граве И., Семаков Н.Н., Травин А.В., Кирьянова А.П., Кох Д.А. (2003) Роль сдвигов в позднепалеозойско-раннемезозойской тектонике и геодинамике Алтае-Саянской и Восточно-Казахстанской складчатых областей. *Геология и геофизика*, **44**(1-2), 49-75.
- Буслов М.М., Сафонова И.Ю., Бобров В.А. (1999) Экзотический терреин позднекембрийско-раннеордовикской океанической коры в северо-западной части Горного Алтая (засурынская свита): структурное положение и геохимия. *Докл. АН*, **368**(5), 650-654.
- Буслов М.М., Фудживара И., Сафонова И.Ю., Окада Ш., Семаков Н.Н. (2000) Строеение и эволюция зоны сочленения террейнов Рудного и Горного Алтая. *Геология и геофизика*, **41**(3), 383-397.
- Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. (1990) Тектоника литосферных плит территории СССР. Кн. 1. М.: Недра, 328 с.
- Ивата К., Сенников Н.В., Буслов М.М., Обут О.Т., Шокальский С.П., Кузнецов С.А., Ермиков В.Д. (1997) Позднекембрийско-раннеордовикский возраст базальтово-кремнисто-терригенной засурынской свиты. *Геология и геофизика*, **38**(9), 1427-1444.
- Крутикова А.К., Сафонова И.Ю., Перфилова А.А., Обут О.Т., Савинский И.А. (2023) Цирконометрия и вещественный состав граувакковых песчаников Засурынского аккреционного комплекса северо-западного Алтая. *Строеение литосферы и геодинамика*. Мат-лы XXX Всерос. молодежн. конф. Иркутск: Ин-т земной коры СО РАН, 125-126.
- Перфилова А.А., Сафонова И.Ю., Гурова А.В., Котлер П.Д., Савинский И.А. (2022а) Тектонические обстановки образования вулканических и осадочных пород Итмурундинской зоны Центрального Казахстана. *Геодинамика и тектонофизика*, **13**(1), 0572.
- Перфилова А.А., Сафонова И.Ю., Дегтярев Е.К., Савин-

- ский И.А., Котлер П.Д., Хасен Б.П. (2022б) Состав и источники сноса силурийских терригенных пород обрамления Тектурмасской офиолитовой зоны (Центральный Казахстан). *Докл. РАН. Науки о Земле*, **505**(1), 11-17.
- Сафонова И.Ю. (2020) Внутриплитные океанические базальты из аккреционных комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса и Западной Пацифики. Дисс. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск: ИГМ СО РАН, 444 с.
- Сафонова И.Ю., Ханчук А.И. (2021) Субдукционная эрозия на конвергентных окраинах тихоокеанского типа. *Тихоокеан. геол.*, **40**(6), 3-19.
- Сенников Н.В., Ивата К., Ермиков В.Д., Обут О.Т., Хлебникова Т.В. (2003) Океанические обстановки седиментации и фаунистические сообщества в палеозое южного обрамления Западно-Сибирской плиты. *Геология и геофизика*, **44**(1-2), 156-171.
- Сенников Н.В., Обут О.Т., Буколова Е.В., Толмачева Т.Ю. (2011) Литолого-фациальная и биоиндикаторная оценка глубины формирования раннепалеозойских осадочных бассейнов Палеоазиатского океана. *Геология и геофизика*, **52**(10), 1488-1516.
- Сенников Н.В., Обут О.Т., Изох Н.Г., Киприянова Т.П., Лыкова Е.В., Толмачева Т.Ю., Хабибулина Р.А. (2018) Региональная стратиграфическая схема ордовикских отложений западной части Алтае-Саянской складчатой области (новая версия). *Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири*, (7), 15-53.
- Сенников Н.В., Обут О.Т., Хлебникова Т.В., Ивата К., Ермаков В.Д. (2001) Строение и возраст вулканогенно-кремнисто-терригенной засурьинской свиты в центральной части Горного Алтая (Ануйско-Чуйская зона, р. Марчета). Новосибирск: Изд-во ИГиЛ СО РАН, 145-151.
