

## ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ НИЖНЕПЕРМСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПРИМОРЬЯ (ДАЛЬНИЙ ВОСТОК РОССИИ)

© 2025 А.И. Малиновский

ФГБУ Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Россия, 690022;  
e-mail: malinovskiy@fegi.ru

Поступила в редакцию 23.12.2024; после доработки 20.02.2025; принята в печать 25.03.2025

Рассмотрены результаты изучения вещественного состава терригенных пород раннепермской казачкинской свиты, обнажающейся в юго-западной части Приморского края. Исследования проводились с целью реконструкции палеогеодинамических обстановок формирования отложений свиты, а также определения тектонического типа и состава пород источников питания. Особенности вещественного состава пород свиты свидетельствуют, что по своим параметрам породы свиты в основном соответствуют лититовым ареникам и аркозам, являясь петрогенными или «first cycle» породами, прошедшими один цикл переотложения заметно выветрелых исходных пород областей денудации. Палеогеодинамическая интерпретация полученных данных свидетельствует, что отложения казачкинской свиты формировались в геодинамической обстановке активной континентальной окраины, вероятнее всего в бассейнах, связанных со сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам. Обломочный материал поступал из континентальных источников питания — кратонов и поднятых блоков основания — выступов кристаллического фундамента. Размывались кислые изверженные породы и, в меньшей степени, основные-средние вулканиты и осадочные породы, обогащенные древними обломочными компонентами.

*Ключевые слова:* пермь, вещественный состав, обстановки формирования, казачкинская свита, Приморье.

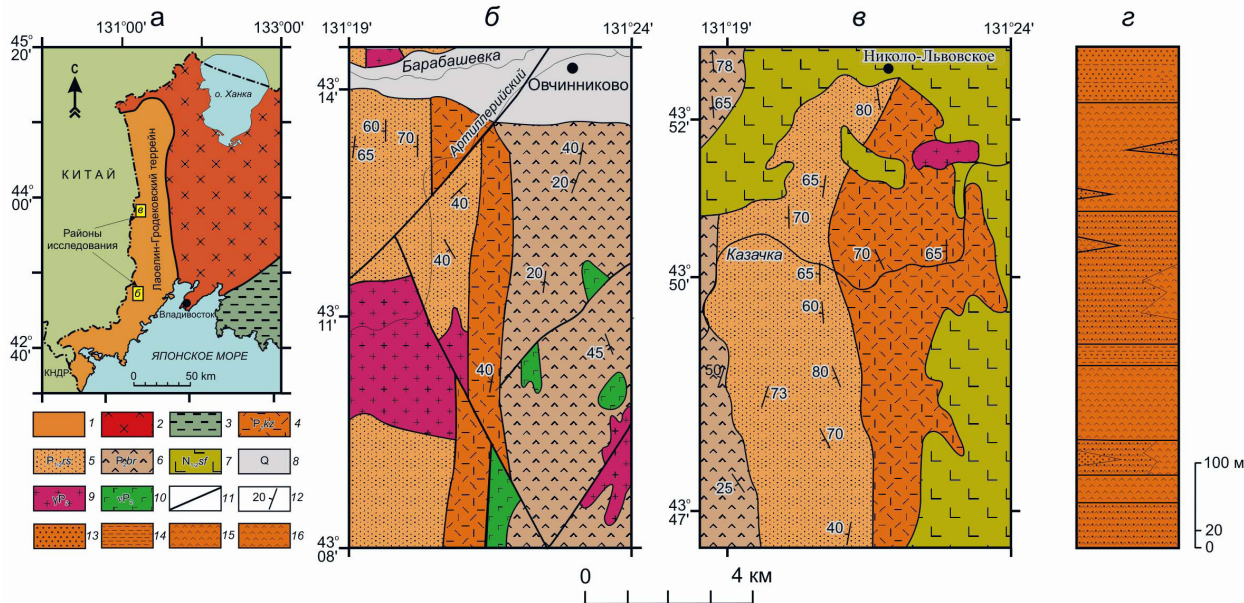
### ВВЕДЕНИЕ

Пермские отложения достаточно широко развиты в юго-западной части Приморского края, где они в структурном отношении входят в состав палеозойско-ранненемезозойского Лаоелин-Гродековского террейна, являющегося фрагментом восточного окончания Центрально-Азиатского складчатого пояса (Геодинамика..., 2006; Парфенов и др., 2003; The Central..., 2015) (рис. 1а). Тектоническая позиция террейна более подробно описана в предыдущих публикациях (Малиновский, 2021; Малиновский, Голозубов, 2021). Участвующие в строении террейна пермские вулканогенные и осадочные образования расчленены на казачкинскую (P<sub>1</sub>), решетниковскую (P<sub>1-2</sub>) и барабашскую (P<sub>2</sub>) свиты, имеющие общую мощность до 4500 м. Свиты существенно различаются по строению и вещественному составу отложений что, соответственно, сви-

детельствует об их формировании в различных палеогеодинамических обстановках.

Нижнепермская вулканогенно-осадочная казачкинская свита развита, главным образом, в южной и центральной частях террейна. Лучше всего свита обнажена и изучена на юге, в бассейне р. Барабашевка, где она в виде узкой полосы, протягивающейся в субмеридиональном направлении вдоль ее правого притока — руч. Артиллерийского (рис. 1б). В центральной части террейна свита изучена в бассейне р. Казачка, где была выделена и по которой собственно и была названа (Изосов, Евланов, 1982)<sup>1</sup> (рис. 1в).

<sup>1</sup> Изосов Л.А., Евланова М.А. Геологическое строение и полезные ископаемые территории листов L-52-XXXVI, L-53-XXXI и K-52-VI по работам Западной партии, по геологическому доизучению масштаба 1:200 000 за 1979–1982 гг. Владивосток: Приморский территориальный геологический фонд, 1982. 143 с.



**Рис. 1.** Геологическая позиция Лаоелин-Гродековского террейна в тектонической структуре Юго-Западного Приморья и положение изученных районов (а); геологические карты исследованных районов: (б) — южная, (в) — центральная части террейна; сводная стратиграфическая колонка нижнепермских отложений казачкинской свиты (з). 1–3 — террейны: 1 — Лаоелин-Гродековский, 2 — раннепалеозойского Бурей-Цзямусы-Ханкайского орогенного пояса (супертеррейна), 3 — раннепалеозойской активной окраины; 4–7 — свиты: 4 — казачкинская ( $P_1kz$ ), 5 — решетниковская ( $P_{1-2}rs$ ), 6 — барабашская ( $P_2br$ ), 7 — шуфанская ( $N_{1-2}sf$ ); 8 — четвертичные отложения (Q); 9 — граниты и гранодиориты ( $\gamma P_2$ ); 10 — габбро-диабазы ( $\nu P_2$ ); 11 — разломы; 12 — элементы залегания; 13 — песчаники; 14 — алевролиты и аргиллиты; 15 — дациты и риолиты; 16 — туфы и туффиты кислого состава.

**Fig. 1.** Geological position of the Laeoling-Grodekovo terrane in the tectonic structure of South-Western Primorye and the position of the studied areas (a); geological maps of the investigated areas: (б) — southern, (в) — central parts of the terrane; (z) is a composite stratigraphic column of the Lower Permian deposits of the Kazachka formation. 1–3 — terranes: 1 — Laeoling-Grodekovo, 2 — of the Early Paleozoic Bureya-Jiamusi-Khanka orogenic belt (superterrane), 3 — the terrain of the Early Paleozoic active margin; 4–7 — formations: 4 — Kazachka ( $P_1kz$ ), 5 — Reshetnikovka ( $P_{1-2}rs$ ), 6 — Barabash ( $P_2br$ ), 7 — Shufan ( $N_{1-2}sf$ ), 8 — Quaternary deposits (Q); 9 — granites and granodiorites ( $\gamma P_2$ ); 10 — gabbro-diabases ( $\nu P_2$ ); 11 — faults; 12 — bedding elements; 13 — sandstones; 14 — siltstones and mudstones; 15 — dacites and rhyolites; 16 — tuffs and tuffites of acidic composition.

Подошва свиты неизвестна. Выше согласно залегают ниже-среднепермские терригенные отложения решетниковской свиты. Свита сложена переслаивающимися риолитами, риодацитами, дацитами, а также их кластолавами, туфами, туфобрекчиями и лишь в самой верхней части туффитами, туфогенными аргиллитами, алевролитами и песчаниками (рис. 1з). Общая мощность оценивается в 600 м. Раннепермский возраст отложений свиты обоснован находками в них брахиопод, мшанок, двустворок, криноидей и растительных остатков (Бураго. 1983; Котляр и др., 2018; Kotlyar et al., 2006).

Следует отметить, что отложения свиты обнажаются лишь фрагментарно, а их изученность, из-за плохой обнаженности и сложного строения, остается крайне слабой. Недостаточная геохимическая изученность вулканитов свиты не позволяет делать уверенные выводы о тектоническом режиме их формирования. Породы представляют собой производные умеренно- и высококальциевых железистых кремне-

кислых магм, в меру обогащенных высокозарядными элементами. Их формирование возможно в нескольких геодинамических обстановках: в тыловых частях активных континентальных окраин с субдукцией (при отсутствии мощного сиалического фундамента), в обстановках трансформного скольжения литосферных плит, а также в крупных изверженных провинциях внутриплитной природы складчатых поясов (Голозубов и др., 2021). Литологический состав терригенных пород свиты практически не изучен, также не существует каких-либо достоверных данных об их вещественном составе, источниках питания и обстановках формирования.

Цель проведенных исследований — выяснение палеогеодинамической природы и определение источников питания терригенных отложений раннепермской казачкинской свиты на основании детального минералогического и геохимического изучения песчаных и глинисто-алевритовых пород.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В основу данного исследования положен оригинальный материал, полученный в результате изучения вещественного состава терригенных пород казачкинской свиты, собранных в 2020 и 2021 гг. в южной и центральной частях Лаоелин-Гродековского террейна (Юго-Западное Приморье). Образцы отбирались из коренных береговых обнажений ручья Артиллерийского на юге террейна и реки Казачки — в центральной его части (рис. 1б, 1в).

