



## MAGMATIC ROCKS OF THE TEKURMASS ACCRETIONARY COMPLEX, CENTRAL KAZAKHSTAN: GEOLOGICAL POSITION AND GEODYNAMIC SETTINGS OF FORMATION

A.V. Gurova <sup>1,2✉</sup>, I.Yu. Safonova <sup>1,2</sup>, I.A. Savinsky <sup>1</sup>, R.M. Antonyuk <sup>3</sup>, T.Zh. Orynbek <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State University, 1 Pirogov St, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>2</sup> Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

<sup>3</sup> Institute for the Study of Complex Mineral Development, 5 Ippodromnaya St, Karaganda 100019, Kazakhstan

**ABSTRACT.** The paper provides an overview of the geological structure and presents new data on petrography and geochemistry of igneous rocks of the Tekturmas accretionary complex (TAC). Consideration is being given to the age, petrogenesis and probable tectonic settings of formation of igneous rocks. It is shown that the TAC and adjacent ophiolite belt are parts of the Late Cambrian – Ordovician Pacific-type orogenic belt formed at an active margin of the Paleo-Asian Ocean. The TAC is dominated mainly by tholeiitic mafic igneous rocks (basalt, dolerite, gabbro). There are recognized three groups of rocks: high-Ti, medium-Ti and low-Ti. Geological and geochemical features of TAC igneous rocks suggest their formation in three tectonic settings: mid-ocean ridge (medium-Ti), oceanic island/seamount (high-Ti) and over subduction zones (low-Ti).

**KEYWORDS:** Paleo-Asian Ocean; Central Asian Orogenic Belt; Late Cambrian; Ordovician; ophiolites; petrography; geochemistry

**FUNDING:** The study was supported by the Russian Science Foundation (project 21-77-20022, geochemistry), the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (projects FSUS-2020-0039 and 0330-2019-0003 regional geology and petrography) and the Ministry of Science and Higher Education of Kazakhstan (project AR08855920; local geology, field work).

### RESEARCH ARTICLE

Received: June 21, 2021

Revised: April 26, 2022

Accepted: May 16, 2022

**Correspondence:** Alexandra V. Gurova, [sushka386@gmail.com](mailto:sushka386@gmail.com)

**FOR CITATION:** Gurova A.V., Safonova I.Yu., Savinsky I.A., Antonyuk R.M., Orynbek T.Zh., 2022. Magmatic Rocks of the Tekturmas Accretionary Complex, Central Kazakhstan: Geological Position and Geodynamic Settings of Formation. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (5), 0673. doi:10.5800/GT-2022-13-5-0673

## МАГМАТИЧЕСКИЕ ПОРОДЫ ТЕКТУРМАССКОГО АККРЕЦИОННОГО КОМПЛЕКСА, ЦЕНТРАЛЬНЫЙ КАЗАХСТАН: ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ПОЗИЦИЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ

А.В. Гурова<sup>1,2</sup>, И.Ю. Сафонова<sup>1,2</sup>, И.А. Савинский<sup>1</sup>, Р.М. Антонюк<sup>3</sup>, Т.Ж. Орынбек<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

<sup>2</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

<sup>3</sup>Институт проблем комплексного освоения недр, 100019, Караганда, ул. Ипподромная, 5, Казахстан

**АННОТАЦИЯ.** В статье представлен обзор геологического строения и новые данные по петрографии и химическому составу вулканических пород Тектурмасского аккреционного комплекса (ТАК). Обсуждается их возраст, условия петрогенезиса и вероятные тектонические обстановки формирования. Показано, что ТАК и связанный с ним офиолитовый пояс являются частью орогена тихоокеанского типа позднекембрийско-ордовикского возраста, образованного на активной окраине Палеоазиатского океана. Выделены магматические комплексы преимущественно основного состава (базальты, долериты, габбро) преимущественно толеитовой серии. По содержанию  $TiO_2$  базальты и андезибазальты можно разделить на три группы: высоко-Ti, средне-Ti и низко-Ti. Геологическая позиция и геохимические характеристики магматических пород ТАК предполагают образование средне-Ti базальтов в обстановке срединно-океанического хребта, высоко-Ti и щелочных андезитов – в обстановке океанического острова/симаунта, а низко-Ti вулканитов – в надсубдукционной обстановке.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Палеоазиатский океан; Центрально-Азиатский складчатый пояс; поздний кембрий; ордовик; офиолиты; петрография; геохимия

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-77-20022, геохимия), Министерства науки и высшего образования РФ (проекты № FSUS-2020-0039 НГУ и № 0330-2019-0003 ИГМ СО РАН, региональная геология, петрография) и Министерства науки и высшего образования Казахстана (проект № AP08855920, локальная геология, полевые работы).

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Многочисленные аккреционные комплексы Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП) – крупнейшего орогена тихоокеанского типа, образованного в ходе эволюции и закрытия Палеоазиатского океана (ПАО) [Zonenshain et al., 1990; Dobretsov et al., 1995; Jahn et al., 2000; Buslov et al., 2001; Windley et al., 2007; Safonova et al., 2009; Kröner et al., 2014, 2017; Safonova, 2017], сформированы на активных окраинах ПАО за длительный период времени от позднего неопротерозоя до мезозоя (рис. 1). Геологическая структура Центрального Казахстана в западной части ЦАСП представлена образованиями Джунгаро-Балхашской складчатой системы. Главными элементами этой складчатой системы являются девонский вулканоплутонический пояс, силурийские терригенные отложения Нуринского бассейна, ордовикские Байдаулетский вулканический пояс и Тектурмасский аккреционный комплекс (ТАК) и офиолитовый пояс, силурийские отложения Сарысуйского бассейна, Успенский рифт и позднекарбонные граниты (рис. 2) [Yakubchuk, 1990; Geodynamic Map..., 1995; Stepanets, 2016].

Аккреционные комплексы Центрального Казахстана, большая часть из которых имеет продолжение в Северо-Западном Китае, образовались в палеозойское время и являются частью Казахского орогена [Degtyarev, 2012; Levashova et al., 2012; Shen et al., 2015; Li et

al., 2018; Degtyarev et al., 2021a, 2021b; и др.]. В их состав входят магматические комплексы различного геодинамического происхождения, образованные в обстановках срединно-океанических хребтов, океанических островов, симаунтов и плато, островных или внутриокеанических дуг, а также континентальных дуг. Кроме этого, в самом регионе развиты проявления и внутриплитного континентального магматизма. Однако во многих районах Центрального Казахстана их диагностика пока еще остается неполной, так как часто осложнена трудной логистической доступностью. К таким районам относится и Тектурмасская зона – район в северной части Центрального Казахстана, расположенный к югу от г. Караганды (см. рис. 1).

Тектурмасская зона протягивается с запада на восток на расстояние более 350 км при ширине 2–15 км и состоит из нескольких тектонических пластин, надвинутых к северу под углом 45–75°, сложенных раннепалеозойскими магматическими и осадочными (океаническими и терригенными) породами (рис. 2, 3) [Yakubchuk, 1990; Stepanets, 2016; Degtyarev et al., 2017; Magretova et al., 2020; Khassen et al., 2020]. В состав Тектурмасской зоны входят ТАК и смежный с ним офиолитовый пояс, включающий и серпентинитовый меланж. ТАК представляет собой фрагмент некогда единого Агадырь-Тектурмас-Северо-Балхашского пояса, разделенного позднепалеозойскими, возможно мезозойскими,

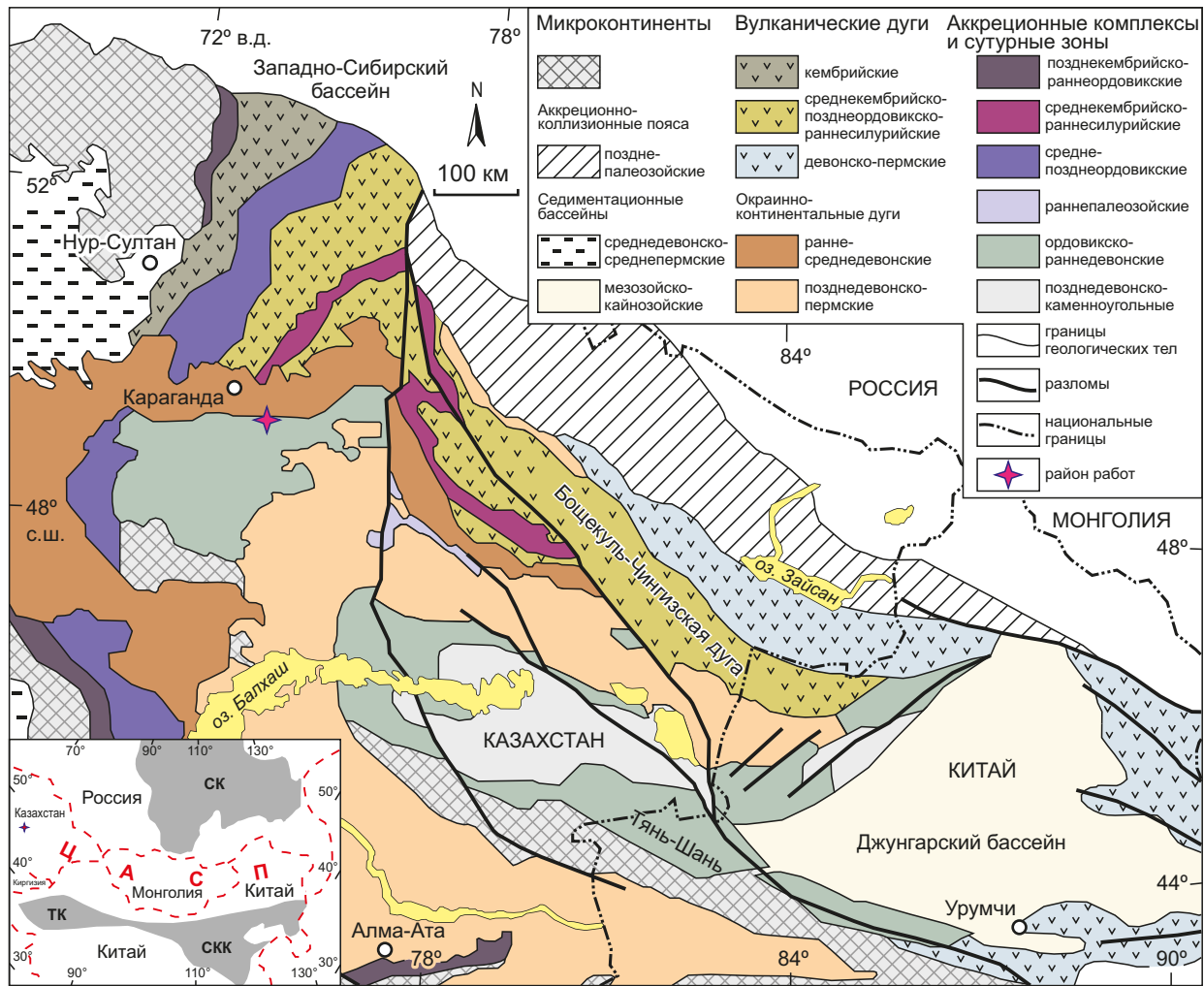


Рис. 1. Геотектоническая карта западной части Центрально-Азиатского складчатого пояса по [Windley et al., 2007]. Звездочкой показано положение района исследований.

Fig. 1. Geotectonic map of the western Central Asian Orogenic Belt [Windley et al., 2007]. The asterisk indicates the study area.

сдвигами на несколько сегментов [Stepanets, 2016]. В современном виде ТАК и офиолиты представляют собой структуру, по которой по данным сейсмозондирования произошло смещение земной коры и поверхности Мохо на 5–8 км [Shabalina, 2005].