- Сенников Н.В., Толмачева Т.Ю., Обут О.Т., Изох Н.Г., Лыкова Е.В. (2015) Зональное расчленение ордовикских отложений Сибири по пелагическим группам фауны. *Геология и геофизика*, **56**(4), 761-781.
- Тихонов В.И. (1956) К стратиграфии "Ануйско-Чуйской" и "Зелено-фиолетовой" формаций Причарышского Алтая. *Тр. ВАГТ*, (2), 34-45.
- Шутов В.Д. (1967) Классификация песчаников. *Литология и полез. ископаемые*, (5), 86-102.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2000) Основы литохимии. СПб.: Наука, 479 с.
- Bhatia M.R. (1983) Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstone. *J. Geol.*, **91**, 611-627.
- Bhatia M.R., Crook K.A.W. (1986) Trace elements characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **92**, 181-193.
- Buslov M.M., Saphonova I.Yu., Watanabe T., Obut O.T., Fujiwara Y., Iwata K., Semakov N.N., Sugai Y., Smirnova L.V., Kazansky A.Yu. (2001) Evolution of the Paleo-Asian Ocean (Altai-Sayan Region, Central Asia) and collision of possible Gondwana-derived terranes with the southern marginal part of the Siberian continent. *Geosci. J.*, **5**, 203-224.
- Cox R., Lowe D.R. (1995) A conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover. *Sediment. Res.*, (1), 1-12.
- Dickinson W.R., Beard L.S., Brakenridge G.R., Erjavec J.L., Ferguson R.C., Inman K.F., Knepp R.A., Lindberg F.A., Ryberg P.T. (1983) Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **94**, 222-235.
- Dickinson W.R., Suczek C.A. (1979) Plate Tectonics Sandstone Compositions. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **63**, 2164-2182.
- Dobretsov N.L., Berzin N.A., Buslov M.M. (1995) Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean. *Int. Geol. Rev.*, **37**, 335-360.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Vernikovskiy V.A. (2003) Neoproterozoic to Early Ordovician evolution of the Paleo-Asian Ocean: implications to the break-up of Rodinia. *Gondw. Res.*, **6**, 143-159.
- Garzanti E. (2019) Petrographic classification of sand and sandstone. *Earth-Sci. Rev.*, **192**, 545-563.
- Gulick S.P.S., Bangs N.L.B., Shipley T.H., Nakamura Y., Moore G., Kuramoto S. (2004) Three-dimensional architecture of the Nankai accretionary prism's imbricate thrust zone off Cape Muroto, Japan: Prism reconstruction via an echelon thrust propagation. *J. Geophys. Res.*, **109**, B02105.
- Ingersoll R.V., Bullard T.F., Ford R.L., Pickle J.D., Sares S.W. (1984) The effect of grain size on detrital modes: A test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *J. Sediment. Petrol.*, **54**(1), 103-116.
- Isozaki Y., Maruyama S., Fukuoka F. (1990) Accreted oceanic materials in Japan. *Tectonophysics*, **181**, 179-205.
- Kemkin I.V., Khanchuk A.I., Kemkina R.A. (2016) Accretionary prisms of the Sikhote-Alin Orogenic Belt: Composition, structure and significance for reconstruction of the geodynamic evolution of the eastern Asian margin. *J. Geodyn.*, **102**, 202-230.
- Konopelko D., Safonova I., Perfilova A., Biske Y., Mirkamalov R., Divaev F., Kotler P., Obut O., Wang B., Sun M., Soloshenko N. (2021) Detrital zircon U-Pb-Hf isotopes and whole-rock geochemistry of Ediacaran – Silurian clastic sediments of the Uzbek Tianshan: Sources and tectonic implications. *Int. Geol. Rev.*, **64**, 3005-3027.