Для детального изучения были выбраны песчаные породы, поскольку они несут наиболее богатую и достоверную информацию о типе и породном составе питающих провинций, а также о геодинамических обстановках формирования бассейнов седиментации. Глинисто-алевритовые породы, использовались как источник дополнительной информации.

Изучение петрографического состава пород, определение и подсчет содержаний тяжелых обломочных минералов производилось с помощью поляризационных микроскопов МИН-8 (ЛОМО, Россия) и Axioplan 2 imaging (Carl Zeiss, Германия). Для геохимических исследований было выбраны 34 образца песчаных и глинисто-алевритовых пород, в которых выполнен валовый элементный анализ. Для этого навески исследуемых образцов были подвергнуты предварительному обжигу в муфельной печи при  $t = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$  с доступом воздуха. Для разложения образцов использовалась процедура сплавления с метаборатом лития с последующим растворением плавня с помощью смеси азотной и плавиковой кислот. Определение содержания

петрогенных элементов (кроме  $\text{SiO}_2$ ) проводилось на атомно-эмиссионном с индуктивно связанной плазмой спектрометре iCAP 7600 Duo (Thermo Scientific, США), а концентраций микроэлементов — методом плазменной спектрометрии (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре ICP-MS Agilent 7500c (Agilent Technologies, Япония). Концентрации  $\text{H}_2\text{O}$ -, ППП и  $\text{SiO}_2$  определялись методом гравиметрии.

Все аналитические исследования выполнены в Центре коллективного пользования (ЦКП) Дальневосточного геологического института ДВО РАН г. Владивостока (аналитики П.Д. Гасанова, Г.А. Горбач, Н.И. Екимова, Е.В. Еловский, Н.В. Зарубина, Г.Б. Молчанова, Д.С. Остапенко, Е.А. Ткалина, Н.В. Хуркало).

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ  
ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД

Для выяснения палеогеодинамических обстановок формирования отложений казачкинской свиты, а также установления тектонических типов и состава материнских пород источников питания, был изучен петрографический состав песчаных и глинисто-алевритовых пород, содержание и состав тяжелых обломочных минералов, а также геохимические особенности пород.

Как уже отмечалось, обломочные породы встречаются только в верхней части разреза отложений свиты. Это в основном песчаники и, реже, глинисто-алевритовые породы. Песчаники свиты крупно- и грубозернистые до гравелистых, обладают слабой либо средней степенью сортированности обломочного материала (рис. 2а). Зерна угловатые и угловато-окатанные, реже ока-

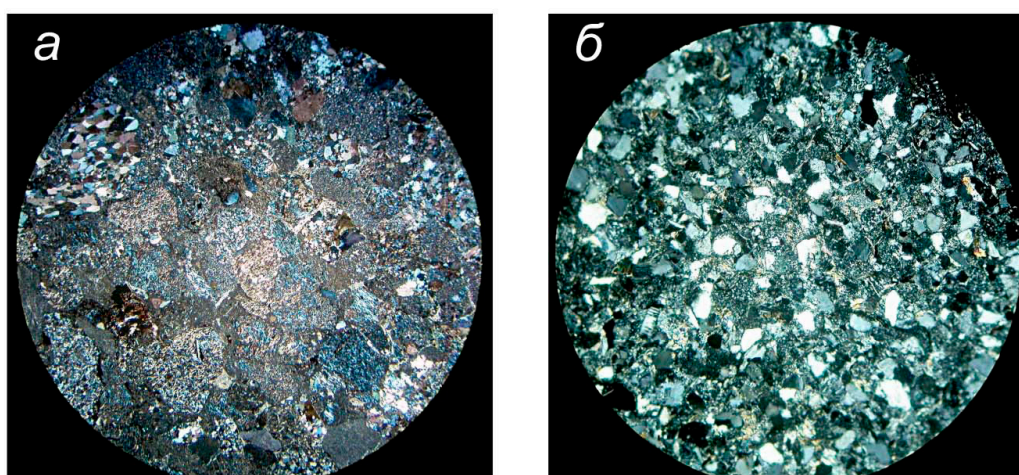


Рис. 2. а — песчаник крупнозернистый, состоящий из обломков кремней, кислых эффузивов, кварцитов, тонкозернистых обломочных пород, реже кварца и полевых шпатов; б — алевритит крупнозернистый, преобладают обломки кварца и полевых шпатов. Увеличение 50. Никели скрещены.

Fig. 2. a — coarse-grained sandstone consisting of fragments of cherts, acid volcanic rocks, quartzites, fine-grained clastic rocks, rarely of quartz and feldspars; б — coarse-grained siltstone, fragments of quartz and feldspar predominate. Magnification 50. Nichols crossed.

танные, в основном изометричные. Цемент занимает до 35 % всего объема пород, по структуре обычно поровой и пленочный, редко базальный, по составу глинисто-кремнистый, глинисто-слюдистый, слюдиисто-хлоритовый. Обломочная часть песчаников, вследствие большой размерности кластики, состоит в основном из обломков недезинтегрированных пород: терригенных (20–32 %), кремнистых (6–10 %), кислых и средних магматических (14–24 %), сланцев и кварцитов (до 10 %). Суммарное содержание обломков пород составляет 59–68 %. В связи с этим, низки содержания кварца (18–23 %), и полевых шпатов (16–20 %), среди которых доминируют кислые плагиоклазы. Основные и средние плагиоклазы, а также калиевые полевые шпаты редки.

В глинисто-алевритовых породах свиты содержание алевритового материала изменяется от 10–15 до 60–70 % объема. Сортировка обычно средняя, при этом алевритовый материал часто неравномерно распределен в объеме породы, образуя микроскопления (рис. 2б). Иногда встречается и примесь песчаного материала, также беспорядочно рассеянного среди основной глинисто-алевритовой массы. Обломочные зерна обычно угловатые и угловато-окатанные, преимущественно изометричные. По составу обломки этого типа пород близки обломкам песчаников, при этом в них больше кварца и полевых шпатов, но заметно меньше обломков кварцитов, кремнистых, эффузивных и терригенных пород. Цемент базальный и поровый, глинисто-серицитовый, глинисто-кремнистый. Аргиллиты и алевро-аргиллиты обычно сложены серицитом, тонкие чешуйки которого часто ориентированы параллельно слоистости.

В песчаниках свиты изучен состав, содержание и соотношение между отдельными тяжелыми обломочными минералами (рис. 3). Было установлено, что в тяжелой фракции песчаников резко доминирует циркон — минерал, происхождение которого связано, как правило, с разрушением кислых изверженных и метаморфических пород. В среднем его содержание составляет 92 %, а в некоторых пробах достигает до 96–98 %. В ассоциации с цирконом находится еще один минерал, часто связанный с кислыми изверженными породами — апатит. Его содержание значительно меньше, не превышая в среднем 6 %, хотя в отдельных пробах и достигает 9 %. Два других минерала, установленные в тяжелой фракции песчаников — хромит и клинопироксен, принадлежат к ассоциации минералов, происходящей из основных и ультраосновных магматических пород. Они находятся в резко подчиненном количестве: содержания хромита редко превышают 3 %, а клинопироксена не достигают и 1 %.



Рис 3. Распределение тяжелых обломочных минералов в песчаных породах казачкинской свиты (среднее содержание).

Fig. 3. Distribution of heavy clastic minerals in the sandy rocks of the Kazachka formation (average content).

Для геохимической характеристики терригенных пород казачкинской свиты, а также дальнейших палеогеодинамических интерпретаций, использовались частные анализы по отдельным пробам, которые сведены в таблицы в виде пределов колебаний и средних содержаний петрогенных, редких и редкоземельных элементов (РЗЭ).

Песчаные породы свиты имеют достаточно сходный химический состав (табл. 1). Наблюдающиеся колебания в содержаниях некоторых петрогенных оксидов, вероятно, может объясняться влиянием локальных источников сноса, насыщенностью отдельных проб примесью пирокластического материала, а также флуктуациями в процессе осадконакопления. Содержание кремнекислоты в породах варьирует в диапазоне от 70.07 до 76.90 % при среднем значении 73.81 %,  $TiO_2$  (0.20–0.74 % и 0.42 % соответственно),  $Al_2O_3$  (13.01–17.92 % и 15.15 %),  $FeO$  (0.12–1.34 % и 0.68 %),  $Fe_2O_3$  (0.08–2.22 % и 0.83 %),  $MgO$  (0.14–0.45 % и 0.40 %) и  $CaO$  (0.06–0.36 % и 0.17 %). На классификационной диаграмме Ф.Дж. Петтиджона и его соавторов (Pettijohn et al., 1972) (рис. 4а) фигуративные точки составов песчаников группируются преимущественно в поле лититовых аренитов — пород промежуточных между граувакками и аркозами, в поля которых изученные песчаники также частично попадают. Кроме того, в песчаниках наблюдается преобладание  $K_2O$  над  $Na_2O$  (2.49–5.58 % и 1.24–3.35 % соответственно) что больше сближает

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ОБСТАНОВКИ

**Таблица 1.** Содержание петрогенных элементов (мас. %) в терригенных породах казачкинской свиты Юго-Западного Приморья

**Table 1.** Content of petrogenic elements (wt.%) in terrigenous rocks of the Kazachka formation of South-Western Primorye

	Песчаные породы	Глинисто-алевритовые породы
n	22	12
SiO <sub>2</sub>	70.07–76.90 73.81	68.23–78.02 73.65
TiO <sub>2</sub>	0.20–0.74 0.42	0.17–0.63 0.36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.01–17.92 15.15	10.37–17.18 14.75
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.08–2.22 0.83	0.33–3.72 1.39
FeO	0.12–1.34 0.68	0.25–1.33 0.76
MnO	0.01–0.08 0.02	0.01–0.10 0.04
MgO	0.14–0.45 0.40	0.15–0.92 0.48
CaO	0.06–0.36 0.17	0.07–0.74 0.18
Na <sub>2</sub> O	1.24–3.35 1.93	0.61–1.60 0.96
K <sub>2</sub> O	2.49–5.58 3.75	3.09–4.64 3.64
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.02–0.18 0.07	0.01–0.60 0.10
H <sub>2</sub> O	0.07–1.27 0.40	0.15–1.00 0.57
п.п.п.	0.93–3.37 2.07	1.48–3.96 2.80
ГМ	0.20–0.28 0.23	0.17–0.31 0.24
ФМ	0.02–0.05 0.03	0.01–0.07 0.04
ТМ	0.015–0.044 0.027	0.014–0.036 0.024
ЖМ	0.05–0.17 0.10	0.05–0.37 0.15
НКМ	0.24–0.58 0.38	0.22–0.44 0.32
CIA	56–77 67	63–79 71
WIP	36–72 51	32–48 42

Примечание. n — количество анализов. В числителе — минимальное и максимальное значение, в знаменателе — среднее.