В состав ТАК и офиолитового пояса входят как перidotиты, габбро и базальты, образованные на океанической плите, и их метаморфизованные аналоги, связанные с образованием серпентинитового меланжа, так и вулканиты основного и среднего состава и гранитоиды надсубдукционного происхождения. По данным U-Pb датирования цирконов возраст надсубдукционных плагиигранитов из блоков в серпентинитовом меланже составляет  $473 \pm 2$  и  $453 \pm 2$  млн лет [Degtyarev et al., 2021b]. По данным микропалеонтологических исследований ассоциирующие с вулканическими породами глубоководные кремнистые осадки имеют средне- и позднеордовикский возраст (рис. 3), определенный преимущественно по конодонтам, а обломочные породы (песчаники, алевропесчаники) имеют раннесилурийский возраст, зафиксированный по

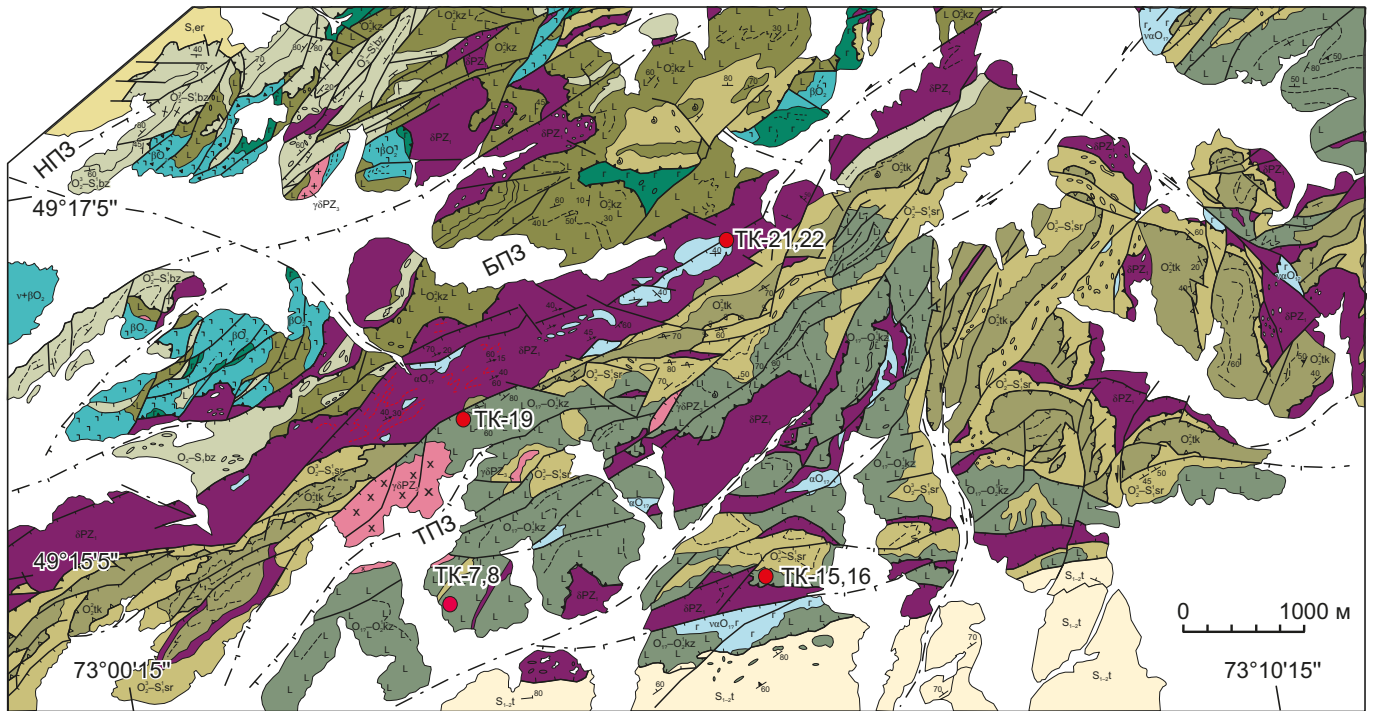
наличию граптолитов [Yakubchuk, 1990; Degtyarev et al., 2017]. Первые данные по химическому составу магматических пород ТАК появились только в последние годы [Khassen et al., 2020; Degtyarev et al., 2021b]. В данной статье сделан обзор геологического строения Тектурмасского аккреционного комплекса и смежного офиолитового пояса Центрального Казахстана и представлены первые геохимические данные, полученные авторами, по вулканическим породам, отобранным на участках Красная Поляна и Дуана-Корасы в центральной части ТАК (см. рис. 2).

## 2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И СТРАТИГРАФИЯ ТЕКТУРМАССКОЙ ЗОНЫ

Основными структурными элементами Тектурмасской зоны являются аккреционный комплекс и смежный с ним офиолитовый пояс (см. рис. 1), состоящие из надвинутых к северу тектонических пластин. Пластины сложены раннепалеозойскими магматическими и осадочными породами. Уже с 70-х годов прошлого столетия магматические породы гор Тектурмас

сопоставлялись с древней океанической корой, т.е. с офиолитовой ассоциацией [Antonyuk, 1974; Yakubchuk et al., 1988; Turmanidze et al., 1991; Stepanets et al., 1998]. Тектурмасский офиолитовый пояс включает магматические породы океанической литосферы и островных дуг, имеющих преимущественно основной состав, и серпентинитовый меланж с блоками осадочных и магматических пород [Yakubchuk, 1991; Antonyuk et al., 2020; Khassen et al., 2020; Degtyarev et al., 2021b].

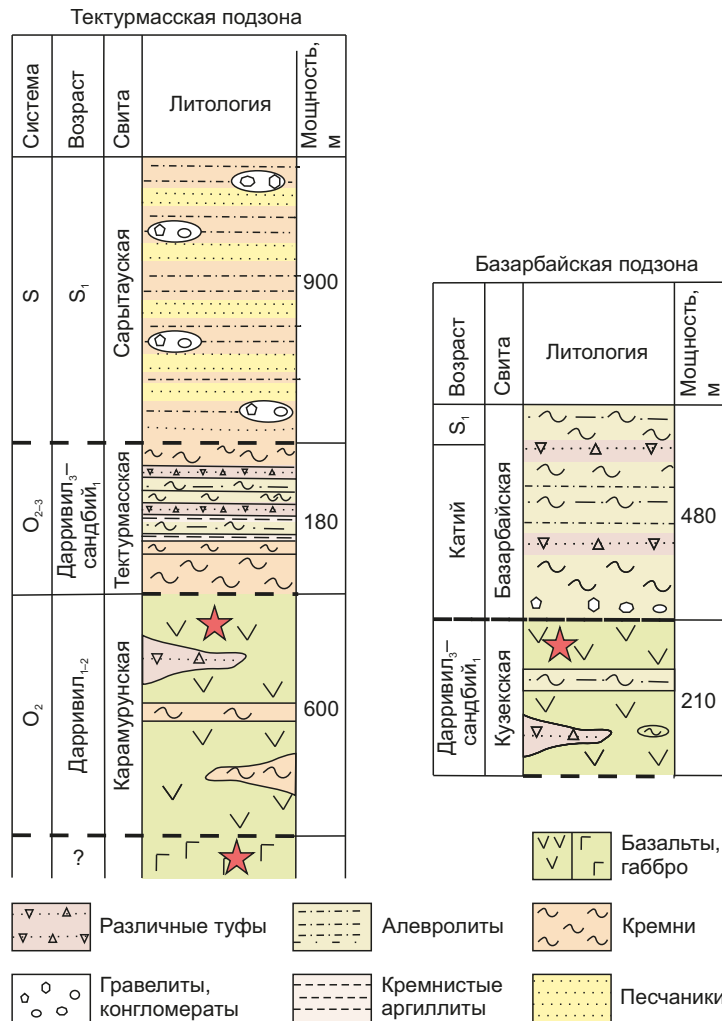
В Тектурмасской зоне выделяются три структурно-формационные подзоны, или сегмента, разделенные разломами, – Тектурмасская, Базарбайская и Нурина (см. рис. 2) [Antonyuk, 1974, 1976; Yakubchuk, 1991; Geodynamic Map..., 1995; Antonyuk et al., 2015]. **Тектурмасская подзона** протягивается с юго-запада на северо-восток на расстояние более 40 км (см. рис. 2). В рельефе она выражена в виде хребта и состоит из серпентинитового меланжа в основании и отложений



<b>S<sub>er</sub></b> Ермекская свита. Песчаники, алевролиты, конгломераты	<b>vO<sub>2</sub></b> Габброиды, габбро-амфиболиты. Средний ордовик	Границы пачек
<b>S<sub>1-2</sub>t</b> Песчаники, алевролиты с олистолитами кремнистых пород, базальтов, конгломераты	<b>vαO<sub>17</sub></b> Габброиды, габбро-амфиболиты, анортозиты. Ранний ордовик	Брекчия
<b>O<sub>2</sub>-S<sub>bz</sub></b> Базарбайская свита. Кремни, кремнистые аргиллиты и алевролиты, песчаники	<b>γδPZ<sub>3</sub></b> Палеозойские гранитоиды	Сланцеватость (а), трещиноватость (б)
<b>O<sub>2</sub>-S<sub>1</sub>sr</b> Сарытауская свита. Алевролиты и песчаники с олистолитами кремнистых пород тектурмасской и базальтов карамурунской свиты	<b>σPZ<sub>1</sub></b> Альпинотипные серпентиниты	Залегание: наклонное (а), перевернутое (б), вертикальное (в)
<b>Otk</b> Тектурмасская свита. Кремни, кремнистые аргиллиты и алевролиты	Линзы кремней в базальте (а) и блоки в серпентинитовом меланже (б)	Тектонические покровы: граница с гипербазитами (а), конседиментационные (б), в опрокинутом залегании (в)
<b>O<sub>2</sub>kz</b> Кузекская свита. Базальты с прослоями кремнистых аргиллитов и алевролитов	Базальты (а), диабазы (б)	Вбросы (а) и надвиги (б). Ранний карбон
<b>O<sub>17</sub>-O<sub>2</sub>kz</b> Измененные базальты, кремни, аргиллиты, дациты, риодациты, трахиты	Амфиболиты, габбро-амфиболиты	Разломы: достоверные (а), предполагаемые (б). PZ <sub>3</sub> – MZ <sub>1</sub>
<b>β,v+βO<sub>2</sub></b> Диабазы и габбро-диабазы	Плагииграниты (а), гранодиориты (б)	Стратиграфические границы (а), элементы стратификации (б)

**Рис. 2.** Схема геологического строения ТАК Центрального Казахстана по [Yakubchuk, 1991]. Красные точки – точки отбора образцов. Подзоны: ТПЗ – Тектурмасская, БПЗ – Базарбайская, НПЗ – Нурина.

**Fig. 2.** Geological structure of the Tekturmas accretionary complex, Central Kazakhstan [Yakubchuk, 1991]. Red dots show the sampling sites. Subzones: ТПЗ – Tekturmas, БПЗ – Bazarbai, НПЗ – Nura.



**Рис. 3.** Обобщенные литолого-стратиграфические колонки Тектурмасской и Базарбайской зон Северного Казахстана по [Khassen et al., 2020]. Штрихом показаны тектонические границы. Красные звездочки – точки отбора образцов.

**Fig. 3.** Generalized lito-stratigraphic columns of Tekturmas and Bazarbay zones of northern Kazakhstan [Khassen et al., 2020]. The dashed line shows the tectonic boundaries. Red asterisks show the sampling sites.