- Kröner A., Kovach V., Belousova E., Hegner E., Armstrong R., Dolgoplova A., Seltmann R., Alexeiev D.V., Hofmann J.E., Wong J., Sun M., Cai K., Wang T., Tong Y., Wilde S.A., Degtyarev K.E., Rytsk E. (2014) Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondw. Res.*, **25**, 103-125.
- Kruk N.N., Kuibida Ya.V., Shokalsky S.P., Kiselev V.I., Gusev N.I. (2017) Late Cambrian – Early Ordovician turbidites of the Gorny Altai (Russia): Compositions, sources, deposition settings, and tectonic implications. *J. Asian Earth Sci.*, **159**, 209-232.
- Kuramoto S., Taira A., Bangs N.L., Shipley T.H., Moore G.F. (2000) Seismogenic zone in the Nankai accretionary wedge general summary of Japan – U.S. collaborative 3-D seismic investigation. *J. Geogr.*, **109**, 531-539.
- Kusky T., Windley B., Safonova I., Wakita K., Wakabayashi J., Polat A., Santosh M. (2013) Recognition of Ocean Plate Stratigraphy in accretionary orogens through Earth history: A record of 3.8 billion years of sea floor spreading, subduction, and accretion. *Gondw. Res.*, **24**, 501-547.

- Maruyama S., Kawai T., Windley B.F. (2010) Ocean plate stratigraphy and its imbrication in an accretionary orogen: The Mona complex, Anglesey-Lleyn, Wales, UK. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **338**, 55-75.
- Nesbitt H.W., Young G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, **299**, 715-717.
- Obut O.T. (2023) Early Paleozoic plankton evolution in the Paleo-Asian Ocean: Insights from new and reviewed fossil records from the Gorny Altai, West Siberia. *Paleontol. Res.*, **27**(1), 3-13. <https://doi.org/10.2517/PR210035>
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. (1972) Sand and sandstone. Berlin, Heidelberg, N. Y.: Springer, 553 p.
- Safonova I. (2014) The Russian-Kazakh Altai orogen: An overview and main debatable issues. *Geosci. Front.*, **5**, 537-552.
- Safonova I., Maruyama S., Kojima S., Komiya T., Krivonogov S., Koshida K. (2016) Recognizing OIB and MORB in accretionary complexes: A new approach based on ocean plate stratigraphy, petrology, and geochemistry. *Gondw. Res.*, **33**, 92-114.
- Safonova I., Perfilova A., Obut O., Kotler P., Aoki S., Komiya T., Wang B., Sun M. (2021) Traces of intra-oceanic arcs recorded in sandstones of eastern Kazakhstan: Implications from U-Pb detrital zircon ages, geochemistry, and Nd-Hf isotopes. *Int. J. Earth Sci.*, **111**(8), 2449-2468.
- Safonova I., Perfilova A., Savinskiy I., Kotler P., Sun M., Wang B. (2022) Sandstones of the Itmurundy accretionary complex, central Kazakhstan, as archives of arc magmatism and subduction erosion: Evidence from U-Pb zircon ages, geochemistry and Hf-Nd isotopes. *Gondw. Res.*, **111**, 35-52.
- Safonova I., Santosh M. (2014) Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes. *Gondw. Res.*, **25**, 126-158.
- Safonova I.Y. (2009) Intraplate magmatism and oceanic plate stratigraphy of the Paleo-Asian and Paleo-Pacific Oceans from 600 to 140 Ma. *Ore Geol. Rev.*, **35**, 137-154.
- Safonova I.Y., Buslov M.M., Iwata K., Kokh D.A. (2004) Fragments of Vendian-Early Carboniferous oceanic crust of the Paleo-Asian Ocean in foldbelts of the Altai-Sayan region of Central Asia: Geochemistry, biostratigraphy and structural setting. *Gondw. Res.*, **7**, 771-790.
- Safonova I.Y., Sennikov N.V., Komiya T., Bychkova Y.V., Kurganskaya E.V. (2011) Geochemical diversity in oceanic basalts hosted by the Zasur'ya accretionary complex, NW Russian Altai, Central Asia: Implications from trace elements and Nd isotopes. *J. Asian Earth Sci.*, **42**(3), 191-207.