Note. n is the number of analyzes. The numerator is the minimum and maximum value, the denominator is the average.

их с аркозами (рис. 4б) (Pettijohn, 1975). О близости изученных песчаников к аркозам свидетельствуют и низкие (0.02–0.05) значения фемического модуля  $\Phi M = (Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO) / SiO_2$ , используемого для разделения граувакк и аркозов (Юдович, Кетрис, 2000), что хорошо согласуется с преобладанием в них обломков кремней, кислых магматических и других кремне-несодержащих пород.

Геохимические особенности терригенных пород определяются как петрографическим составом обломочной части, так и степенью их «зрелости», т.е. интенсивностью процессов химического выветривания материнских пород областей питания. Судить о роли и интенсивности этих процессов позволяет использование ряда литохимических индексов (модулей). Количественную оценку степени зрелости пород дает величина гидролизатного модуля  $ГМ = (Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO) / SiO_2$  (Юдович, Кетрис, 2000). В песчаниках свиты значение ГМ невелики и изменяется от 0.20 до 0.28 (в среднем 0.23), а в глинисто-алевритовых породах от 0.17 до 0.27 (в среднем 0.23), что может свидетельствовать о заметной роли процессов выветривания в областях сноса. О достаточно интенсивном выветривании исходных пород области размыва свидетельствуют и достаточно высокие (56–77 в песчаниках и 63–79 в глинисто-алевритовых породах) значения индекса химического изменения  $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$  (Nesbitt, Young, 1982), а также низкие (36–72 и 32–48 соответственно) величины индекса выветривания  $WIP = 100 \times (2 \times Na_2O / 0.35 + MgO / 0.9 + 2 \times K_2O / 0.25 + CaO / 0.7)$  (Parker, 1970). Все эти данные, в целом, свидетельствуют, что размывавшаяся область питания была сложена достаточно геохимически «зрелыми», в значительной степени выветрелыми исходными породами (рис. 5) (Bahlburg, Dobrzinski, 2011).

Для геохимической характеристики терригенных отложений используется ряд литохимических модулей и модульных диаграмм, позволяющих получить наиболее объективную информацию о составе исходных пород областей питания, литогенной либо петрогенной природе осадков, а также способствующих более корректным палеореконструкциям условий и обстановок седиментации (Летникова и др., 2011; Малиновский, 2021; Малиновский, Голозубов, 2012; Маслов и др., 2013; Юдович, Кетрис, 2000 и др.). По величине титанового модуля  $ТМ = TiO_2 / Al_2O_3$ , позволяющему судить о составе материнских пород областей питания, песчаные и глинисто-алевритовые породы казачкинской свиты близки и характеризуются относительно невысокими его значениями (0.015–0.044 и 0.014–0.036 соответственно). Невысокие значения модуля связаны

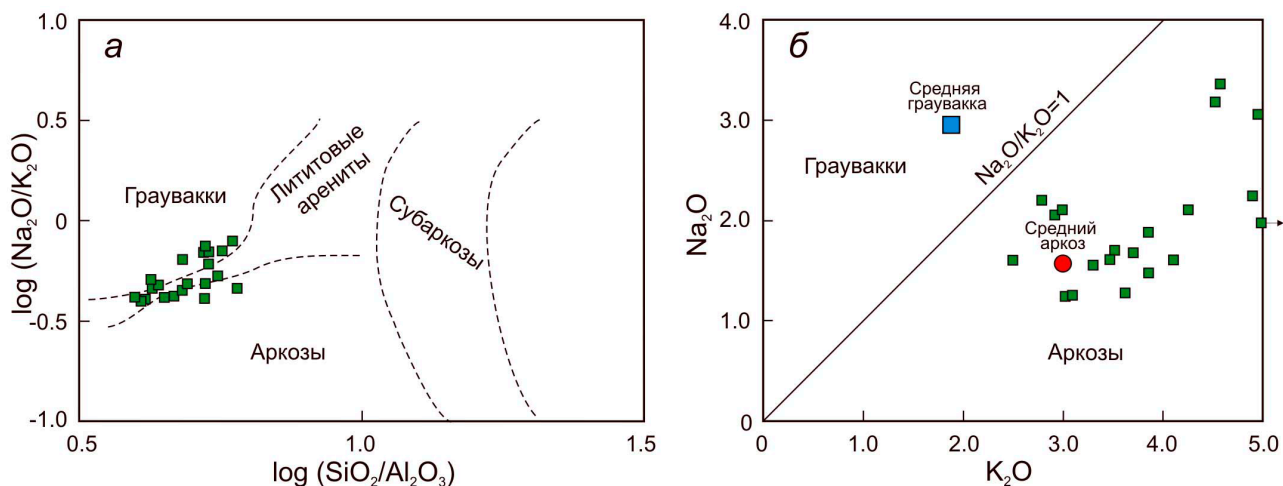


Рис. 4. Классификационные диаграммы для песчаных пород казачкинской свиты по химическому составу: *a* —  $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ – $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  (Pettijohn et al., 1972); *б* —  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  (Pettijohn, 1975).

Fig. 4. Classification diagrams for sandy rocks of the Kazachka Formation by chemical composition: *a* —  $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ – $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  (Pettijohn et al., 1972); *б* —  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  (Pettijohn, 1975).

с преобладанием в области размыва кислых магматических пород, обладающих, в свою очередь, низкими значениями ТМ. О преобладании в составе палеоводосборов кислых магматических пород свидетельствуют и низкие значения еще одного литохимического показателя — железного модуля  $\text{ЖМ} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO}) / (\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ . Его значение как в песчаных, так и в глинисто-алевритовых породах изменяется от 0.05 до 0.17, и лишь в отдельных пробах достигает 0.20–0.32. Модуль нормированной щелочности  $\text{НКМ} = \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ , позволяющий распознавать в породах примесь вулканического материала, как правило, выше в аркозах и ниже в граувакках.

В изученных песчаниках значения НКМ изменяются от 0.24 до 0.58, что, в целом, сближает их с аркозами и объясняется присутствием в обломочной части продуктов размыва кислых изверженных пород — слюд и полевых шпатов, в том числе калиевых.

В глинисто-алевритовых породах значения НКМ несколько ниже, чем в песчаниках (0.22–0.44), что, очевидно, связано с меньшим содержанием в них полевых шпатов и большим количеством глинистого вещества.

Величина модулей, соотношения между ними, а также положение их фигуративных точек на ряде модульных диаграмм (положительная корреляция между парами модулей ГМ–ТМ и ФМ–ЖМ, но отрицательная либо ее отсутствие между другими парами) (Юдович, Кетрис, 2000) (рис. 6), свидетельствует о принадлежности изученных отложений к петрогенным или «first cycle» породам, т.е. прошедшим один цикл перетложения.

По концентрации и характеру распределения редких и редкоземельных элементов песча-

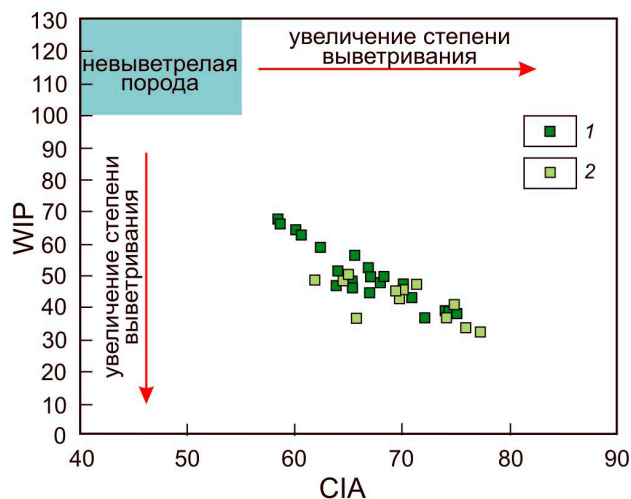


Рис. 5. Диаграмма степени химического выветривания CIA–WIP для терригенных пород казачкинской свиты (Bahlburg, Dobrzinski, 2011). 1 — песчаные, 2 — глинисто-алевритовые породы. Аббревиатуры смотри в тексте.

Fig. 5. Diagram of CIA–WIP chemical weathering degree for the terrigenous rocks of the Kazachka formation (Bahlburg, Dobrzinski, 2011). 1 — sandy rocks, 2 — clayey-silty rocks.