карамурунской, тектурмасской и сарытаусской свит. Основные формации – перидотиты, габбро, базальты и кремнистые осадки и их метаморфизованные аналоги, связанные с образованием серпентинитового меланжа [Antonyuk, 1974; Kuznetsov, 1980; Turmanidze et al., 1991; Stepanets, 2016]. Меланж состоит из лизардитового и хризотил-лизардит-гарцбургитового матрикса и блоков дунитов, лерцолитов, пироксенитов, долеритов и габбро (рис. 4, а, б), а также гнейсов, кремней и базальтов, плагиогранитов, сиенитов и амфиболитов. Все контакты перидотитов и габброидов с базальтами карамурунской толщи являются тектоническими [Antonyuk, 1976; Avdeev, 1986; Antonyuk et al., 1988].

Самая древняя свита – карамурунская (Є<sub>1</sub>-O<sub>2</sub>kr) – меланж, состоящий преимущественно из основных пород, представленных деформированными пиллоу-лавами, базальтовыми лавобрекчиями, содержащими олистоилиты кремней и кремнистых сланцев (см. рис. 3).

Базальты – массивные и миндалекаменные – как правило, изменены постмагматическими процессами,

часто в контакте с пелагическими кремнями (рис. 4, в). Мощность потоков пиллоу-лав (рис. 4, г) достигает 20–50 м. Общая мощность свиты – от 150–200 до 500–600 м. Возраст, определенный по конодонтам из кремней олистоилитов и олистоплак, охватывает интервал от нижнего до среднего ордовика [Novikova et al., 1991]. В состав более молодой тектурмасской свиты (O<sub>2-3</sub>tk) входят преимущественно красные, розовые и шоколадные ленточные кремни, часто смятые в складки, будинированные, с тонкими прослоями кремнистых аргиллитов, серых кремнистых алевролитов и сланцев. Мощность отдельных слоев кремней от 0.5 до 2.0 м, а кремнистых аргиллитов и алевролитов – 0.5–1.0 см [Khassen et al., 2020]. Кремни часто среди магматических пород и в виде фрагментов разрушенных и сложно деформированных тектонических чешуй встречаются в составе олистостром (см. рис. 2). Четких взаимоотношений между тектурмасской свитой и другими стратиграфическими подразделениями зоны не задокументировано. Ее средневерхнеордовикский возраст

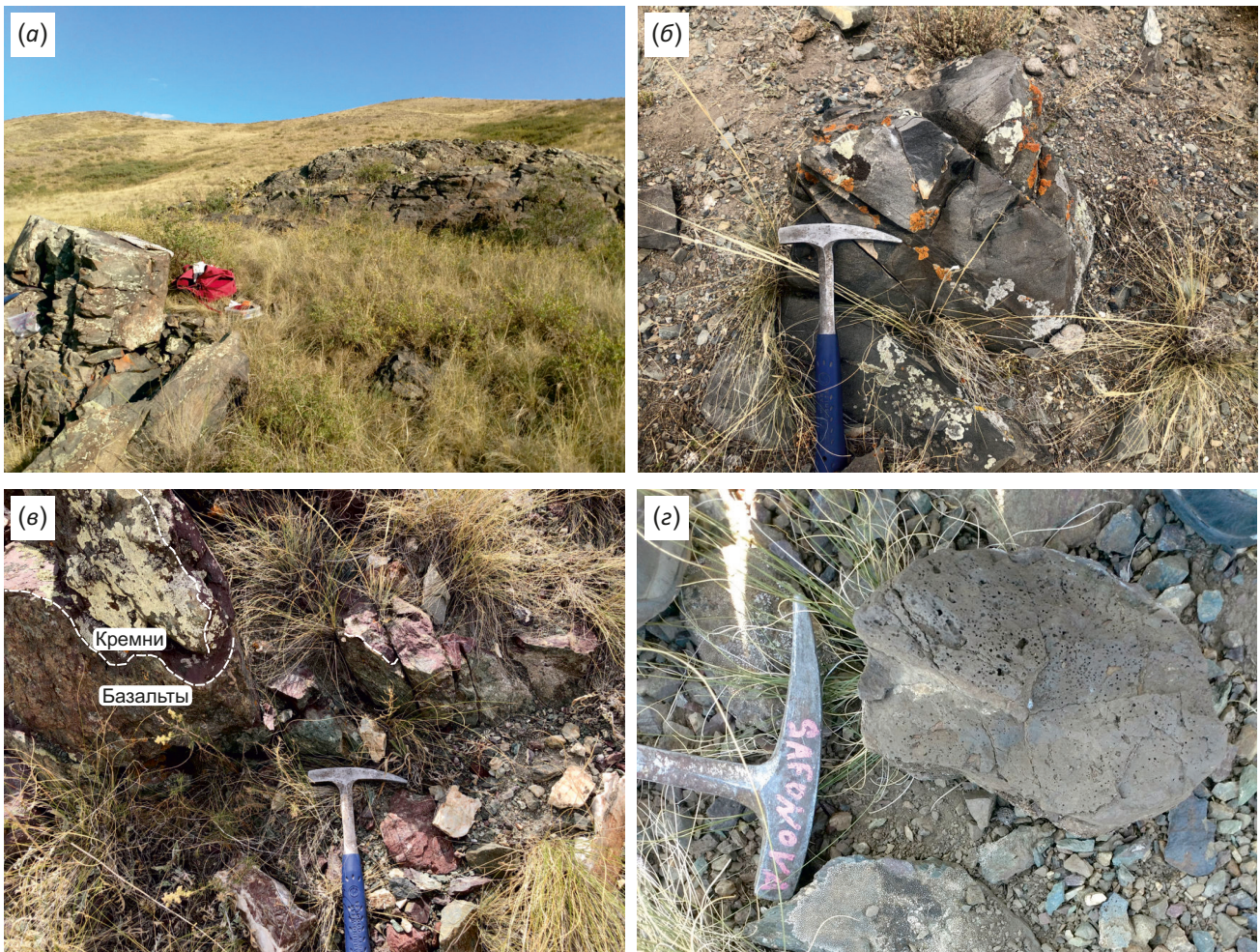
(см. рис. 3) определен по конодонтам трех комплексов: нижний дарривилл, верхний дарривилл и нижний сандбий [Kurkovskaya, 1985; Novikova et al., 1991; Gridina, 2003]. Мощность свиты оценивается в 150–250 м. Но реальная мощность обеих свит может быть существенно меньше, поскольку слои кремнистых осадков надвинуты друг на друга, что характерно для практически всех аккреционных комплексов мира [Isozaki et al., 1990; Wakita, 2012; Safonova et al., 2016; Maruyama et al., 2018].

Севернее Тектурмасской подзоны расположена **Базарбайская подзона**, которая включает породы кузекской и базарбайской свит (см. рис. 2) [Antonyuk, 1974; Yakubchuk et al., 1988]. Для нее характерно распространение магматических пород офиолитовой ассоциации: расслоенное габбро, комплекс параллельных даек, базальты и гранитоиды. Пиллоу-лавы базальтов ассоциируют с кремнистыми алевролитами и туффитами и относятся к кузекской свите. Кремнистые алевролиты содержат конодонты верхнего дарривилла (средний ордовик) и нижнего сандбия (верхний ордовик)

[Degtyarev et al., 2017]. U-Pb возраст плагиогранитов составляет  $489 \pm 8$  млн лет [Degtyarev et al., 2017]. Выше залегают глубоководные кремнистые туфогенные осадочные породы, выделяемые в базарбайскую свиту и перекрывающие дайковый комплекс, плагиограниты и вулканиты.

**Кузекская свита** ( $O_{2kz}$ ) сложена массивными и миндалекаменными пиллоу-базальтами с прослоями кремнистых алевролитов и туффитов и с линзами лавабрекчий и туфов основного состава (см. рис. 3). Границы кузекской свиты с другими стратиграфическими подразделениями в современной покровно-складчатой структуре тектонические. Комплекс конодонтов датирует возраст пород свиты как поздний лланвирн – ранний лландейло [Degtyarev et al., 2017]. По приведенным комплексам конодонтов кузекскую свиту можно сопоставить по возрасту с кремнистой тектурмасской свитой.

**Базарбайская свита** ( $O_{3bz}$ ) состоит из ленточных кремней, местами с прослоями туфов, кремнистых аргиллитов и алевролитов, кремнистых туфов и туффитов



**Рис. 4.** Фото обнажений магматических пород ТАК. (а) – тело габбро; (б) – долеритовая дайка; (е) – контакт вишневых кремней и базальтов карамурунской свиты; (з) – подушечная пиллоу-лава.

**Fig. 4.** Photos of outcrops of TAC magmatic rocks. (a) – gabbro body; (б) – dolerite dike; (е) – contact of cherry chert and basalt of the Karamurun Fm.; (з) – pillow lava.

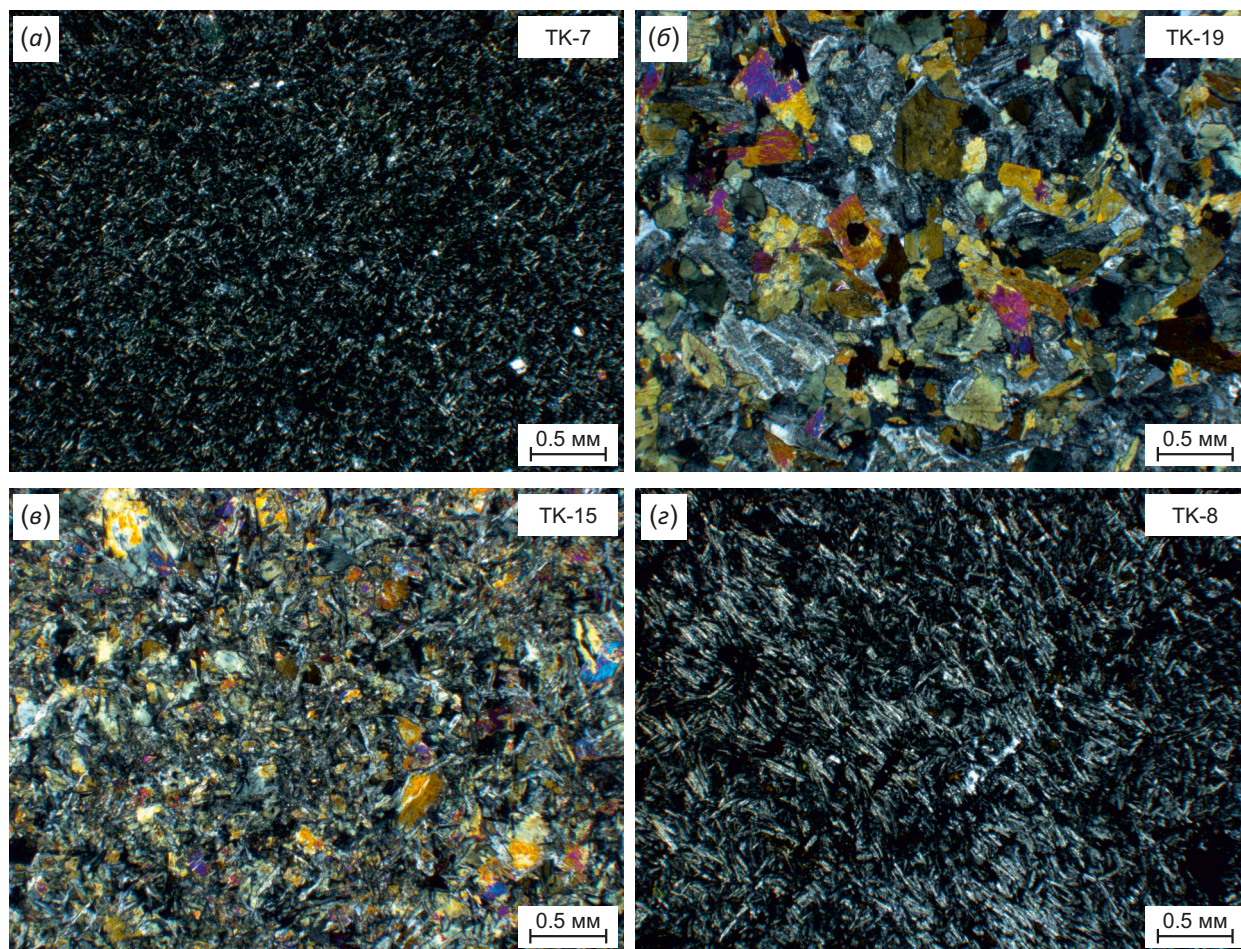
с преобладанием пепла, базальтовых и андезитовых туфов, туфопесчаников, полимиктовых и вулканомиктовых песчаников (граувакк) [Antonyuk, 1971]. Позднеордовикский (позднекарадокский – раннеашгильский) возраст свиты определен по радиоляриям и беззамковым брахиоподам, а также конодонтам в кремнях [Novikova et al., 1991]. Базарбайская свита залегает в едином структурном плане с отложениями кузекской свиты и серпентинитовым меланжем и перекрывается силурийским флишем [Antonyuk, 1971, 1974; Yakubchuk et al., 1988] (см. рис. 2, 3). Мощность базарбайской свиты оценивается в 480–500 м.