- Tatsumi Y. (2005) The subduction factory: How it operates in the evolving Earth. *Geol. Soc. Amer. Today*, **15**(7), 4-10.
- Wakita K. (2012) Mappable features of mélanges derived from Ocean Plate Stratigraphy, in the Jurassic accretionary complexes of Mino and Chichibu terranes, Southwest Japan. *Tectonophysics*, **568-569**, 74-85.
- Wakita K., Metcalfe I. (2005) Ocean Plate Stratigraphy in East and Southeast Asia. *J. Asia Earth Sci.*, **24**, 679-702.
- Weltje G.J. (2002) Quantitative analysis of detrital modes: Statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology. *Earth-Sci. Rev.*, **57**(3-4), 211-253.
- Windley B.F., Alexeiev D., Xiao W., Kröner A., Badarch G. (2007) Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *J. Geol. Soc. Lond.*, **164**, 31-47.

REFERENCES

- Berzin N.A., Coleman R.G., Dobretsov N.L., Zonen-shain L.P., Chang E.Z. (1994) Geodynamic map of the western part of the Paleosianic Ocean. *Geol. Geofiz.*, **35**(7-8), 8-28. (In Russ.)
- Bhatia M.R. (1983) Plate Tectonics and Geochemical Composition of Sandstone. *J. Geol.*, **91**, 611-627.
- Bhatia M.R., Crook K.A.W. (1986) Trace elements characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **92**, 181-193.
- Buslov M.M. (1998) Terrane Tectonics and Geodynamics of Mosaic-Block Folded Areas (Exemplified by Altai-Sayan and East Kazakhstan Regions). Abstract. diss. ... doct. geol.-min. of sci. Novosibirsk, 44 p. (In Russ.)
- Buslov M.M., Safonova I.Yu., Watanabe T., Obut O.T., Fujiwara Y., Iwata K., Semakov N.N., Sugai Y., Smirnova L.V., Kazansky A.Yu. (2001) Evolution of the Paleo-Asian Ocean (Altai-Sayan Region, Central Asia) and collision of possible Gondwana-derived terranes with the southern marginal part of the Siberian continent. *Geosci. J.*, **5**, 203-224.
- Buslov M.M., Fujiwara I., Safonova I.Yu., Okada Sh., Semakov N.N. (2000) The junction zone of the Gorny Altai and Rudny Altai terrains: Structure and evolution. *Geol. Geofiz.*, **41**(3), 383-397. (In Russ.)
- Buslov M.M., Safonova I.Yu., Bobrov V.A. (1999) Exotic terrain of Late Cambrian-Early Ordovician oceanic crust in the north-western Gornyi Altai (Zasurin formation): Structural position and geochemistry. *Dokl. Akad. Nauk*, **368**(5), 650-654. (In Russ.)
- Buslov M.M., Watanabe T., Smirnova L., Fujiwara I., Iwata K., de Grave I., Semakov N.N., Travin A.V., Kir'yanova A.P., Kokh D.A. (2003) Role of strike-slip faulting in Late Paleozoic-Early Mesozoic tectonics and geodynamics of the Altai-Sayan and East Kazakhstan regions. *Geol. Geofiz.*, **44**(1-2), 49-75. (In Russ.)
- Cox R., Lowe D.R. (1995) A conceptual review of regional-scale controls on the composition of clastic sediment and the co-evolution of continental blocks and their sedimentary cover. *Sediment. Res.*, (1), 1-12.
- Dickinson W.R., Beard L.S., Brakenridge G.R., Erjavec J.L., Ferguson R.C., Inman K.F., Knepp R.A., Lindberg F.A., Ryberg P.T. (1983) Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **94**(2), 222-235.
- Dickinson W.R., Suczek C.A. (1979) Plate Tectonics Sandstone Compositions. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, **63**, 2164-2182.