ники казачкинской свиты близки между собой (табл. 2). Общее содержание РЗЭ в них относительно невелико и колеблется в пределах от 84 до 188 г/т (в среднем 144 г/т), что меньше среднего значения (146.4 г/т) для верхней континентальной коры (Taylor, McLennan, 2009). Спектры распределения РЗЭ, нормализованные к составу хондрита (Boynnton, 1984) (рис. 7а), во всех изученных пробах имеют одинаковые тренды с умеренным обогащением легкими лантаноидами относительно тяжелых ( $\text{LaN}/\text{YbN} = 2.94$ – $8.01$ , в среднем 6.15) и достаточно отчетливо выраженной отрицательной европиевой аномалией ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.63$ – $0.87$ ,

ПАЛЕОГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ  
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ИССЛЕДОВАНИЯ

в среднем 0.78). По сравнению с постархейским австралийским средним глинистым сланцем (РАAS) (Taylor, McLennan, 2009), песчаники незначительно обеднены почти всеми легкими элементами (до двух раз) и находятся в равных либо близко к равным количествам с тяжелыми, а также с Eu и Gd. Все это указывает на отсутствие либо незначительное влияние на накопление отложений мафического и ультрамафического материала. В глинисто-алевритовых породах суммарные уровни концентрации РЗЭ выше, чем в песчаниках и колеблются в пределах от 75 до 260 г/т (в среднем 183 г/т). Вместе с тем, общий характер их распределения в целом аналогичен таковому в песчаниках ( $La/YbN=3.13-81.64$  в среднем 5.39;  $Eu/Eu^*=0.54-0.87$ , в среднем 0.67) (рис. 7б). По сравнению с РАAS содержания большинства РЗЭ в основном выше (до 1.7 раза) и, реже, находятся в примерно равных либо меньших количествах.

Палеогеодинамическая интерпретация полученных данных по вещественному составу терригенных пород казачкинской свиты осуществлена при помощи ряда широко известных дискриминантных диаграмм, позволяющих выявить различные типы областей питания и геодинамических обстановок формирования отложений (Bhatia, 1983; Bhatia, Crook, 1986; Cullers, 2002; Floyd, Leveridge, 1987; Garzanti, Ando, 2007; Roser, Korsch, 1986, 1988; Verma, Armstrong-Altrin, 2013 и др.).

Проведенные исследования показывают, что по своим минералого-геохимическим параметрам песчаные породы свиты являются петрогенными, относятся к лититовым арени-там, занимая промежуточное положение между

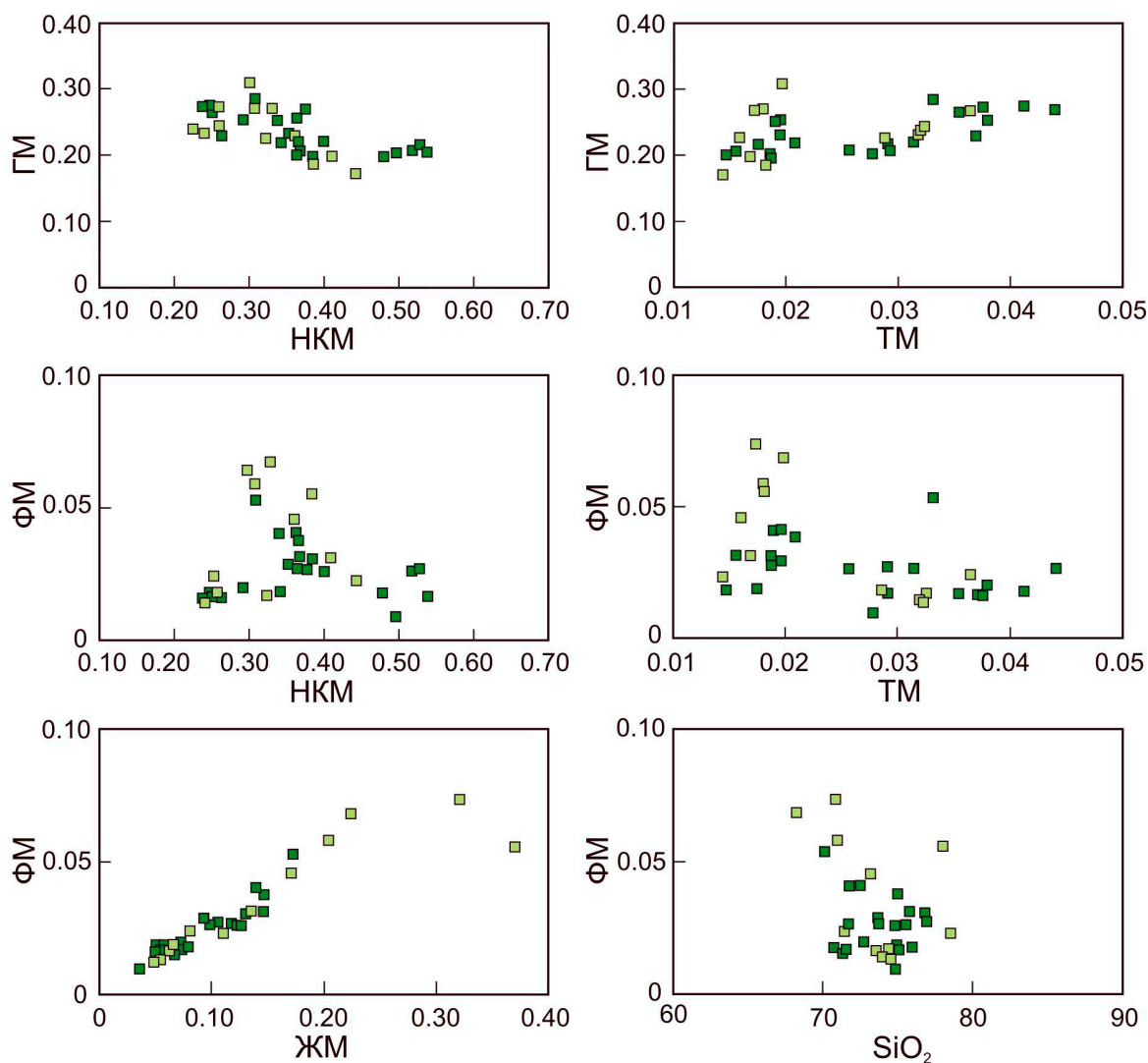


Рис. 6. Модульные диаграммы для песчаных пород казачкинской свиты (Юдович, Кетрис, 2000). Условные обозначения см. на рис. 5. Аббревиатуры смотри в тексте.

Fig. 6. Modular diagrams for sandy rocks of the Kazachka formation (Yudovich, Ketris, 2000). See Fig. 5 for legend.

**Таблица 2.** Содержания редких и редкоземельных элементов (г/т) в терригенных породах казачкинской свиты Юго-Западного Приморья.**Table 2.** Contents of rare and rare earth elements (ppm) in terrigenous rocks of the Kazachka formation of South-Western Primorye.

	Песчаные породы	Глинисто-алевритовые породы		Песчаные породы	Глинисто-алевритовые породы
n	22	12	n	22	12
Be	0.39-2.55 1.40	1.00-4.10 1.88	Pr	3.67-9.69 6.66	2.35-16.65 8.51
Rb	43.47-139.70 90.98	88.48-195.90 116.34	Nd	14.01-35.00 25.50	8.57-65.80 32.95
Cs	0.68-6.69 2.50	2.39-8.26 3.79	Sm	2.73-7.34 4.84	2.92-11.33 6.32
Sr	40.1-397.6 162.7	41.76-345.5 132.5	Eu	0.69-1.64 1.23	0.49-2.36 1.43
Ba	178.3-847.0 509.2	208.0-797.0 563.5	Gd	2.71-6.51 4.52	2.41-12.56 6.34
Zr	143.6-504.3 332.6	187.2-473.7 334.5	Tb	0.45-1.16 0.66	0.56-1.60 0.96
Nb	8.99-17.40 12.87	8.58-23.71 16.98	Dy	2.99-6.05 4.23	4.38-8.66 6.14
Y	19.93-38.67 26.33	25.31-62.55 37.69	Ho	0.54-1.28 0.85	0.75-1.98 1.22
Sc	4.11-12.17 7.67	4.09-14.60 8.96	Er	1.74-4.13 2.76	2.33-5.74 3.84
V	21.08-80.20 37.15	7.28-85.10 37.52	Tm	0.27-0.61 0.43	0.42-0.91 0.62
Cr	2.5-196.5 49.1	1.9-39.2 23.7	Yb	2.18-3.81 3.09	2.95-6.05 4.39
Co	0.40-11.74 3.39	0.59-4.18 1.66	Lu	0.36-0.80 0.52	0.35-0.95 0.63
Ni	1.68-34.71 7.45	0.68-17.44 6.03	Hf	4.51-12.80 8.28	4.03-11.91 8.46
Cu	0.17-27.20 11.31	4.42-31.50 16.30	Ta	0.52-1.10 0.89	0.63-2.02 1.19
Zn	9.1-82.5 37.5	26.3-75.3 40.6	Pb	8.11-23.80 15.21	13.51-25.76 16.54
Ga	12.20-24.96 18.15	13.45-34.13 19.96	Th	5.80-13.03 9.49	6.39-16.18 10.50
Mo	0.15-14.53 2.97	0.96-46.79 2.20	U	1.25-4.54 3.11	2.35-4.74 3.33
Sn	0.70-7.90 1.90	0.92-62.83 2.36	[La/ Yb]n	2.94-8.01 6.15	3.13-8.64 5.39
La	15.48-40.68 27.93	19.97-64.45 35.49	Eu/Eu*	0.63-0.87 0.78	0.54-0.87 0.67
Ce	32.82-88.85 60.31	21.62-143.40 74.26			

Примечание. n — количество анализов. В числителе — минимальное и максимальное значение, в знаменателе — среднее.

Note. n is the number of analyzes. The numerator is the minimum and maximum value, the denominator is the average.