**Нурина́нская подзона** протягивается в северо-восточном направлении, она ограничена разломами, а ее ширина меняется от 20 км на западе до 70 км на востоке (см. рис. 2). Она сложена мощными терригенным и флишоидным комплексами силура – нижнего девона, включающими олистостромы с олистоплаками базальтов и кремней, линзы органогенных известняков, горизонты конгломератов, гравелитов, прослой туффитов. Главными формациями являются верхнеордовикско-нижнесилурийские кремнистые осадки, силурийско-нижнедевонские обломочные породы и средневерхнедевонские вулканогенно-осадочные породы

общей мощностью до 5000 м [Chetvertikova et al., 1966; Geological Map..., 1981; Decisions..., 1991]. Некоторые исследователи считают, что Нурина́нская подзона находится на месте зоны субдукции и представляет собой преддуговой прогиб, контролирующей расположенный севернее девонский вулканоплуто́нический пояс [Yakubchuk, 1990]. В целом, среднепалеозойские кремнисто-обломочные толщи Нурина́нской зоны перекрывают более древние комплексы Тектурмасской и Базарбайской подзон [Degtyarev et al., 2021b]. В статье представлены данные по проанализированным магматическим породам основного и среднего состава, отобранным из карамурунской свиты Тектурмасской подзоны и кузекской свиты Базарбайской подзоны (см. рис. 3; рис. 4).

### 3. ПЕТРОГРАФИЯ

Магматические ассоциации ТАК представлены вулканическими и субвулканическими породами: базальтами, андезибазальтами, андезитами, долеритами и габбро (рис. 5). Преобладающая разновидность пород – базальты и андезибазальты с массивной и миндалекаменной текстурой и афировой и порфировой микроструктурой (рис. 5, а), часто в виде пиллоу-лав в контакте



**Рис. 5.** Фото шлифов магматических пород ТАК. (а) – афировый базальт; (б) – габбро; (в) – долерит; (г) – андезит.

**Fig. 5.** Photos of thin sections (crossed nicols) of TAC igneous rocks. (a) – aphyric basalt; (б) – gabbro; (в) – dolerite; (г) – andesite.

с глубоководными осадками – ленточными кремнями и кремнистыми аргиллитами (см. рис. 4, а). В порфировых вулканитах присутствуют вкрапленники плагиоклаза размером до 2.5 мм (5–25 % объема породы), оливина (обычно замещенного хлоритом) и клинопироксена размером до 2 мм. Клинопироксен плеохроирует от бесцветного до бледно-розового и часто обладает параллельной отдельностью, что характерно для титан-авгита или титан-салита – типичных минералов щелочных базальтов [Safonova et al., 2016]. Структуры основной массы: интерсертальная, микролитовая, пилотакситовая и пойкилоофитовая. Миндалины (до 25 % объема породы) имеют диаметр от 1 до 5 мм и заполнены кальцитом, эпидотом, кварцем и хлоритом.

Субвулканические разновидности – долериты и микрогаббро (рис. 5, б, в) отмечаются в центральных частях лавовых потоков или больших «подушек» пиллоу-лав базальтов. Долериты имеют долеритовую, микродолеритовую и микроофитовую микроструктуру и массивную текстуру. Они состоят из плагиоклаза, клино-, иногда ортопироксена. Габброиды, имеющие микрогаббровую структуру и массивную текстуру, состоят из клинопироксена и плагиоклаза, изредка присутствуют ортопироксен и оливин. Более кислые разновидности представлены андезитами с массивной текстурой и порфировой структурой (рис. 5, г). Вкрапленниками (5–10 % объема породы) являются плагиоклаз и хлоритизированный минерал, возможно пироксен. Структура основной массы преимущественно гиалопилитовая.

Большая часть вулканических и субвулканических пород метаморфизована в условиях фации зеленых сланцев, вероятно в условиях гидротермального метаморфизма морского дна, а также в результате более поздних тектонических процессов, связанных с аккрецией и коллизией. Повсеместно наблюдаются процессы альбитизации и сосюритизации по плагиоклазу. Наиболее распространенными вторичными минералами являются альбит, хлорит, кальцит, эпидот, пренит, актинолит, лейкоксен, рудные минералы и халцедон.

#### 4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Результаты исследования химического состава магматических пород карамурунской и кузекской свит (см. рис. 3) показали, что среди них преобладают базальты и андезибазальты. На классификационной диаграмме TAS (рис. 6, а) большинство точек составов изученных пород попадают в поля базальтов, трахибазальтов, базальтовых трахиандезитов и андезибазальтов. Несколько точек попадают в поля базанита, фонотефрита, трахиандезита и андезита. На классификационной диаграмме  $\text{SiO}_2$  – Nb/Y, основанной на относительно немобильных элементах, большинство пород относится к субщелочным базальтам (рис. 6, б). Для магматических пород ТАК характерны широкие вариации значений  $\text{Mg}\#$  (26.0–80.1) при разбросе концентраций MgO от 2.2 до 13.4 мас. %. Содержания  $\text{SiO}_2$  варьируются от 42.6 до 56.6 мас. % (табл. 1),  $\text{TiO}_2$  – от 0.35 до

2.85 мас. %, CaO – от 2.3 до 15.1 мас. % и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – от 11.5 до 18.3 мас. %. На диаграмме  $\text{SiO}_2$  –  $\text{FeO}^*/\text{MgO}$  (рис. 6, в) точки составов пород соответствуют и толеитовой, и известково-щелочной серии. На треугольной диаграмме Дженсена [Jensen, 1976] подавляющее большинство образцов попадает в поле высокожелезистых толеитов, толеитовых базальтов и толеитовых андезитов (рис. 6, г), но часть составов соответствует известково-щелочным базальтам и андезитам. Базальты и андезибазальты можно разделить на три группы по содержанию  $\text{TiO}_2$ : высоко-Ti ( $\text{TiO}_2 > 1.9$  мас. %), средне-Ti ( $\text{TiO}_2 = 0.9$ –1.8 мас. %) и низко-Ti ( $\text{TiO}_2 < 0.9$  мас. %). Отдельную группу составляют андезиты (рис. 6, а, б; рис. 7, а; табл. 1).

Большинство высоко- и средне-Ti образцов характеризуется низкими до средних содержаниями MgO (4.1–9.4 мас. %). Для низко-Ti разновидностей отмечается более широкий разброс ( $\text{MgO} = 2.9$ –13.4 мас. %) (табл. 1). На бинарных диаграммах  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$  и CaO по отношению к MgO точки составов пород четких трендов не образуют (рис. 7, а, б, в). На графиках MgO – редкие элементы (рис. 7, г, д, е) четко выделяются три группы, соответствующие средне-Ti и низко-Ti базальтам и щелочным андезитам. Для щелочных андезитов концентрации Th, Y, Zr значительно выше, а для низко-Ti образцов характерны самые низкие концентрации несовместимых элементов (табл. 2).

На спектрах редкоземельных элементов (РЗЭ), нормированных на хондрит, образцы низко-Ti группы обогащены легкими РЗЭ ( $\text{La}/\text{YbN} = 1.7$ –2.2), умеренно дифференцированы в области тяжелых РЗЭ ( $\text{Gd}/\text{YbN} = 1.2$ –1.3) и характеризуются высокими отношениями  $\text{Zr}/\text{Nb}$  (20–36) (рис. 8, а). На мультиэлементных диаграммах, нормированных по примитивной мантии, отмечается отрицательная аномалия по Nb ( $\text{Nb}/\text{ThN} = 0.2$ –0.4,  $\text{Nb}/\text{LaN} = 0.2$ –0.4) (рис. 8, б), что присуще породам надсубдукционного происхождения [Pearce, 1982; Briquet et al., 1984; Safonova et al., 2017]. Спектры РЗЭ средне-Ti образцов плоские и дифференцированы в области тяжелых РЗЭ ( $\text{La}/\text{YbN} = 0.3$ –0.7,  $\text{Gd}/\text{YbN} = 1$ ), а отношения  $\text{Zr}/\text{Nb}$  заметно ниже (10–22), чем у низко-Ti образцов. На мультикомпонентных диаграммах для средне-Ti образцов фиксируются максимумы Nb по отношению к Th ( $\text{Nb}/\text{ThN} = 3.6$ –2.1), но не к La ( $\text{Nb}/\text{LaN} = 1.0$ –1.7) (рис. 8, а, б), что свойственно базальтам океанических хребтов (N-MORB) [Sun, McDonough, 1989].