- Dobretsov N.L., Berzin N.A., Buslov M.M. (1995) Opening and tectonic evolution of the Paleo-Asian Ocean. *Int. Geol. Rev.*, **37**, 335-360.
- Dobretsov N.L., Buslov M.M., Vernikovskiy V.A. (2003) Neoproterozoic to Early Ordovician evolution of the Paleo-Asian Ocean: Implications to the break-up of Rodinia. *Gondw. Res.*, **6**, 143-159.
- Garzanti E. (2019) Petrographic classification of sand and sandstone. *Earth-Sci. Rev.*, **192**, 545-563.

- Gulick S.P.S., Bangs N.L.B., Shipley T.H., Nakamura Y., Moore G., Kuramoto S. (2004) Three-dimensional architecture of the Nankai accretionary prism's imbricate thrust zone off Cape Muroto, Japan: Prism reconstruction via an echelon thrust propagation. *J. Geophys. Res.*, **109**, B02105.
- Ingersoll R.V., Bullard T.F., Ford R.L., Pickle J.D., Sares S.W. (1984) The effect of grain size on detrital modes: a test of the Gazzi-Dickinson point-counting method. *J. Sediment. Petrol.*, **54**(1), 103-116.
- Isozaki Y., Maruyama S., Fukuoka F. (1990) Accreted oceanic materials in Japan. *Tectonophysics*, **181**, 179-205.
- Iwata K., Sennikov N.V., Buslov M.M., Obut O.T., Shokalskii S.P., Kuznetsov S.A., Ermikov V.D. (1997) Latter Cambrian-early Ordovician age of the Zasukh'ya Basalt-Siliceous-Terrigenous formation (northwestern part of Gorny Altai). *Geol. Geofiz.*, **38**(9), 1427-1444. (In Russ.)
- Kemkin I.V., Khanchuk A.I., Kemkina R.A. (2016) Accretionary prisms of the Sikhote-Alin Orogenic Belt: Composition, structure and significance for reconstruction of the geodynamic evolution of the eastern Asian margin. *J. Geodyn.*, **102**, 202-230.
- Konopelko D., Safonova I., Perfilova A., Biske Y., Mirkamalov R., Divaev F., Kotler P., Obut O., Wang B., Sun M., Soloshenko N. (2021) Detrital zircon U-Pb-Hf isotopes and whole-rock geochemistry of Ediacaran – Silurian clastic sediments of the Uzbek Tianshan: Sources and tectonic implications. *Int. Geol. Rev.*, **64**, 3005-3027.
- Kröner A., Kovach V., Belousova E., Hegner E., Armstrong R., Dolgoplova A., Seltmann R., Alexeiev D.V., Hofmann J.E., Wong J., Sun M., Cai K., Wang T., Tong Y., Wilde S.A., Degtyarev K.E., Rytsh E. (2014) Reassessment of continental growth during the accretionary history of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondw. Res.*, **25**, 103-125.
- Kruk N.N., Kuibida Ya.V., Shokalsky S.P., Kiselev V.I., Gusev N.I. (2017) Late Cambrian – Early Ordovician turbidites of the Gorny Altai (Russia): Compositions, sources, deposition settings, and tectonic implications. *J. Asian Earth Sci.*, **159**, 209-232.
- Krutikova A.K., Safonova I.Yu., Perfilova A.A., Obut O.T., Savinskii I.A. (2023) The U-Pb ages of detrital zircons and chemical composition of the greywackes of the Zasukh'ya accretionary complex of NW Altai. *Lithosphere structure and geodynamics*. Materials of the XXX All-Russian Youth Conference. Irkutsk, Institute of the Earth's Crust SB RAS, 125-126. (In Russ.)
- Kuramoto S., Taira A., Bangs N.L., Shipley T.H., Moore G.F. (2000) Seismogenic zone in the Nankai accretionary wedge general summary of Japan – U.S. collaborative 3-D seismic investigation. *J. Geogr.*, **109**, 531-539.