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ОБСТАНОВКИ

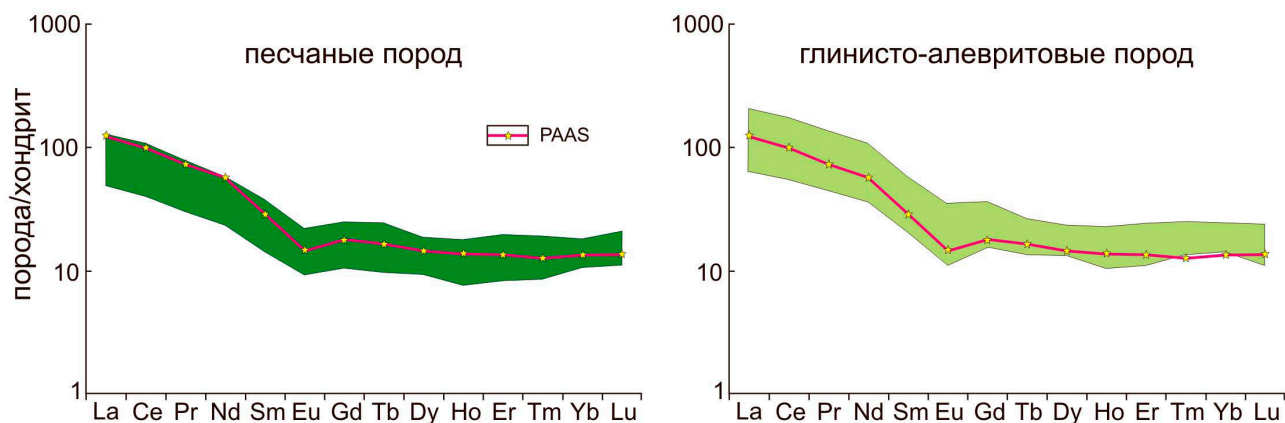


Рис. 7. Спектры распределения РЗЭ, нормированные к хондриту (Boynnton, 1985), в песчаных и глинисто-алевритовых породах казачкинской свиты, а также их сопоставление с PAAS (Taylor, McLennan, 2009).

Fig. 7. REE distribution spectra normalized to chondrite (Boynnton, 1984) in sandy (a) and clayey-silty (b) rocks of the Kazachka formation and their comparison with PAAS (Taylor, McLennan, 2009).

граувакками и аркозами. Породы характеризуются относительно высокой степенью зрелости обломочного материала, а их формирование происходило за счет размыва в заметной степени выветрелых материнских пород областей сноса.

К сожалению, грубозернистость песчаников казачкинской свиты, обусловившая, как отмечалось выше, преобладание в кластике обломков пород, не позволяет использовать диаграммы, предназначенные для палеогеодинамических интерпретаций состава породообразующих компонентов. Для этих целей будут использованы другие параметры вещественного состава изученных пород.

Анализ соотношения ассоциаций тяжелых минералов в песчаниках свиты на диаграмме A-&-POS (Garzanti, Ando, 2007) (рис. 8) показывает, что основным поставщиком кластики были гранитно-метаморфические породы континентальных источников питания, слагавшие кратоны и выступы кристаллического фундамента в обрамлении рифтовых зон. Вместе с тем, присутствие в тяжелой фракции песчаников небольшого количества хромита и клинопироксена может свидетельствовать об участии в составе области питания выходов основных и ультраосновных магматических пород, имевших, вероятно, островодужное происхождение. Подтверждением этому служит химический состав хромитов, относящихся к низкотитанистому типу ( $TiO_2 < 1.5\%$ ), и происходящих из магматических пород офиолитов, вероятно входивших в состав фундамента океанической островной дуги (Щека, Вржосек, 1983) (рис. 9). Островодужные образования установлены в Лаоелин-Гродековском террейне в виде раннесилурийской кордонкинской свиты (Малиновский, Голозубов, 2021).

Характерные для терригенных пород казачкинской свиты геохимические особенности:

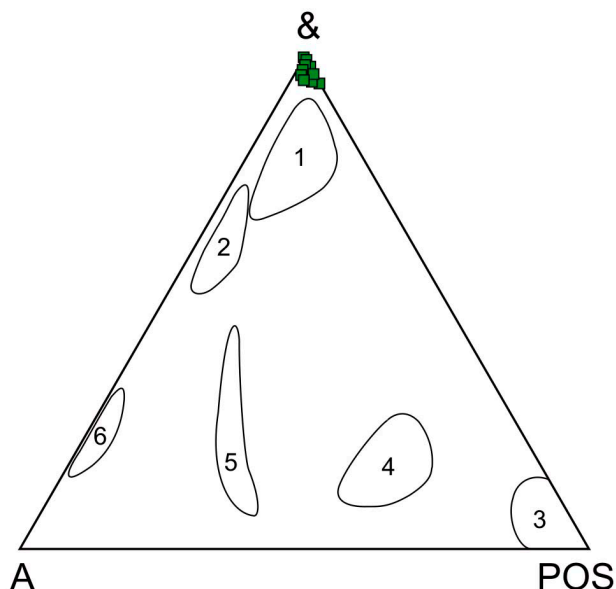
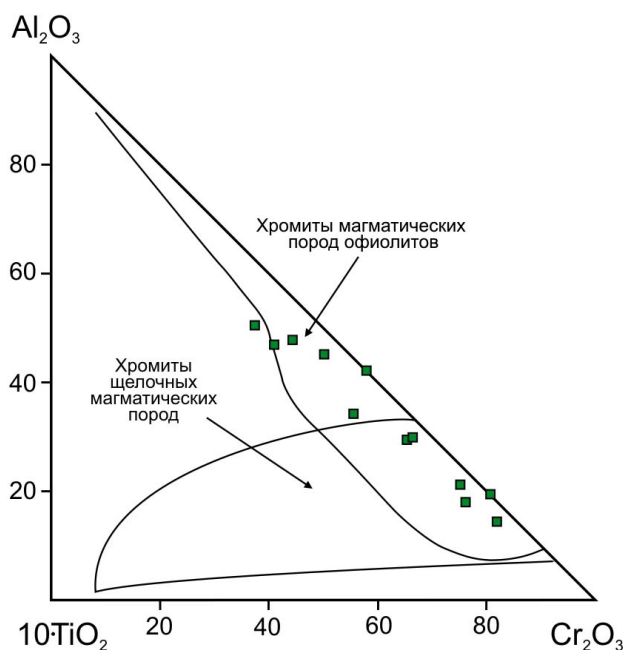


Рис. 8. Возможные типы областей питания для терригенных пород казачкинской свиты по тяжелым обломочным минералам на диаграмме &-A-POS (Garzanti, Ando, 2007), где A — амфиболы и эпидоты, POS — клинопироксены, ортопироксены, оливины и хромиты, & — другие прозрачные минералы. Типы питающих провинций: 1 — континентальные блоки (кратоны и краевые части рифтов); 2 — коллизионные орогены; 3–6 — магматические дуги: 3 — неэродированные, 4 — переходные слабоэродированные, 5 — переходные эродированные, 6 — сильноэродированные.

Fig. 8. Possible types of source areas for terrigenous rocks of the Kazachka formation according to heavy clastic minerals in the diagram &-A-POS (Garzanti, Ando, 2007), where A — amphiboles and epidotes, POS — clinopyroxenes, orthopyroxenes, olivines and chromites, & — other transparent minerals. Types of source provinces: 1 — continental blocks (cratons and marginal parts of rifts); 2 — collisional orogenes; 3–6 — magmatic arcs: 3 — uneroded, 4 — transitional weakly eroded, 5 — transitional eroded, 6 — strongly eroded.



**Рис. 9.** Диаграмма состава обломочных хромитов из песчаников казачкинской свиты и их вероятные магматические источники (Шека, Вржосек, 1983).

**Fig. 9.** Diagram of the composition of clastic chromites from the sandstones of the Kazachka formation and their probable magmatic sources (Shcheka, Vrzhossek, 1983).

относительно высокие содержания кремнекислоты, но невысокие (ГМ, ФМ, ТМ, ЖМ) либо умеренные (НКМ) значения литохимических модулей, незначительное преобладание  $K_2O$  над  $Na_2O$ , сравнительно невысокие суммарные концентрации РЗЭ, при довольно умеренной обогащенности легкими элементами по сравнению с тяжелыми, выраженная отрицательная Eu аномалия, а также положение фигуративных точек состава пород на парных диаграммах  $Zr/Sc-Th/Sc$ ,  $F_1-F_2$ ,  $Hf-La/Th$  и  $La/Sc-Th/Co$  (Cullers, 2002; Floyd, Leveridge, 1987; McLennan et al., 1993; Roser, Korsch, 1988) (рис. 10а-д), предназначенных для распознавания состава материнских пород питающих провинций, свидетельствует, что основным источником вещества были кислые магматические породы, при заметно

**Рис. 10.** Вероятные источники питания для отложений казачкинской свиты по геохимическим данным на диаграммах: а —  $Zr/Sc-Th/Sc$  (McLennan et al., 1993); б —  $F_1-F_2$  (Roser, Korsch, 1988).  $F_1=30.638 \times TiO_2/Al_2O_3 - 12.541 \times Fe_2O_3^*/Al_2O_3 + 7.329 \times MgO/Al_2O_3 + 12.031 \times Na_2O/Al_2O_3 + 35.402 \times K_2O/Al_2O_3 - 6.382$ ;  $F_2=56.5 \times TiO_2/Al_2O_3 - 10.879 \times Fe_2O_3^*/Al_2O_3 + 30.875 \times MgO/Al_2O_3 - 5.404 \times Na_2O/Al_2O_3 + 11.112 \times K_2O/Al_2O_3 - 3.89$ ; в —  $Hf-La/Th$  (Floyd, Leveridge, 1987); г —  $La/Sc-Th/Co$  (Cullers, 2002); д —  $Zr-TiO_2$  (Hayashi et al., 1997); е — доля участия продуктов размыва кислых и основных магматических пород в составе песчаников свиты (Condie, Wronkiewicz, 1990). Условные обозначения см. на рис. 5.

**Fig. 10.** Probable source areas for deposits of the Kazachka formation according to geochemical data on the diagrams: а —  $Zr/Sc-Th/Sc$  (McLennan et al., 1993); б —  $F_1-F_2$  (Roser and Korsch, 1988).  $F_1=30.638 \times TiO_2/Al_2O_3 - 12.541 \times Fe_2O_3^*/Al_2O_3 + 7.329 \times MgO/Al_2O_3 + 12.031 \times Na_2O/Al_2O_3 + 35.402 \times K_2O/Al_2O_3 - 6.382$ ;  $F_2=56.5 \times TiO_2/Al_2O_3 - 10.879 \times Fe_2O_3^*/Al_2O_3 + 30.875 \times MgO/Al_2O_3 - 5.404 \times Na_2O/Al_2O_3 + 11.112 \times K_2O/Al_2O_3 - 3.89$ ; в —  $Hf-La/Th$  (Floyd, Leveridge, 1987); г —  $La/Sc-Th/Co$  (Cullers, 2002); д —  $Zr-TiO_2$  (Hayashi et al., 1997); е — the share of erosion products of acidic and basic igneous rocks in the composition of sandstones of the formation (Condie, Wronkiewicz, 1990). See Fig. 5 for legend.