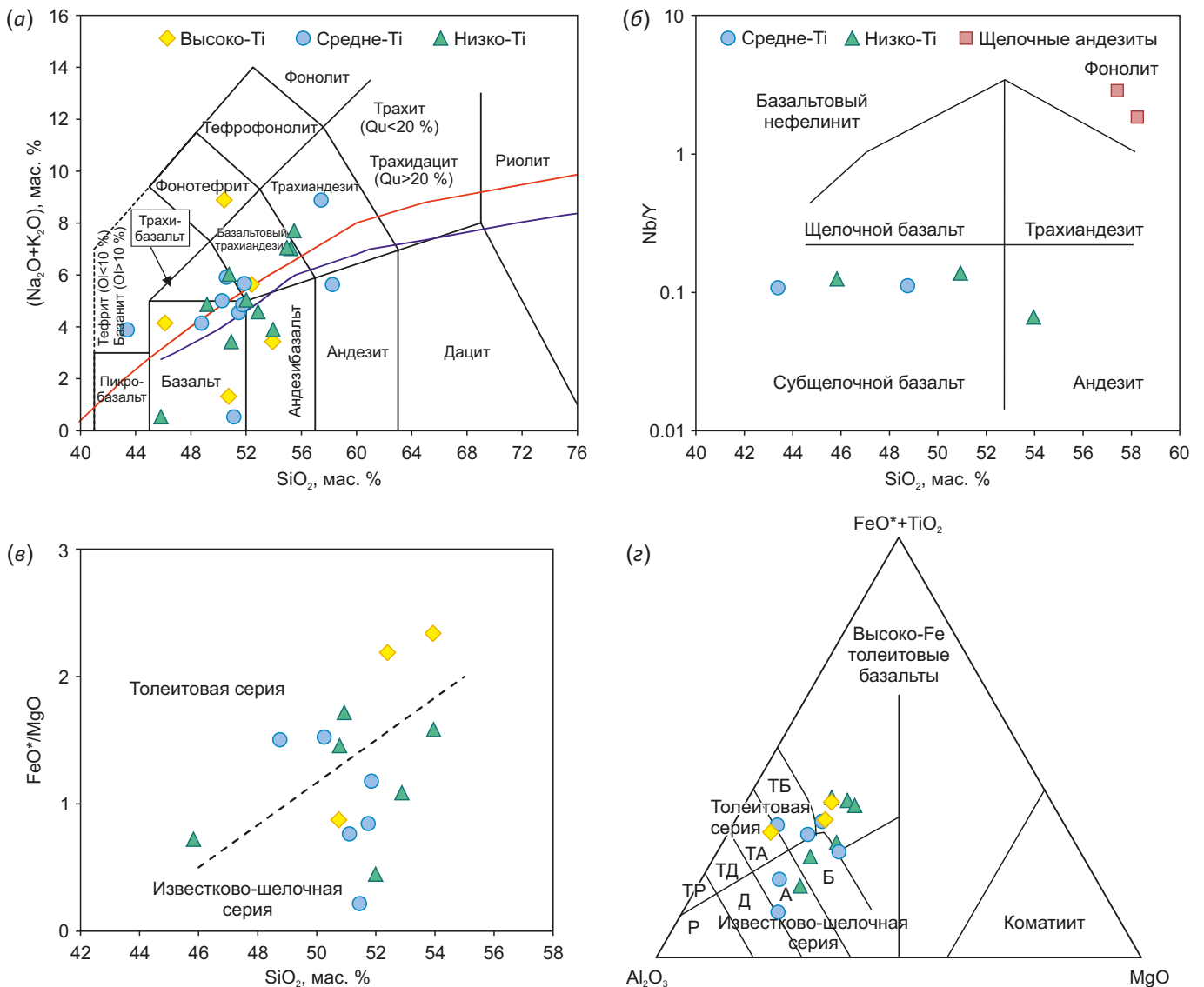
Высоко-Ti породы наиболее обогащены редкими элементами и представлены щелочными андезитами (рис. 8, а, б; табл. 2). Их спектры РЗЭ обогащены в области легких компонентов и дифференцированы в области тяжелых ( $\text{La}/\text{YbN} = 6.8$ –10.9,  $\text{Gd}/\text{YbN} = 1.6$ –2.3) (рис. 8, а) при заметно более низких отношениях  $\text{Zr}/\text{Nb}$  (5.7–5.9). На мультикомпонентных спектрах для щелочных андезитов фиксируется отрицательная аномалия по Ti ( $\text{Ti}/\text{Ti}^* = 0.2$ –0.3) и положительная по Nb ( $\text{Nb}/\text{ThN} = 1.3$ –1.4,  $\text{Nb}/\text{LaN} = 1.4$ –1.3) (рис. 8, б). Сильно обогащенные легкими компонентами спектры редкоземельных элементов, наличие максимума по Nb на



мультиэлементных диаграммах и низкие отношения Zr/Nb характерны для внутриплитных океанических базальтов (OIB), но не аномалия по Ti, которая отмечается только для андезитов. Такие специфические андезиты образуются, так же как и OIB, во внутриплитных океанических обстановках, например на островах Тристан-да-Кунья [An et al., 2016; Weit et al., 2017; Sun, McDonough, 1989].

На дискриминационной диаграмме Муллена [Mullen, 1983] точки составов пород низко-Ti группы попадают в поля островодужных толеитов и известково-щелочных базальтов (рис. 9, а), а на диаграмме Мешед

[Meschede, 1986] – в поле базальтов срединно-океанических хребтов (рис. 9, б). Точки составов средне-Ti образцов на обеих диаграммах попадают в поле базальтов срединно-океанических хребтов, но на диаграмме Муллена несколько точек соответствуют островодужным толеитам (рис. 9, а, б). На диаграмме Мешед составы высоко-Ti андезитов попадают в поле внутриплитных базальтов (рис. 9, б). И хотя океанические острова сложены в основном базальтами, как упоминалось уже выше, в их составе также встречаются щелочные андезибазальты и андезиты [An et al., 2016; Weit et al., 2017].



**Рис. 6.** Классификационные диаграммы для магматических пород ТАК. (а) – диаграмма TAS (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) – SiO<sub>2</sub> [Le Maitre, 2002]; (б) – диаграмма Nb/Y – SiO<sub>2</sub> [Winchester, Floyd, 1977]; (в) – график SiO<sub>2</sub> – FeO\*/MgO для разделения составов на толеитовую и известково-щелочную серии; (г) – диаграмма Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – FeO\*+TiO<sub>2</sub> – MgO [Jensen, 1976]; толеитовая серия: ТБ – базальт; ТА – андезит, ТД – дацит, ТР – риолит; известково-щелочная серия: Б – базальт, А – андезит, Д – дацит, Р – риолит.

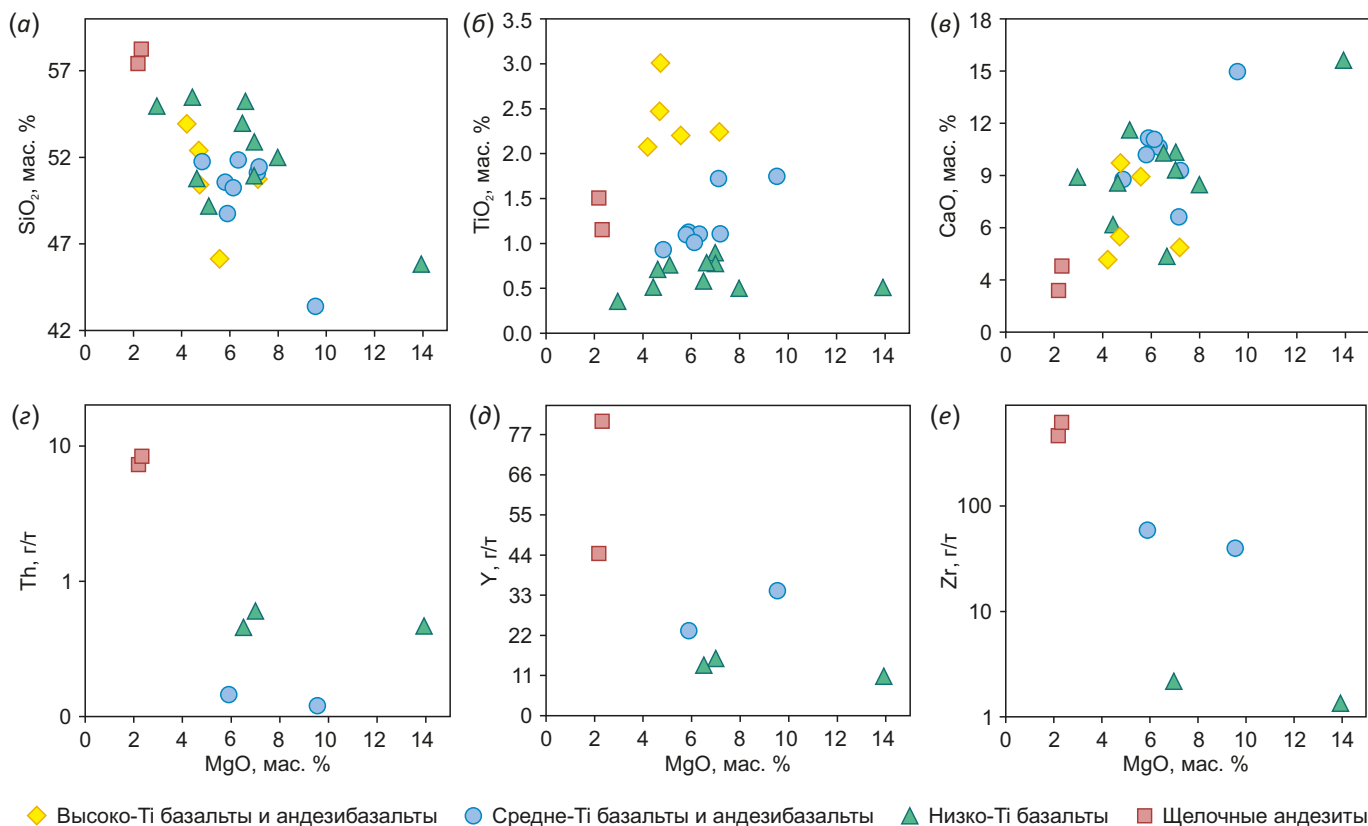
**Fig. 6.** Classification diagrams for igneous rocks of the TAC. (a) – TAS diagram (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) – SiO<sub>2</sub> [Le Maitre, 2002]; (б) – Nb/Y – SiO<sub>2</sub> diagram [Winchester, Floyd, 1977]; (в) – SiO<sub>2</sub> – FeO\*/MgO plot for separating compositions into tholeiitic and calc-alkaline series; (г) – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – FeO\*+TiO<sub>2</sub> – MgO triangle diagram [Jensen, 1976]; tholeiitic series: ТБ – basalt; ТА – andesite, ТД – dacite, ТР – rhyolite; calc-alkaline series: Б – basalt, А – andesite, Д – dacite, Р – rhyolite.

**Таблица 1.** Состав породообразующих окислов магматических пород из представительных образцов ТАК  
**Table 1.** Concentrations of major oxides in TAC igneous rocks (selectively)

№	Образец	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	MgO	CaO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ППП	Сумма
1	540/2	50.9	2.4	15.29	11.11	4.57	5.32	0.16	4.53	2.32	0.54	1.14	98.28
2	K-14	51.96	2	17.16	10.55	4.06	4	0.01	4.9	1.52	0.11	2.21	98.48
3	TK-21	42.62	1.72	11.53	16.73	9.38	14.69	0.23	1.23	0.07	0.03	1.88	100.11
4	TK-22	47.35	1.09	18.31	9.58	5.73	10.81	0.14	3.01	1.02	0.07	2.93	100.04
5	K-84a	49.32	1.05	15.13	7.9	6.03	10.09	0.11	5.2	0.2	0.08	3.55	98.66
6	Zg6	48.28	1.05	16.55	5.28	5.54	9.71	0.2	4.9	0.74	0.09	5.46	97.80
7	K-84	49.7	1	15.76	10.28	6.07	10.93	0.1	4.8	0.2	0.1	1.12	100.06
8	TK-19	49.99	0.88	14.53	13.11	6.87	9.12	0.19	2.61	0.76	0.08	1.98	100.12
9	750/4	51.74	0.76	15.09	8.28	6.86	10.1	0.14	2.2	2.33	0.38	2.45	100.33
10	768	53.42	0.76	18.02	6.77	6.42	4.2	0.14	4.3	2.52	0.19	3.3	100.04
11	Zg2	46.51	0.72	16.11	7.41	4.84	10.96	0.19	3.7	0.9	0.27	5.92	97.53
12	TK-15	52.96	0.57	12.83	11.24	6.39	10.08	0.17	3.69	0.13	0.07	1.96	100.09
13	Sb5	54.01	0.5	17.13	3.45	4.32	5.99	0.11	4	3.5	0.29	4.94	98.24
14	TK-16	44.22	0.49	11.8	10.77	13.44	15.05	0.15	0.47	0.05	0.05	3.68	100.17
15	Zg1	53.8	0.35	15.99	6.19	2.91	8.7	0.08	6.8	0.14	0.14	3.93	99.03
16	TK-8	56.6	1.48	16.58	9.79	2.16	2.34	0.18	5.77	2.99	0.68	1.52	100.09
17	TK-7	56.53	1.12	14.32	12.84	2.26	3.67	0.51	4.44	1.03	0.35	3.08	100.15