- Kusky T., Windley B., Safonova I., Wakita K., Wakabayashi J., Polat A., Santosh M. (2013) Recognition of Ocean Plate Stratigraphy in accretionary orogens through Earth history: A record of 3.8 billion years of sea floor spreading, subduction, and accretion. *Gondw. Res.*, **24**, 501-547.
- Maruyama S., Kawai T., Windley B.F. (2010) Ocean plate stratigraphy and its imbrication in an accretionary orogen: The Mona complex, Anglesey-Lleyn, Wales, UK. *Geol. Soc., Lond., Spec. Publ.*, **338**, 55-75.
- Nesbitt H.W., Young G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, **299**, 715-717.
- Obut O.T. (2023) Early Paleozoic plankton evolution in the Paleo-Asian Ocean: Insights from new and reviewed fossil records from the Gorny Altai, West Siberia. *Paleontol. Res.*, **27**(1), 3-13. <https://doi.org/10.2517/PR210035>
- Perfilova A.A., Safonova I.Yu., Degtyarev K.E., Savinskii I.A., Kotler P.D., Khasen B.P. (2022b) Composition and sources of Silurian terrigenous rocks at the periphery of the Tekturmas ophiolite zone (Central Kazakhstan). *Dokl. Earth Sci.*, **505**(1), 416-421 (translated from *Doklady RAN. Nauki o Zemle*, **505**(1), 11-17).
- Perfilova A.A., Safonova I.Yu., Gurova A.V., Kotler P.D., Savinskii I.A. (2022a) Tectonic settings of formation of volcanic and sedimentary rocks of the Itmurundy zone, Central Kazakhstan. *Geodynam. Tectonophys.*, **13**(1), 0572. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-1-0572>
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. (1972) Sand and sandstone. Berlin, Heidelberg, N. Y.: Springer, 553 p.
- Safonova I. (2014) The Russian-Kazakh Altai orogen: An overview and main debatable issues. *Geosci. Front.*, **5**, 537-552.
- Safonova I., Maruyama S., Kojima S., Komiya T., Krivonogov S., Koshida K. (2016) Recognizing OIB and MORB in accretionary complexes: A new approach based on ocean plate stratigraphy, petrology, and geochemistry. *Gondw. Res.*, **33**, 92-114.
- Safonova I., Perfilova A., Obut O., Kotler P., Aoki S., Komiya T., Wang B., Sun M. (2021) Traces of intra-oceanic arcs recorded in sandstones of eastern Kazakhstan: Implications from U-Pb detrital zircon ages, geochemistry, and Nd-Hf isotopes. *Int. J. Earth Sci.*, **111**(8), 2449-2468.
- Safonova I., Perfilova A., Savinskii I., Kotler P., Sun M., Wang B. (2022) Sandstones of the Itmurundy accretionary complex, central Kazakhstan, as archives of arc magmatism and subduction erosion: Evidence from U-Pb zircon ages, geochemistry and Hf-Nd isotopes. *Gondw. Res.*, **111**, 35-52.
- Safonova I., Santosh M. (2014) Accretionary complexes in the Asia-Pacific region: Tracing archives of ocean plate stratigraphy and tracking mantle plumes. *Gondw. Res.*, **25**, 126-158.
- Safonova I.Y. (2009) Intraplate magmatism and oceanic plate stratigraphy of the Paleo-Asian and Paleo-Pacific Oceans from 600 to 140 Ma. *Ore Geol. Rev.*, **35**, 137-154.
- Safonova I.Y., Buslov M.M., Iwata K., Kokh D.A. (2004) Fragments of Vendian-Early Carboniferous oceanic crust of the Paleo-Asian Ocean in foldbelts of the Altai-Sayan region of Central Asia: Geochemistry, biostratigraphy and structural setting. *Gondw. Res.*, **7**, 771-790.
- Safonova I.Y., Sennikov N.V., Komiya T., Bychkova Y.V., Kurganskaya E.V. (2011) Geochemical diversity in oceanic basalts hosted by the Zasukh'ya accretionary complex, NW Russian Altai, Central Asia: Implications from trace elements and Nd isotopes. *J. Asian Earth Sci.*, **42**(3), 191-207.