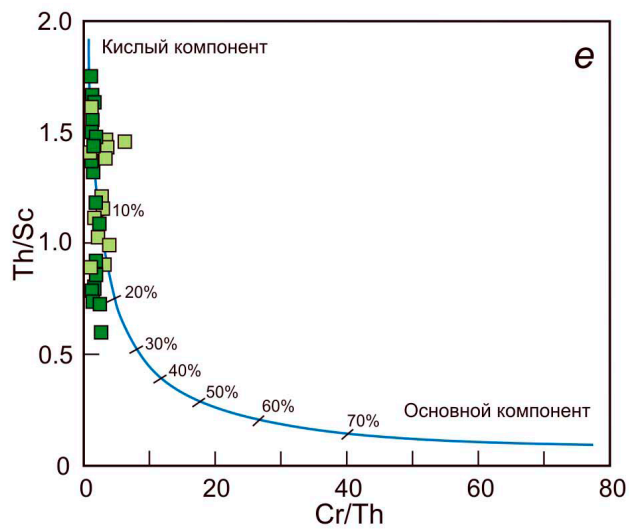
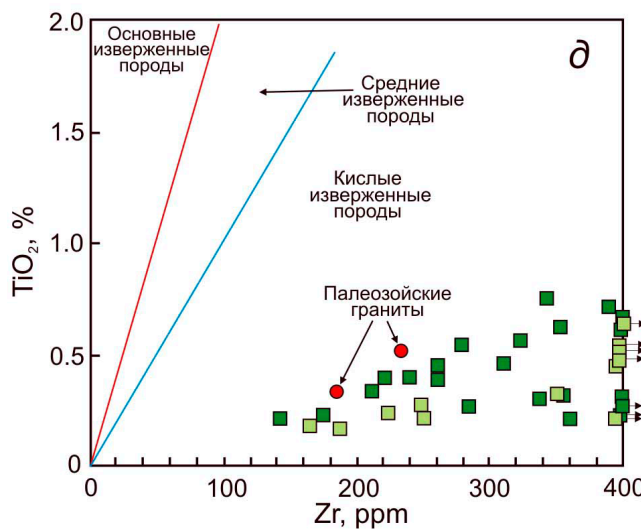
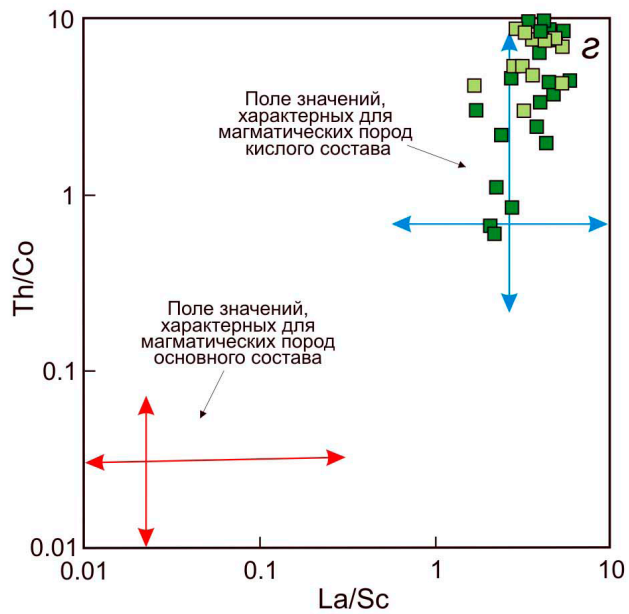
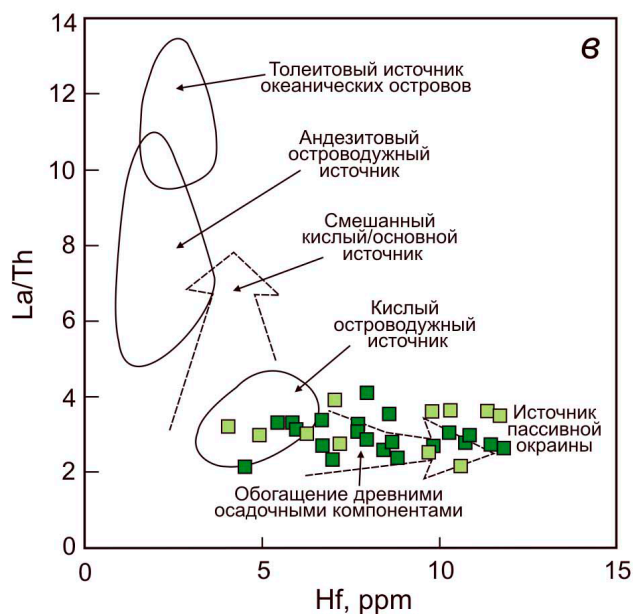
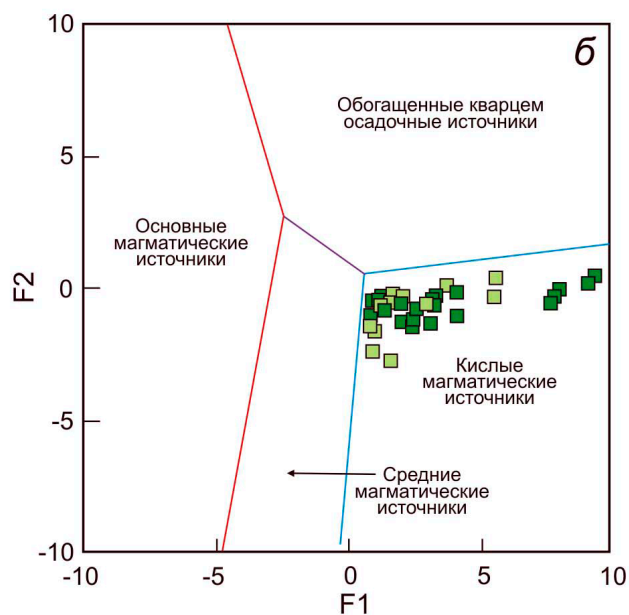
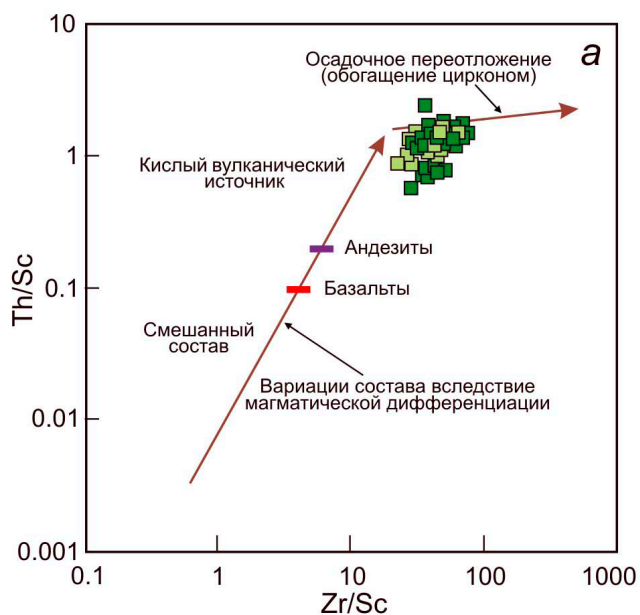
меньшей доле участия средней и, возможно, основной вулканокластике, а также осадочных пород, обогащенных древними обломочными компонентами. Расположение фигуративных точек терригенных пород на диаграмме  $Zr-TiO_2$  (Hayashi et al., 1997) (рис. 10д) достаточно близко к среднему составу широко развитых в юго-западной части Приморья палеозойских гранитоидов (Крук и др., 2017), которые вполне могли служить одним из источников обломочного материала. Доля участия в составе пород основных-средних компонентов оценивается по положению точек на диаграмме  $Cr/Th-Th/Sc$  (Condie, Wronkiewicz, 1990) (рис. 10е). Она, очевидно, редко превышает 20 %, в среднем составляя около 10 %.