Примечание. 1–2 – высоко-Тi базальты; 3 – средне-Тi базальт; 4–15 – низко-Тi базальты и андезибазальты; 16–17 – щелочные андезиты. \* – все железо дано в виде Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Note. 1–2 – high-Ti basalts; 3 – medium-Ti basalt; 4–15 – low-Ti basalts and andesibasalts; 16–17 – alkaline andesites. \* – all iron is given as Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



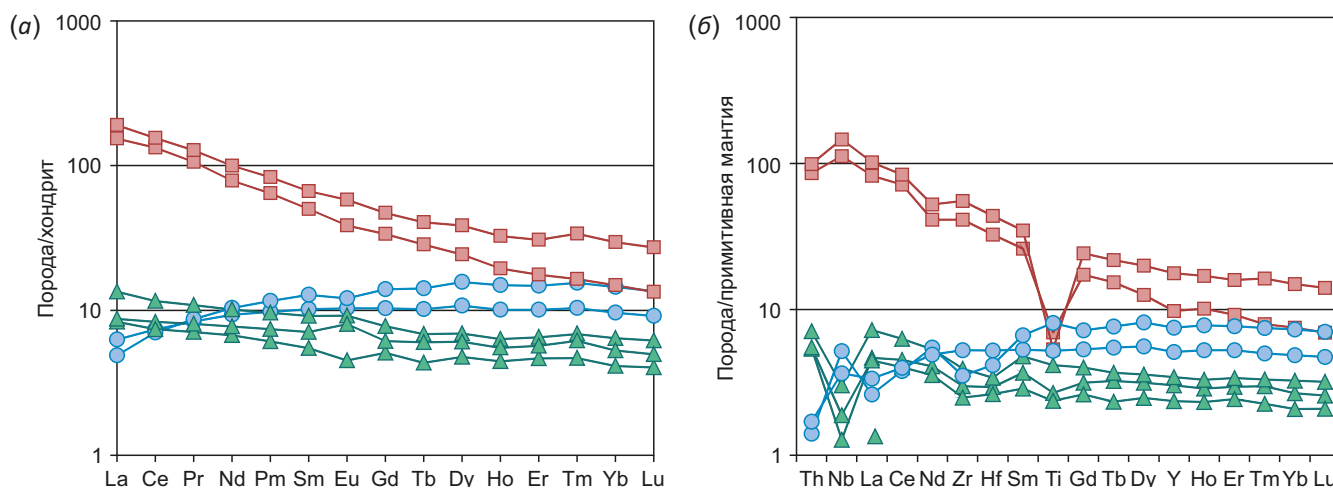
**Рис. 7.** Содержание породообразующих и редких элементов по отношению к MgO для магматических пород ТАК.  
**Fig. 7.** MgO versus major oxides and trace elements of TAC igneous rocks.

**Таблица 2.** Редкоземельный состав магматических пород ТАК  
**Table 2.** Concentrations of trace elements in TAC igneous rocks

№	1	2	3	4	5	6	7
Образец	TK-21	TK-22	TK-19	TK-15	TK-16	TK-8	TK-7
Rb	0.40	17.80	10.70	0.89	0.47	30.00	15.90
Sr	48.00	271.00	350.00	339.00	38.00	333.00	320.00
Ba	11.60	68.00	143.00	51.00	9.70	908.00	506.00
Cs	0.10	0.25	0.57	0.16	0.30	0.34	0.25
Y	34.00	23.00	15.60	13.80	10.7	44.00	81.00
Zr	39.00	59.00	44.00	33.00	28.00	462.00	619.00
Nb	4.70	2.60	2.20	0.91	1.34	80.00	104.00
La	1.80	2.30	5.00	3.20	3.10	57.00	70.00
Ce	6.70	7.10	11.20	8.00	7.10	127.00	149.00
Pr	1.20	1.20	1.53	1.23	0.97	14.30	18.00
Nd	7.40	6.70	7.20	5.50	4.80	56.00	71.00
Sm	3.00	2.40	2.10	1.64	1.27	11.60	15.40
Eu	1.06	0.90	0.80	0.70	0.39	3.40	5.10
Gd	4.30	3.20	2.40	1.88	1.56	10.30	14.40
Tb	0.82	0.59	0.40	0.35	0.25	1.65	2.40
Dy	6.00	4.10	2.60	2.30	1.82	9.30	14.70
Ho	1.27	0.86	0.54	0.47	0.38	1.66	2.80
Er	3.70	2.50	1.63	1.42	1.16	4.40	7.60
Tm	0.55	0.37	0.24	0.22	0.17	0.59	1.21
Yb	3.60	2.40	1.60	1.32	1.03	3.70	7.40
Lu	0.52	0.35	0.24	0.19	0.15	0.51	1.04
Hf	1.29	1.62	1.05	0.91	0.81	10.00	13.50
Ta	0.26	0.18	0.07	0.11	0.07	4.90	6.00
Th	0.00	0.14	0.60	0.46	0.47	7.30	8.40
U	0.04	0.07	0.28	0.25	0.20	1.12	2.40

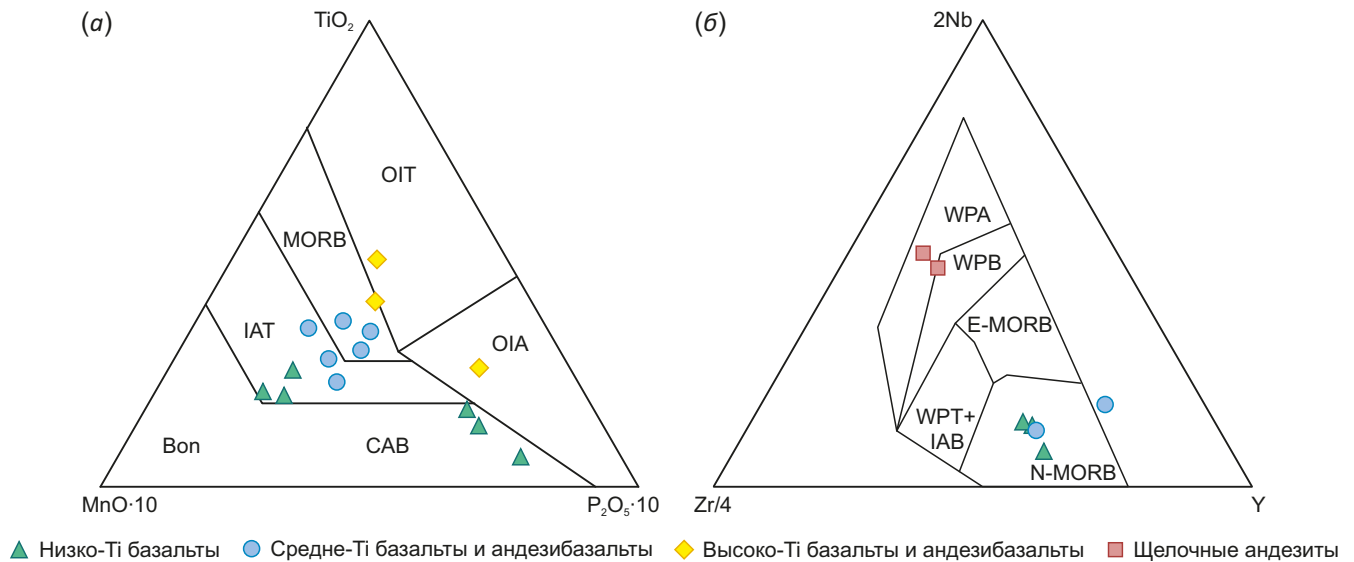
Примечание. 1-2 – средне-Ti базальты и андезибазальты; 3-5 – низко-Ti базальты; 6-7 – щелочные андезиты.

Note. 1-2 –medium-Ti basalts and andesibasalts; 3-5 – low-Ti basalts; 6-7 – alkaline andesites.



**Рис. 8.** Нормированные по хондриту кривые распределения редкоземельных элементов (а) и нормированные по примитивной мантии мультикомпонентные диаграммы (б) для магматических пород ТАК. Данные для хондрита и примитивной мантии взяты из [Sun, McDonough, 1989]. Символы как на рис. 6.

**Fig. 8.** Chondrite-normalized rare-earth element patterns (a) and primitive mantle-normalized multi-component trace element patterns (б) of TAC igneous rocks. Normalization values are given after [Sun, McDonough, 1989]. Symbols are the same as in Fig. 6.



**Рис. 9.** Тектонические дискриминационные диаграммы.

(a) – диаграмма MnO – TiO<sub>2</sub> – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [Mullen, 1983]; (б) – диаграмма Zr/4 – 2Nb – Y [Meschede, 1986]; WPA – внутриплитные щелочные базальты, WPB – внутриплитные базальты, WPT+IAB – внутриплитные толеиты и островодужные базальты, Bon – бониниты, OIT – толеиты океанических островов/симаунтов, OIA – щелочные базальты океанических островов, IAT – островодужные толеиты, CAB – известково-щелочные базальты, MORB – базальты срединно-океанических хребтов.

**Fig. 9.** Tectonic diagrams of TAC igneous rocks.

(a) – MnO – TiO<sub>2</sub> – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> [Mullen, 1983]; (б) – Zr/4 – 2Nb – Y [Meschede, 1986]. WPA – intraplate alkaline basalts, WPB – intraplate basalts, WPT+IAB – intraplate tholeiites and island-arc basalts, Bon – boninites, OIT – oceanic island/seamount tholeiites, OIA – oceanic island alkaline basalts, IAT – island-arc tholeiites, CAB – calc-alkaline basalts, MORB – mid-ocean ridge basalts.

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Геологическое и структурное положение (см. рис. 2, 3) и химический состав магматических пород ТАК свидетельствуют об их формировании в различных тектонических обстановках: в срединно-океаническом хребте, во внутриплитном океаническом поднятии (остров, симаунт, плато) и внутриокеанической или континентальной дуге. Совместное присутствие вулканических пород, образованных в различных геодинамических обстановках, как составе ТАК, т.е. в ассоциации с глубоководными океаническими осадками (пелагическими, гемипелагическими и глубоководного желоба), так и в серпентинитовом меланже затрудняет отнесение той или иной группы пород к конкретной свите или комплексу. На геологической карте чаще всего они показаны отдельными телами (см. рис. 2) или офиолитовыми комплексами [Degtyarev et al., 2021b]. Но де-факто многие средне-Тi и низко-Тi базальты находятся в прямом контакте (см. рис. 4, в) или в ассоциации с пелагическими осадками, т.е. образованы (излились) в глубоком океане и поэтому могут рассматриваться как элементы стратиграфии океанической плиты [Isozaki et al., 1990; Wakita, 2012; Safonova et al., 2016] и быть отнесены к той или иной свите (см. рис. 3). Следовательно, стратиграфические подразделения в этом регионе нуждаются в ревизии. Часть подразделений региона уже была пересмотрена на основе новых микропалеонтологических и геохронологических данных [Degtyarev et al., 2017, 2021b], но это пока не нашло отражения на официальных геологических картах. Пересмотр

геологических подразделений необходим и для более надежного поиска и разведки полезных ископаемых.

В Тektурмасской зоне выходы на поверхность магматических пород океанического происхождения (MORB, OIB) часто совмещены в пространстве с таковыми над-субдукционного происхождения (см. рис. 2). Но в современных дугах между аккрецированными толщами океанической коры и одновозрастной магматической дугой находятся более древние аккреционные комплексы [Safonova, 2017], что в регионе исследований пока не зафиксировано. Следовательно, можно предположить, что в ордовике и/или ранее были широко проявлены процессы тектонической эрозии, в результате которых одновозрастные породы аккреционной призмы и островной дуги были совмещены в пространстве [Safonova, Khanchuk, 2021]. Для решения всех этих вопросов нужны детальные геохронологические и изотопно-геохимические исследования.