- Safonova I.Yu. (2020) Intraplate oceanic basalts from accretion complexes of the Central Asian Orogenic Belt and Western Pacific. *Doct. ... geol. and min. sci. diss.* Novosibirsk, IGM UB RAS, 444 p. (In Russ.)
- Safonova I.Yu., Khanchuk A.I. (2021) Subduction erosion at Pacific-type convergent margins. *Tikhookean. Geol.*, **40**(6), 3-19. (In Russ.)

- Sennikov N.V., Iwata K., Ermikov V.D., Obut O.T., Khlebnikova T.V. (2003) Oceanic sedimentation settings and fauna associations in the Paleozoic on the southern framing of the West Siberian Plate. *Russ. Geol. Geophys.*, **44**(1-2), 156-171. (In Russ.)
- Sennikov N.V., Obut O.T., Bukolova E.V., Tolmacheva T.Yu. (2011) The depth of the early Paleozoic sedimentary basins of the Paleasian ocean: Lithofacies and bioindicator estimates. *Geol. Geofiz.*, **52**(10), 1488-1516. (In Russ.)
- Sennikov N.V., Obut O.T., Izokh N.G., Kipr'yanova A.P., Lykova E.V., Tolmacheva T.Yu., Khabibullina R.A. (2018) The regional stratigraphic scheme of Ordovician deposits of the western part of the Altai-Sayan folded region (new version). *Geologiya i Mineral'no-syr'evye Resursy Sibiri*, (7), 15-53. (In Russ.)
- Sennikov N.V., Obut O.T., Khlebnikova T.V., Ivata K., Ermakov V.D. (2001) The structure and age of the volcanogenic-siliceous-terrigenous Zasur'ya formation in the central part of the Altai Mountains (Anuysko-Chuyskaya zone, Marcheta river). Novosibirsk, Publishing House of the Lavrentiev Institute of Hydrodynamics SB RAS, 145-151. (In Russ.)
- Sennikov N.V., Tolmacheva T.Yu., Obut O.T., Izokh N.G., Lykova E.V. (2015) Zonation of the Siberian Ordovician deposits based on pelagic groups of fauna. *Geol. Geofiz.*, **56**(4), 761-781. (In Russ.)
- Shutov V.D. (1967) Classification of sandstones. *Litol. Polez. Iskop.*, (5), 86-102. (In Russ.)
- Tatsumi Y. (2005) The subduction factory: How it operates in the evolving Earth. *Geol. Soc. Amer. Today*, **15**(7), 4-10.
- Tikhonov V.I. (1956) To the stratigraphy of the "Anuysko-Chui" and "Green-violet" formations of the Pricharysh Altai. *Tr. VAGT*, (2), 34-45. (In Russ.)
- Wakita K. (2012) Mappable features of mélanges derived from Ocean Plate Stratigraphy, in the Jurassic accretionary complexes of Mino and Chichibu terranes, Southwest Japan. *Tectonophysics*, **568-569**, 74-85.
- Wakita K., Metcalfe I. (2005) Ocean Plate Stratigraphy in East and Southeast Asia. *J. Asia Earth Sci.*, **24**, 679-702.
- Weltje G.J. (2002) Quantitative analysis of detrital modes: Statistically rigorous confidence regions in ternary diagrams and their use in sedimentary petrology. *Earth-Sci. Rev.*, **57**(3-4), 211-253.
- Windley B.F., Alexeiev D., Xiao W., Kröner A., Badarch G. (2007) Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt. *J. Geol. Soc. Lond.*, **164**, 31-47.
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2000) The Principles of Lithochemistry. St.Petersburg, Nauka Publ., 479 p. (In Russ.)
- Zonenshain L.P., Kuz'min M.I., Natapov L.M. (1990) Tectonics of lithospheric plates of the USSR territory. B. 1. Moscow, Nedra Publ., 328 p. (In Russ.)