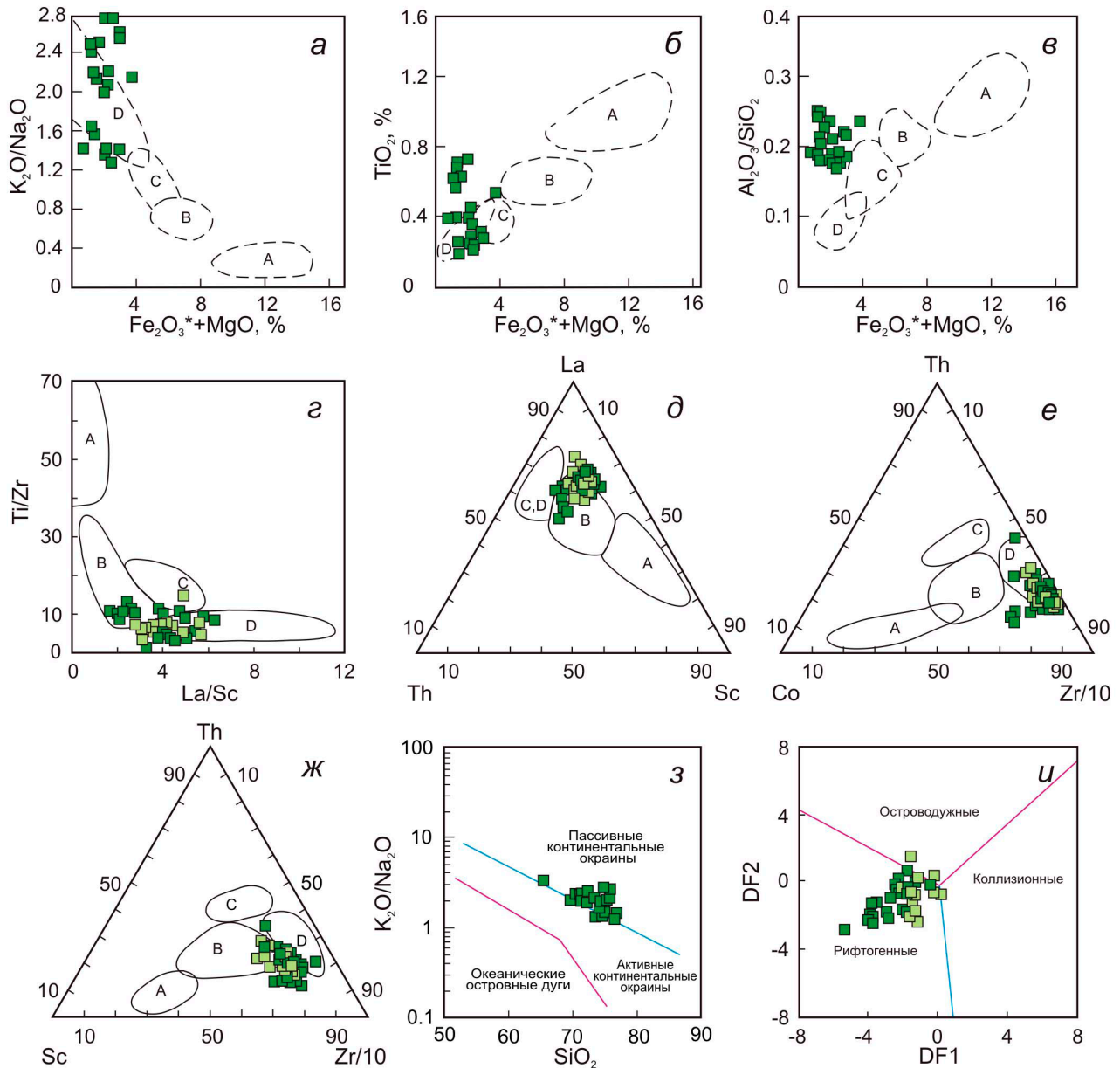
Реконструкция палеогеодинамических обстановок формирования отложений казачкинской свиты была осуществлена с помощью дискриминантных диаграмм, предназначенных для интерпретации геохимического состава терригенных пород (рис. 11).

На диаграммах М. Бхатия и А. Крука (Bhatia, 1983; Bhatia, Crook, 1986) (рис. 11а-ж) фигуративные точки пород свиты локализируются в полях седиментационных бассейнов, образованных в различных геодинамических обстановках: активных континентальных окраин, включающих в себя, в понимании авторов, окраины, осложненные сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам, бассейнов пассивных континентальных окраин, а также бассейнов, связанных с окраинно-континентальными магматическими дугами. Также достаточно неоднозначно геодинамические обстановки интерпретируются и на диаграмме  $K_2O/Na_2O-SiO_2$  (Roser, Korsch, 1986) (рис. 11з). На ней точки ложатся как в поле бассейнов, формировавшихся в обстановках активных континентальных окраин, так и бассейнов, связанных с пассивными окраинами.

На дискриминантной диаграмме  $DF1-DF2$  (Verma, Armstrong-Altrin, 2013) (рис. 11и), применяющейся для пород с высоким содержанием кремнезема ( $SiO_2 > 63\%$ ), фигуративные точки пород казачкинской свиты практически

ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ОБСТАНОВКИ





**Рис. 11.** Палеогеодинамические обстановки формирования отложений казахкинской свиты на основании интерпретации геохимических данных на диаграммах, определяющих: *а–ж* — типы седиментационных бассейнов (Bhatia, 1983; Bhatia, Crook, 1986). Поля значений геохимических параметров древних песчаников из бассейнов, сопряженных с океаническими (А), и континентальными (В) островными дугами, активными (С) и D пассивными континентальными окраинами.  $Fe_2O_3^*$  — общее железо; *з* — бассейновые обстановки (Roser, Korsch, 1986); *и* — возможные типы геодинамических обстановок для высокремнистых пород (Verma, Armstrong-Altrin, 2013).  $DF1 = -0.263 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 0.604 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + 1.725 \times \ln(Fe_2O_3^*/SiO_2)_{adj} + 0.66 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + 2.191 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} + 0.144 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} - 1.304 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} + 0.054 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} - 0.33 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} + 1.588$ ;  $DF2 = -1.196 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 1.064 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + 0.303 \times \ln(Fe_2O_3^*/SiO_2)_{adj} + 0.436 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + 0.838 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} + 0.407 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} + 1.021 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} - 1.706 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} - 0.126 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} - 1.068$ . Условные обозначения см. на рис. 5.

**Fig. 11.** Paleogeodynamic settings for the formation of deposits of the Kazachka formation based on the interpretation of geochemical data on diagrams defining: *a–ж* — types of sedimentary basins (Bhatia, 1983; Bhatia, Crook, 1986). Fields of values of geochemical parameters of ancient sandstones from basins related to oceanic (A) and continental (B) island arcs, active (C) and passive (D) continental margins.  $Fe_2O_3^*$  — total iron; *з* — basins settings (Roser, Korsch, 1986); *и* — possible types of geodynamic settings for rocks with high SiO<sub>2</sub> content (Verma, Armstrong-Altrin, 2013).  $DF1 = -0.263 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 0.604 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + 1.725 \times \ln(Fe_2O_3^*/SiO_2)_{adj} + 0.66 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + 2.191 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} + 0.144 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} - 1.304 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} + 0.054 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} - 0.33 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} + 1.588$ ;  $DF2 = -1.196 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 1.064 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + 0.303 \times \ln(Fe_2O_3^*/SiO_2)_{adj} + 0.436 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + 0.838 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} + 0.407 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} + 1.021 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} - 1.706 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} - 0.126 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} - 1.068$ . See Fig. 5 for legend.

полностью группируются в поле рифтогенных обстановок, которые включают и обстановки связанные со сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам (Маслов и др., 2019; Sengör, Natal'in, 2001). В целом же, такое «промежуточное» положение точек на всех диаграммах вероятно и является характерным и достаточно надежным признаком седиментации в обстановке трансформной окраины, когда в область размыва попадают краевые части континентов, окраинно-континентальные дуги и ранее аккрецированные фрагменты активных и пассивных окраин (Малиновский, Голозубов, 2011).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучен вещественный состав раннепермских терригенных пород казачкинской свиты Юго-Западного Приморья. Обобщение и интерпретация полученных данных позволили восстановить геодинамическую обстановку формирования ее отложений, а также определить петрографический состав материнских пород источников их питания.

Особенности вещественного состава пород свиты свидетельствуют, что по своим параметрам они достаточно однородны, относятся преимущественно к лититовым аренитам и аркозам, являясь петрогенными или «first cycle» породами, прошедшими один цикл переотложения заметно выветрелых исходных пород областей денудации.

Судя по преобладанию в песчаниках свиты сиалической ассоциации тяжелых минералов, высокому содержанию кварца и кремнекислоты, преобладанию  $K_2O$  над  $Na_2O$ , обогащенности легкими РЗЭ по сравнению с тяжелыми, выраженной отрицательной Eu аномалии, а также положению точек состава пород на дискриминационных диаграммах, отложения формировались, главным образом, за счет размывавшихся континентальных источников питания: кратонов и поднятых блоков основания, представлявших собой выступы кристаллического фундамента. Основным источником поступления вещества были кислые изверженные породы, при незначительной доле участия основных-средних вулканитов и осадочных пород, обогащенных древними обломочными компонентами. Вместе с тем, присутствие в песчаниках свиты небольшого количества фемических тяжелых минералов указывает на участие в строении областей сноса и пород основного и ультраосновного состава.

В целом, анализ и палеогеодинамическая интерпретация всей совокупности полученных в процессе исследования данных свидетельствуют о том, что накопление отложений казачкинской свиты происходило в геодинамической обстановке активной континентальной окраины, в

том числе, вероятно, и в бассейнах, связанных со сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам.

## Список литературы [References]

- Бураго В.И.* Представители рода *Comia* в пермских отложениях Приморья // Палеоботаника и флоростратиграфия Востока СССР. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. С. 17–43 [*Burago V.I.* Predstaviteli roda *Comia* v permskikh otlozheniyah Primor'ya // Paleobotanika i fitostratigrafiya Vostoka SSSR. Vladivostok: DVNC AN SSSR, 1983. P. 17–43 (in Russian)].
- Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. С. 1–572 [*Geodynamics, Magmatism and Metallogeny of the Russian East*. Ed. A.I. Khanchuk, Vladivostok: Dalnauka, 2006. Book 1. P. 1–572 (in Russian)].
- Голозубов В.В., Малиновский А.И., Касаткин С.А., Желдак М.В.* Динамика формирования и последующих преобразований Лаоелин-Гродековского террейна (Юго-Западное Приморье) // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Материалы V Всероссийской конференции с международным участием. Владивосток: Изд-во ДВФУ, 2021. С. 22–24 [*Golozubov V.V., Malinovsky A.I., Kasatkin S.A., Zheldak M.V.* Dinamika formirovaniya i posleduyushchih preobrazovaniy Laeelin-Grodekovskogo terrejna (YUgo-Zapadnoe Primor'e) // Geologicheskie processy v obstanovkakh subdukcii, kollizii i skol'zheniya litosfernyh плит. Materialy V Vserossiyskaya konferenciya s mezhdunarodnym uchastiem. Vladivostok: Izd-vo DVFU, 2021. P. 22–24 (in Russian)].
- Котляр Г.В., Пухонто С.К., Бураго В.И.* Межрегиональная корреляция континентальных и морских пермских отложений северо-востока России, юга Дальнего Востока, Сибири и печорского Приуралья // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 1. С. 3–21. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2018-37-1-3-21> [*Kotlyar G.V., Pukhonto S.K., Burago V.I.* Interregional correlation of Permian continental and marine deposits of northeastern Russia, southern Far East, Siberia, and Pechora Cisurals // Russian Journal of Pacific Geology. 2018. V. 12. Iss. 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1134/S1819714018010037>].
- Крук Н.Н., Голозубов В.В., Киселев В.И. и др.* Палеозойские гранитоиды южной части Вознесенского террейна (Южное Приморье): возраст, вещественный состав, источники расплавов и обстановки формирования // Тихоокеанская геология. 2018. Т. 37. № 3. С. 32–53. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2018-37-3-32-53> [*Kruk N.N., Golozubov V.V., Kiselev V.I. et al.* Paleozoic granitoids of the Southern Part of the Voznesenka terrane (Southern Primorye): age, composition, melt sources, and tectonic settings // Russian Journal of Pacific Geology. 2018. V. 12. Iss. 3. P. 190–209. <https://doi.org/10.1134/S1819714018030041>].
- Летникова Е.Ф., Вещева С.В., Прошенкин А.И. и др.* Неопротерозойские терригенные отложения