Таким образом, Тektурмасский аккреционный комплекс и серпентинитовый меланж являются составными частями складчатого пояса тихоокеанского типа, образовавшегося при субдукции ордовикской океанической плиты. Стратиграфически, литологически, геохронологически и тектонически Тektурмасский пояс схож с Итмурундинским поясом в Северном Прибалхашье (см. рис. 1) [Stepanets, 2016; Safonova et al., 2019, 2020; Degtyarev et al., 2021a]. Оба пояса включают одновозрастные аккреционные комплексы, в том числе осадочные и магматические породы разного происхождения.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тектурмасский аккреционный комплекс и связанный с ним офиолитовый пояс являются частями складчатого пояса тихоокеанского типа позднекембрийско-ордовикского возраста, образованного на активной окраине Палеоазиатского океана. Вся структура представляет собой мозаику из фрагментов океанической коры, островных дуг, задуговых и преддуговых бассейнов, совмещенных в пространстве процессами аккреции и последующей коллизии. Магматические породы ТАК представлены преимущественно толеитовыми и субщелочными вулканитами и габброидами. По содержанию  $TiO_2$  базальты и андезибазальты можно разделить на три группы: высоко-Ti, средне-Ti и низко-Ti. Образцы из низко-Ti группы характеризуются обогащением легкими РЗЭ, высокими отношениями Zr/Nb и наличием на мультиэлементных диаграммах отрицательной аномалии по Nb. Средне-Ti образцы имеют плоские спектры РЗЭ, средние отношения Zr/Nb и максимумы Nb по отношению к Th, но не к La. Для щелочных андезитов характерно обогащение легкими РЗЭ, дифференцированные тяжелые РЗЭ, низкие отношения Zr/Nb, отрицательная аномалия по Ti и положительная по Nb на мультикомпонентных спектрах. Геологическая позиция и геохимические характеристики магматических пород ТАК предполагают образование средне-Ti базальтов в обстановке срединно-океанического хребта, высоко-Ti и щелочных андезитов – в обстановке океанического острова/симаунта, а низко-Ti вулканитов – в надсубдукционной обстановке.

## 7. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации.

The authors contributed equally to this article.

## 8. КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTERESTS

Авторы заявляют об отсутствии у них конфликта интересов. Все авторы прочитали рукопись и согласны с опубликованной версией.

The authors have no conflicts of interest to declare. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

## 9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

An A.-R., Choi S.H., Yu Y., Lee D.-C., 2016. Petrogenesis of Late Cenozoic Basaltic Rocks from Southern Vietnam. *Lithos* 272–273, 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.12.008>.

Antonyuk R.M., 1971. Volcanogenic-Siliceous Formations of Central Kazakhstan. In: *Stratigraphy of the Precambrian of Kazakhstan and the Tien Shan*. MSU Publishing House, Moscow, p. 152–160 (in Russian) [Антонюк Р.М. Вулканогенно-кремнистые формации Центрального Казахстана // Стратиграфия докембрия Казахстана и Тянь-Шаня. М.: Изд-во МГУ, 1971. С. 152–160].

Antonyuk R.M., 1974. Oceanic Crust of the Eugeosynclinal Region of Eastern Central Kazakhstan. In: *Tectonics of the Ural-Mongolian Folded Belt*. Nauka, Moscow, p. 67–69 (in Russian) [Антонюк Р.М. Океаническая кора эвгеосинклинали восточного Центрального Казахстана // Тектоника Урало-Монгольского складчатого пояса. М.: Наука, 1974. С. 67–69].

Antonyuk R.M., 1976. Early Geosyncline Paleozoic Magmatic Formations of Central Kazakhstan. *Bulletin of the Academy of Sciences of KazSSR. Geological Series* 4, 81–85 (in Russian) [Антонюк Р.М. Раннегеосинклинали магматические формации палеозоя Центрального Казахстана // Известия АН КазССР. Серия геологическая. 1976. № 4. С. 81–85].

Antonyuk R.M., Burmak A.L., Gerasimova N.A., Grankin M.S., Lykov L.I., Novikova M.Z., Serykh V.I., Stepanets V.G., Yakubchuk A.S., 1988. Magmatic Complexes of the Central Kazakhstan. *Excursion Guide of the IV Kazakhstan Petrography Meeting*. Karaganda, 62 p. (in Russian) [Антонюк Р.М., Бурмак А.Л., Герасимова Н.А., Гранкин М.С., Лыков Л.И., Новикова М.З., Серых В.И., Степанец В.Г., Якубчук А.С. Магматические комплексы Центрального Казахстана: Путеводитель экскурсии IV Казахстанского петрографического совещания. Караганда, 1988. 62 с.].

Antonyuk R.M., Khasen B.P., Lis S.N., Kasimov A.A., Orynbek T.Zh., 2020. In-depth Prediction, Prospecting and Exploration of Mineralization Sites in the Tekturmass Ophiolite Belt. *Research Report*. Karagandy, 80 p. (in Russian) [Антонюк Р.М., Хасен Б.П., Лис С.Н., Касимов А.А., Орынбек Т.Ж. Глубинный прогноз, поиски и разведка участков минерализации в Тектурмасском офиолитовом поясе: Отчет о Научно-исследовательской работе. Караганда, 2020. 80 с.].

Antonyuk R.M., Maslova I.G., Mukhtarov Zh.M., 2015. The Tekturmas Ophiolite Belt: Structure, Age, Geodynamics. In: *Geology, Mineralogy and Prospects for the Exploration Mineral Resources of the Republic of Kazakhstan*. Materials of the International Scientific and Practical Conference (November 26–27, 2015). Almaty, p. 7–28 (in Russian) [Антонюк Р.М., Маслова И.Г., Мухтаров Ж.М. Тектурмасский офиолитовый пояс: строение, возраст, геодинамика // Геология, минералогия и перспективы развития минерально-сырьевых ресурсов Республики Казахстан: Материалы Международной научно-практической конференции (26–27 ноября 2015). Алматы, 2015. С. 7–28].

Avdeev A.V., 1986. *Geology of Ophiolite Zones of Kazakhstan*. Brief PhD Thesis (Doctor of Geology and Mineralogy). Novosibirsk, 32 p. (in Russian) [Авдеев А.В. Геология офиолитовых зон Казахстана: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. Новосибирск, 1986, 32 с.].

Briqueu L., Bougault H., Joron J.L., 1984. Quantification of Nb, Ta, Ti and V Anomalies in Magmas Associated with Subduction Zones: Petrogenetic Implications. *Earth and Planetary Science Letters* 68 (2), 297–308. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(84\)90161-4](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)90161-4).

Buslov M.M., Safonova I.Yu., Watanabe T., Obut O., 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. *Geosciences Journal* 5, 203–224. <https://doi.org/10.1007/BF02910304>.

Chetvertikova N.P., Sytova V.A., Ushatinskaya G.T., Keller N.B., Bondarenko O.B., Ulitina L.M., 1966. Stratigraphy and Fauna of the Silurian and Lower Devonian Deposits of the Nura Synclinorium. MSU Publishing House, Moscow, 256 p. (in Russian) [Четвертикова Н.П., Сытова В.А., Ушатинская Г.Т., Келлер Н.Б., Бондаренко О.Б., Улитина Л.М. Стратиграфия и фауна силурийских и нижнедевонских отложений Нурина синклинория. М.: Изд-во МГУ, 1966. 256 с.].

Decisions of the III Kazakhstan Stratigraphic Conference on the Precambrian and Phanerozoic, 1991. Part 1. Precambrian and Paleozoic. Publishing House of the Academy of Sciences of KazSSR, Alma-Ata, 148 p. (in Russian) [Решения III Казахстанского стратиграфического совещания по докембрию и фанерозою. Ч. 1: Докембрий и палеозой. Алма-Ата: АН КазССР, 1991. 148 с.].

Degtyarev K.E., 2012. Tectonic Evolution of the Early Paleozoic Island-Arc Systems and the Formation of the Continental Crust of the Caledonides of Kazakhstan. *GEOS*, Moscow, 288 p. (in Russian) [Дегтярев К.Е. Тектоническая эволюция раннепалеозойских островодужных систем и формирование континентальной коры каледонид Казахстана. М.: Изд-во ГЕОС, 2012. 288 с.].

Degtyarev K.E., Luchitskaya M.V., Tretyakov A.A., Pilitsyna A.V., Yakubchuk A.S., 2021a. 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* 380–381, 105818. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105818>.

Degtyarev K.E., Tolmacheva T.Yu., Tretyakov A.A., Kotov A.B., Yakubchuk A.S., Salnikova E.B., Van K.L., 2017. Polychronous Formation of the Ophiolite Association in the Tekturmas Zone of Central Kazakhstan Inferred from Geochronological and Biostratigraphic Data. *Doklady Earth Sciences* 472, 26–30. <http://doi.org/10.1134/S1028334X17010214>.

Degtyarev K.E., Yakubchuk A.S., Luchitskaya M.V., Tolmacheva T.Yu., Skoblenko (Pilitsyna) A.V., Tretyakov A.A., 2021b. 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* 64 (15), 2108–2150. <https://doi.org/10.1080/00206814.2021.1969691>.

Dobretsov N.L., Berzin N.A., Buslov M.M., 1995. Opening and Tectonic Evolution of the Paleo-Asian Ocean. *International Geology Review* 37 (4), 335–360. <https://doi.org/10.1080/00206819509465407>.

Geodynamic Map of Kazakhstan, 1995. Central Kazakhstan Series. Scale of 1:1500000. Explanatory Notes. Moscow, 251 p. (in Russian) [Геодинамическая карта Казахстана. Серия Центрально-Казахстанская. Масштаб 1:1500000: Объяснительная записка. М., 1995. 251 с.].

Geological Map of the Kazakh SSR, 1981. Central Kazakhstan Series. Scale 1:500000. Explanatory Notes. Alma-Ata, 324 p. (in Russian) [Геологическая карта Казахской ССР. Серия Центрально-Казахстанская. Масштаб 1:500000: Объяснительная записка. Алма-Ата, 1981. 324 с.].

Gridina N.M., 2003. Conodonts in Siliceous Deposits of the Northeastern Central Kazakhstan. *Geosciences in Kazakhstan. MGK-32. Reports of Kazakh Geologists*, p. 135–140 (in Russian) [Гридина Н.М. Конодонты в кремнистых отложениях северо-востока Центрального Казахстана // Геонаука в Казахстане. МГК-32. Доклады казахстанских геологов. 2003. С. 135–140].

Isozaki Y., Maruyama S., Fukuoka F., 1990. Accreted Oceanic Materials in Japan. *Tectonophysics* 181 (1–4), 179–205. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(90\)90016-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(90)90016-2).

Jahn B.M., Wu F.Y., Chen B., 2000. Granitoids of the Central Asian Orogenic Belt and Continental Growth in the Phanerozoic. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh* 91 (1–2), 181–193. <https://doi.org/10.1017/S0263593300007367>.

Jensen L.S., 1976. A New Cation Plot for Classifying Subalkalic Volcanic Rocks. *Ontario Geological Survey Miscellaneous Paper* 66. 22 p.

Khasen B.P., Safonova I.Yu., Yermolov P.V., Antonyuk R.M., Gurova A.V., Obut O.T., Perfilova A.A., Savinskiy I.A., Tsujimori T., 2020. The Tekturmas Ophiolite Belt of Central Kazakhstan: Geology, Magmatism, and Tectonics. *Geological Journal* 55 (3), 2363–2382. <http://doi.org/10.1002/gj.3782>.