- Тувинско-Монгольского массива: геохимическая корреляция, источники сноса, геодинамическая реконструкция // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 12. С. 2110–2121 [Letnikova E.F., Veshcheva S.V., Proshenkin A.I. et al. Neoproterozoic terrigenous deposits of the Tuva-Mongolian massif: geochemical correlation, source lands, and geodynamic reconstruction // Russian Geology and Geophysics. 2011. V. 52. Iss. 12. С. 1662–1671. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.11.013>].
- Малиновский А.И. Геохимические особенности и палеогеодинамические обстановки накопления пермских и триасовых отложений юга Лаоелин-Гродековского террейна (Приморье) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2021. № 4. Вып. 52. С. 46–60. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2021-4-52-46-60> [Malinovsky A.I. Geochemical features and paleogeodynamic settings of Permian and Triassic deposits accumulation in the south of the Laeelin-Grodekovo terrane (Primorye) // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2021. № 4(52). P. 46–60 (in Russian)].
- Малиновский А.И., Голозубов В.В. Литология и обстановки формирования терригенных отложений вдоль трансформных границ плит на примере раннемелового Журавлевского террейна (южный Сихотэ-Алинь) // Тихоокеанская геология. 2011. Т. 30. № 5. С. 35–52 [Malinovsky A.I., Golozubov V.V. Lithology and Depositional Settings of the Terrigenous Sediments along Transform Plate Boundaries: Evidence from the Early Cretaceous Zhuravlevka Terrane in Southern Sikhote Alin // Russian Journal of Pacific Geology. 2011. V. 5. Iss. 5. P. 400–417. <https://doi.org/10.1134/S1819714011050058>].
- Малиновский А.И., Голозубов В.В. Нижнесилурийские терригенные отложения Лаоелин-Гродековского террейна (Южное Приморье): вещественный состав и обстановки формирования // Тихоокеанская геология. 2021. Т. 40. № 1. С. 25–44. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2021-40-1-25-44> [Malinovsky A.I., Golozubov V.V. Lower Silurian terrigenous rocks of the Laeeling-Grodekovo terrane, Southern Primorye: composition and formation settings // Russian Journal of Pacific Geology. 2021. V. 15 Iss. 1. P. 1–19. <https://doi.org/10.1134/S1819714021010036>].
- Маслов А.В., Мизенс Г.А., Подковыров В.Н. и др. Синорогенные псаммиты: основные черты литохимии // Литология и полезные ископаемые. 2013. № 1. С. 70–96. <https://doi.org/10.7868/S0024497X12050047> [Maslov A.V., Mizens G.A., Podkovyrov V.N. et al. Synorogenic psammities: major lithochemical features // Lithology and Mineral Resources. 2013. V. 48. Iss. 1. P. 74–97. <https://doi.org/10.1134/S0024490212050045>].
- Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гареев Э.З., Ножкин А.Д. Синрифтовые песчаники и глинистые породы: валовый химический состав и положение на ряде дискриминантных палеогеодинамических диаграмм // Литология и полез. ископаемые. 2019. № 5. С. 439–465. <https://doi.org/10.31857/S0024-497X20195439-465> [Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., Nozhkin A.D. Synrift sandstones and mudstones: bulk chemical composition and position in some discriminant paleogeodynamic diagrams // Lithology and Mineral Resources. 2019. V. 54. Iss. 2. P. 390–411. <https://doi.org/10.1134/S0024490219050055>].
- Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И. и др. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2003. Т. 22. № 6. С. 7–41 [Parfenov L.M., Berzin N.A., Khanchuk A.I. et al. A model for the formation of orogenic belts in Central and Northwest Asia // Tikhookeanskaya Geologia. 2003. V. 22. № 6. P. 7–41 (in Russian)].
- Щека С.А., Вржосек А.А. Ультраосновной вулканизм Тихоокеанского комплекса и вопросы систематики меймечитов и коматиитов // Вулканология и сейсмология. 1983. № 2. С. 3–16. [Shechka S.A., Vrzhossek A.A. Ultramafic volcanism of the Pacific complex and issues of the systematics of meymechites and comatiites // Volcanology and Seismology. 1983. № 2. P. 3–16. (in Russian)].
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с. [Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Principles of lithochemistry. St. Petersburg: Nauka, 2000. 479 p. (in Russian)].
- Bahlburg H., Dobrzinski N.A. A review of the chemical index of alteration (CIA) and its application to the study of Neoproterozoic glacial deposits and climate transitions // Geological Society of London. 2011. V. 36. P. 81–92. <https://doi.org/10.1144/M36.6>
- Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical compositions of sandstones // Journal of Geology. 1983. V. 91. № 6. P. 611–627. <https://doi.org/10.1086/628815>
- Bhatia M.R., Crook K.A.W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1986. V. 92. P. 181–193. <https://doi.org/10.1007/BF00375292>
- Boynnton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // Rare Earth element geochemistry / Edited by P. Henderson. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 63–114. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3>
- Condie K.C., Wronkiewicz D.A. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution // Earth and Planetary Science Letters. 1990. V. 97. № 34. P. 256–267. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(90\)90046-Z](https://doi.org/10.1016/0012-821X(90)90046-Z)
- Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // Chemical Geology. 2002. V. 191. Iss. 4. P. 305–327. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(02\)00133-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X)
- Floyd P.A., Leveridge B.E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones // Journal of the Geological Society. 1987. V. 144. № 4. P. 531–542. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531>
- Hayashi K., Fujisawa H., Holland H., Ohmoto H. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1997. V. 61. № 19. P. 4115–4137. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00214-7)
- Garzanti E., Ando S. Plate tectonics and heavy mineral suites of modern sands // Heavy minerals in use.

- Developments in sedimentology. V. 58. / Eds M.A. Mange, D.T. Wright. Amsterdam: Elsevier, 2007. P. 741–764.
- Kotlyar G.V., Belyansky G.S., Burago V.I. et al.* South Primorye, Far East Russia — a key region for global Permian correlation // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2006. V. 26. P. 280–293. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2005.10.010>
- McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N.* Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics // *Geological Society of America. Special Paper 284*. P. 21–40. <https://doi.org/10.1130/SPE284-p21>
- Nesbitt H.W., Young G.M.* Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*. 1982. V. 299. P. 715–717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Parker A.* An index of weathering for silicate rocks // *Geological Magazine*. 1970. V. 107. Iss. 6. P. 501–504.
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R.* Sand and Sandstone, Heidelberg: Springer, 1972. 553 p.
- Pettijohn F.J.* Sedimentary rocks. 2nd edn. New York: Harper and Row, 1975. 628 p.
- Roser B.P., Korsch R.J.* Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio // *Journal of Geology*. 1986. V. 94. Iss. 5. P. 635–650. <https://www.jstor.org/stable/30078330>
- Roser B.P., Korsch R.J.* Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data // *Chemical Geology*. 1988. V. 67. Iss. 1–2. P. 119–139. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90010-1](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90010-1)
- Sengör A.M.C., Natal'in B.A.* Rifts of the world // *Mantle plumes: their Identification through Time* / Eds R.E. Ernst, K.L. Buchan. Geological Society of America. Special Papers. 2001. V. 352. P. 389–482. <https://doi.org/10.1130/0-8137-2352-3.389>
- Taylor S.R., McLennan S.M.* Planetary crusts: Their composition, origin and evolution. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 378 p. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.tb00744>
- The Central Asian orogenic belt: geology, evolution, tectonics and models / Ed. A. Kröner. Stuttgart: Borntraeger Science Publisher, 2015. 313 p.
- Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S.* New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins // *Chemical Geology*. 2013. V. 355. P. 117–133. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.07.014>

## MATERIAL COMPOSITION AND CONDITIONS OF FORMATION OF LOWER PERMIAN SEDIMENTS IN SOUTHWESTERN PRIMORYE (RUSSIAN FAR EAST)

A.I. Malinovsky

*Far East Geological Institute FEB RAS, Vladivostok, Russia, 690022; e-mail: malinovsky@fegi.ru*

Received December 23, 2024; revised February 20, 2025; accepted March 25, 2025

The results of study the material composition of terrigenous rocks of the Early Permian Kazachka formation exposed in the southwestern part of Primorye (Far East of Russia) are considered. The research was carried out with the aim of reconstructing the paleogeodynamic conditions of the formation of sediments, as well as determining the tectonic type and composition of source rocks. Composition of the studied rocks indicate that, in terms of their parameters, they mainly correspond to lithic arenites and arkoses, being petrogenic or «first cycle» rocks that have gone through one cycle of re-deposition of noticeably weathered parent rocks of denudation areas. The paleogeodynamic interpretation of the data obtained indicate that the deposits of the Kazachka formation was formed on an active continental margin, most likely in basins associated with strike-slip dislocations along transform faults. The clastic material came from continental sources areas — cratons and uplifted basement blocks, which were protrusions of the crystalline basement. Acidic igneous rocks and, to a lesser extent basic-medium volcanics and sedimentary rocks enriched with ancient clastic components were eroded.

*Keywords: Permian, Kazachka formation, material composition, formation settings, Primorye.*