Kröner A., Kovach V.P., Alexeiev D.V., Wang K.-L., Wong J., Degtyarev K.E., Kozakov I.K., 2017. No Excessive Crustal Growth in the Central Asian Orogenic Belt: Further Evidence from Field Relationships and Isotopic Data. *Gondwana Research* 50, 135–166. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.04.006>.

Kröner A., Kovach V., Belousova E., Hegner E., Armstrong R., Dolgopopova A., Seltmann R., Alexeiev D.V., Hoffmann J.E. et al., 2014. Reassessment of Continental Growth during the Accretionary History of the Central Asian Orogenic Belt. *Gondwana Research* 25 (1), 103–125. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.12.023>.

Kurkovskaya L.A., 1985. Conodonts from Ordovician Siliceous and Volcanogenic Formations of Central Kazakhstan. In: *Geology of Early Geosynclinal Complexes of Central Kazakhstan*. MSU Publishing House, Moscow, p. 164–177 (in Russian) [Курковская Л.А. Комплекс конодонтов из кремнистых и вулканогенных отложений ордовика Центрального Казахстана // Геология раннегеосинклинальных комплексов Центрального Казахстана. М.: Изд-во МГУ, 1985. С. 164–177].

Kuznetsov I.E., 1980. Ultramafic Rocks of the Tekturmas Anticlinorium. *Problems of the Geology of Kazakhstan*. MSU Publishing House, Moscow, p. 122–139 (in Russian) [Кузнецов И.Е. Ультрабазиты Тектурмасского антиклинория // Проблемы геологии Казахстана. М.: Изд-во МГУ, 1980. С. 122–139].

Le Maitre R.W. (Ed.), 2002. *Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms*. Cambridge University Press,

Cambridge, 251 p. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535581>.

Levashova N.M., Degtyarev K.E., Bazhenov M.L., 2012. Oroclinal Bending of the Middle and Late Paleozoic Volcanic Belts in Kazakhstan: Paleomagnetic Evidence and Geological Implications. *Geotectonics* 46, 285–302. <http://doi.org/10.1134/S0016852112030041>.

Li P., Sun M., Rosenbaum G., Yuan C., Safonova I., Cai K., Jiang Y., Zhang Y., 2018. Geometry, Kinematics and Tectonic Models of the Kazakhstan Orocline, Central Asian Orogenic Belt. *Journal of Asian Earth Sciences* 153, 42–56. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2017.07.029>.

Magretova L.I., Ismailov H.K., Maslova I.G., Yakimenko R.D., Kurchavov A.M., Gurevich D.V., 2020. Copper-Nickel Mineralization with Platinum Group Minerals of the Bozshasor Volcano-Tectonic Structure of the North-Eastern Central Kazakhstan. *Geology and Protection of Mineral Resources* 2 (75) 20–29 (in Russian) [Магретова Л.И., Исмаилов Х.К., Маслова И.Г., Якименко Р.Д., Курчавов А.М., Гуревич Д.В. Медно-никелевое оруденение с платиноидами Бозшасорской вулкано-тектонической структуры северо-востока Центрального Казахстана // Геология и охрана недр. 2020. Т. 2. № 75. С. 20–29].

Maruyama Sh., Safonova I.Yu., Turkina O.M., Obut O.T., Krivonogov S.K., Gurova A.V., 2018. *Geology and Magmatism of Pacific-Type Convergent Margins*. Novosibirsk State University Publishing House, Novosibirsk, 96 p. (in Russian) [Маруяма Ш., Сафонова И.Ю., Туркина О.М., Обут О.Т., Кривоногов С.К., Гурова А.В. Геология и магматизм конвергентных окраин тихоокеанского типа. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2018. 96 с.].

Meschede M., 1986. A Method of Discriminating between Different Types of Mid-Ocean Ridge Basalts and Continental Tholeiites with the Nb-Zr-Y Diagram. *Chemical Geology* 56 (3–4), 207–218. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90004-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90004-5).

Mullen E.D., 1983.  $MnO/TiO_2/P_2O_5$ : A Minor Element Discrimination for Basaltic Rocks of Oceanic Environments and Its Implications for Petrogenesis. *Earth and Planetary Science Letters* 62 (1), 53–62. [http://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90070-5](http://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90070-5).

Novikova M.Z., German L.L., Kuznetsov I.E., Yakubchuk A.S., 1991. Ophiolites of the Tekturmas Zone. In: A.A. Abdulin (Ed.), *Magmatism and Ore Potential of Kazakhstan*. Gylym, Alma-Ata, p. 92–102 (in Russian) [Новикова М.З., Герман Л.Л., Кузнецов И.Е., Якубчук А.С. Офиолиты Тектурмасской зоны // Магматизм и рудоносность Казахстана / Ред. А.А. Абдулин. Алма-Ата: Гылым, 1991. С. 92–102].

Pearce J.A., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In: R.S. Thorpe (Ed.), *Orogenic Andesites and Related Rocks*. John Wiley & Sons, Chichester, p. 528–548.

Safonova I., Kotlyarov A., Krivonogov S., Xiao W., 2017. Intra-Oceanic Arcs of the Paleo-Asian Ocean. *Gondwana Research* 50, 167–194. <http://doi.org/10.1016/j.gr.2017.04.005>.

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. *Gondwana Research* 33, 92–114. <http://doi.org/10.1016/j.gr.2015.06.013>.

Safonova I., Savinskiy I., Perfilova A., Gurova A., Maruyama S., Tsujimori T., 2020. The Itmurundy Pacific-Type Orogenic Belt in Northern Balkhash, Central Kazakhstan: Revisited Plus First U-Pb Age, Geochemical and Nd Isotope Data from Igneous Rocks. *Gondwana Research* 79, 49–69. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2019.09.004>.

Safonova I.Y., 2017. Juvenile versus Recycled Crust in the Central Asian Orogenic Belt: Implications from Ocean Plate Stratigraphy, Blueschist Belts and Intra-Oceanic Arcs. *Gondwana Research* 47, 6–27. <http://doi.org/10.1016/j.gr.2016.09.003>.

Safonova I.Y., Khanchuk A.I., 2021. Subduction Erosion at Pacific-Type Convergent Margins. *Russian Journal of Pacific Geology* 15, 495–509. <http://doi.org/10.1134/S1819714021060087>.

Safonova I.Y., Utsunomiya A., Kojima S., Nakae S., Tomurtogoo O., Filippov A.N., Koizumi K., 2009. Pacific Superplume-Related Oceanic Basalts Hosted by Accretionary Complexes of Central Asia, Russian Far East and Japan. *Gondwana Research* 16 (3–4), 587–608. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.02.008>.

Safonova I.Yu., Perfilova A.A., Obut O.T., Savinsky I.A., Cherny R.I., Petrenko N.A., Gurova A.V., Kotler P.D., Khromykh S.V., Krivonogov S.K., Maruyama S., 2019. The Itmurundy Accretionary Complex, Northern Balkhash Area: Geological Structure, Stratigraphy and Tectonic Origin. *Russian Journal of Pacific Geology* 13, 283–296. <https://doi.org/10.1134/S1819714019030072>.

Shabalina L.V., 2005. Deep Structure and Patterns of Distribution of Mineralization Zones in the Central Kazakhstan Paleorift System. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Alma-Ata, 16 p. (in Russian) [Шабалина Л.В. Глубинное строение и закономерности размещения полезных ископаемых Центрально-Казахстанской палеорифтовой системы: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Алма-Ата, 2005. 16 с.].

Shen P., Pan H., Seitmuratova E., Yuan F., Jakupova S.A., 2015. Cambrian Intra-Oceanic Subduction System in the Bozshakol Area, Kazakhstan. *Lithos* 224–225, 61–77. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.02.025>.

Stepanets V.G., 2016. Geodynamic Position of the Tekturmas Accretionary Prism Ophiolites (Central Kazakhstan). Part 1. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences* 5 (419), 34–49 (in Russian) [Степанец В.Г. Геодинамическая позиция офиолитов Тектурмасской аккреционной призмы (Центральный Казахстан). Часть 1 // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. 2016. Т. 5 (419). С. 34–49].

Stepanets V.G., Gridina N.M., Konik V.E., 1998. Upper Ordovician Olistostromes and Stratigraphy of Volcanic-Siliceous Complexes of the Agyrek and Kosgombay Mountains (Central Kazakhstan). *Geology of Kazakhstan* 1, 12–23 (in Russian) [Степанец В.Г., Гридина Н.М., Коник В.Е.

Верхнеордовикские олистостромы и стратиграфия вулканогенно-кремнистых комплексов гор Агырек и Косгомбай (Центральный Казахстан) // Геология Казахстана. 1998. Т. 1. С. 12–23].

Sun S.-S., McDonough W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. Geological Society of London Special Publications 42 (1), 313–345. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.

Turmanidze T.L., Grishin D.M., Pechersky D.M., Stepanets V.G., 1991. Paleomagnetic Data from Ordovician Ophiolites of the Allochthonous Karaulcheku, Tolpak, and Bazarbay Massifs (Central Kazakhstan). Geotectonics 4, 54–69 (in Russian) [Турманидзе Т.Л., Гришин Д.М., Печерский Д.М., Степанец В.Г. Палеомагнитная информация об ордовикских офиолитах из аллохтонных массивов Караулчеку, Толпак и Базарбай (Центральный Казахстан) // Геотектоника. 1991. Т. 4. С. 54–69].

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. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.019>.

Weit A., Trumbull R.B., Keiding J.K., Geissler W.H., Gibson S.A., Veksler I.V., 2017. The Magmatic System beneath the Tristan Da Cunha Island: Insights from Thermobarometry, Melting Models and Geophysics. Tectonophysics 716, 64–76. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.08.010>.

Winchester J.A., Floyd P.A., 1977. Geochemical Discrimination of Different Magma Series and Their Differentiation Products Using Immobile Elements. Chemical Geology

20, 325–343. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(77\)90057-2](https://doi.org/10.1016/0009-2541(77)90057-2).

Windley B.F., Alexeiev D., Xiao W., Kröner A., Badarch G., 2007. Tectonic Models for Accretion of the Central Asian Orogenic Belt. Journal of the Geological Society of London 164 (1), 31–47. <http://doi.org/10.1144/0016-76492006-022>.

Yakubchuk A.A., Stepanets V.G., German L.L., 1988. Subparallel Dike Swarms in Ophiolite Massifs Are Evidence of Spreading. Doklady of the USSR Academy of Sciences 298 (5), 1193–1197 (in Russian) [Якубчук А.А., Степанец В.Г., Герман Л.Л. Рои пластинчатых даек, субпараллельных в офиолитовых массивах, – свидетели спрединга // Доклады АН СССР. 1988. Т. 298. № 5. С. 1193–1197].

Yakubchuk A.S., 1990. Tectonic Settings of Paleozoic Ophiolites of Central Kazakhstan. Geotectonics 5, 55–68 (in Russian) [Якубчук А.С. Тектоническая обстановка офиолитовых зон в палеозойской структуре Центрального Казахстана // Геотектоника. 1990. Т. 5. С. 55–68].

Yakubchuk A.S., 1991. Tectonic Position and Structure of Ophiolites of Central Kazakhstan Using the Tekturmas and Southwestern Maykain-Kyzyltas Zones as Examples. Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Moscow, 16 p. (in Russian) [Якубчук А.С. Тектоническая позиция и строение офиолитов Центрального Казахстана на примере Тектурмасской и юго-западной части Майкаин-Кызылтасской зоны: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1991. 16 с.].

Zonenshain L.P., Kuzmin M.I., Natapov L.M., 1990. Geology of the USSR: A Plate Tectonic Synthesis. Geodynamic Monograph Series. American Geophysical Union, 242 p.