

УДК 552.143:551.83(571.63)

**ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ФОРМИРОВАНИЯ
ПОЗДНЕФАНЕРОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ
ЮГА ЛАОЕЛИН-ГРОДЕКОВСКОГО ТЕРРЕЙНА (ПРИМОРЬЕ)
ПО ГЕОХИМИИ ПЕСЧАНЫХ ПОРОД**

Малиновский А.И.

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

В статье рассматриваются результаты геохимического изучения позднефанерозойских (пермских и триасовых) терригенных отложений, широко распространенных на юге Приморского края, где они образуют вытянутый вдоль границы с Китаем Лаоелин-Гродековский террейн. Исследования были направлены на детальное изучение геохимии песчаных пород юга террейна и, с использованием широко известных методов интерпретации, восстановление палеогеодинамических обстановок, в которых происходило осадконакопление, и распознавание состава и петрографической принадлежности пород, служивших основными источниками обломочного вещества. Проведенные исследования показали, что песчаные породы из отложений изученных свит заметно отличаются по геохимическому составу. Песчаники барабашской и мангуйской свит более соответствуют грауваккам, казачкинской – лититовым ареникам, а решетниковской – аркозам. Оценка литохимических особенностей песчаников свидетельствует о значительной степени выветрелости пород источников питания и образовании их за счет преимущественного размыва магматических пород кислого состава. По содержанию и соотношению микроэлементов песчаники достаточно близки. Для них свойственны относительно невысокие суммы концентраций РЗЭ, умеренно дифференцированные графики их распределения и четко проявленная отрицательная европиевая аномалия. Существующие вариации в составе песчаников обусловлены, вероятно, различиями в палеогеодинамических обстановках накопления отложений, а также в строении и составе источников обломочного вещества. Анализ полученных результатов на диаграммах, используемых для определения обстановок седиментации и источников питания, показал, что точки составов пород попадают в поля с различными тектоническими режимами, что позволяет предполагать их накопление в обстановке, связанной с крупномасштабными, трансформными движениями океанической плиты относительно континентальной. Отложения накапливались в основном за счет источников, сложенных кислыми магматическими породами, при незначительном участии вулканических пород основного и среднего состава, а также осадочных пород, обогащенных древними компонентами.

Ключевые слова: Лаоелин-Гродековский террейн, геохимия, песчаники, источники питания, геодинамические режимы

**GEODYNAMIC SETTINGS OF FORMATION OF LATE PHANEROZOIC DEPOSITS
OF THE SOUTH OF THE LAOELING-GRODEKOVO TERRANE (PRIMORYE)
BY GEOCHEMISTRY OF SANDY ROCKS**

Malinovsky A.I.

Far Eastern Geological Institute, FEBRAS, Vladivostok, e-mail: malinovsky@fegi.ru

The article examines the results of a geochemical study of Late Phanerozoic (Permian and Triassic) terrigenous deposits, widespread in the south of Primorsky Territory, where they form the Laoeling-Grodekovo terrane elongated along the border with China. The research was aimed at a detailed study of the geochemistry of sandy rocks in the south of the terrane and, using well-known methods of interpretation, restoration of paleogeodynamic settings in which sedimentation occurred, and recognition of the composition and petrographic affiliation of rocks that served as the main sources of clastic matter. The studies showed that the sandy rocks from the sediments of the studied formations differ markedly in geochemical composition. The sandstones of the Barabash and Mangulai formations are more consistent with the graywackes, the Kazachka ones – with the lithite arenites, and the Reshetnikovka – with the arkoses. Assessment of the lithochemical features of sandstones indicates a significant degree of weathering of the rocks of food sources and their formation due to the predominant erosion of igneous rocks of felsic composition. In terms of the content and ratio of trace elements, the sandstones are quite similar. They are characterized by relatively low sums of REE concentrations, moderately differentiated plots of their distribution, and a clearly manifested negative Europium anomaly. The existing variations in the composition of sandstones are probably due to differences in the paleogeodynamic environments of sediment accumulation, as well as in the structure and composition of clastic sources. The analysis of the results obtained on the diagrams used to determine the sedimentation setting and the power sources showed that the points of rocks composition fall into fields with different tectonic settings, which allows us to assume their accumulation in an environment associated with large-scale, transform, movements of the ocean plate relative to the continental. Deposits were accumulated mainly due to sources composed of felsic igneous rocks, with minor participation of volcanic rocks of the basic and intermediate composition, as well as sedimentary rocks enriched with ancient components.

Keywords: Laoeling-Grodekovo terrane, geochemistry, sandstones, power sources, geodynamic settings

Позднефанерозойские (пермские и триасовые) отложения широко распространены на территории юго-западного Приморья, где они образуют вытянутый на 300 км

вдоль границы с Китаем Лаоелин-Гродековский террейн (рис. 1). Террейн является одной из ключевых геологических структур восточной части Евразийского кон-

тинента и рассматривается как фрагмент позднепалеозойской-мезозойской активной окраины [1]. Геологическая позиция террейна, а также строение и вещественный состав отложений, слагающих его северную часть, рассмотрены в предыдущих публикациях [2; 3]. Цель исследования: изучение геохимических особенностей песчаных пород южной части террейна и реконструкция геодинамических обстановок их формирования.

Материалы и методы исследования

Нами исследовались песчаные породы из позднефанерозойских отложений южной части Лаоелин-Гродековского террейна. Для исследований отбирались наименее измененные образцы, что устанавливалось при петрографических исследованиях шлифов с помощью поляризационного микроскопа Carl Zeiss Axioplan 2 imaging2 (Германия). Элементный состав образцов горных пород (петрогенные и микроэлементы) определялся методами плазменной спектроскопии (ИСП-АЭС и ИСП-МС) в Аналитическом центре (ЦКП) ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток, аналитики: Остапенко Д.С., Еловский Е.В., Зарубина Н.В., Ткалина Е.А., Хуркало Н.В.). Исследования проводились на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ИСП-МС) Agilent 7500с (Agilent Technologies, Япония) и атомно-

эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой iCAP 7600 Duo (ИСП-АЭС) (Thermo Scientific, США).

Результаты исследования и их обсуждение

Лаоелин-Гродековский террейн является сложной складчатой структурой, сложенной сильнодислоцированными нижнесилурийскими и пермскими вулканогенно-осадочными образованиями, которые с угловым несогласием перекрыты поздне триасовыми терригенными отложениями [2; 3]. Отложения юга террейна имеют следующее строение (рис. 1). Раннепермская казачкинская свита (600 м) сложена меньше песчаниками, аргиллитами и алевролитами. Ранне-среднепермская решетниковская свита (1800 м) образована комплексом терригенных пород, среди которых преобладают песчаники, меньше алевролитов, аргиллитов, отмечаются линзы гравелитов и конгломератов. Среднепермская барабашская свита (850–2100 м) имеет пестрый литологический состав: базальты, андезиты, риолиты, туфы, туфобрекчии, песчаники, алевролиты, конгломераты, известняки. Поздне триасовая мангугайская свита (380–550 м) состоит из песчаников, конгломератов, гравелитов, алевролитов, аргиллитов, туфов, углей.

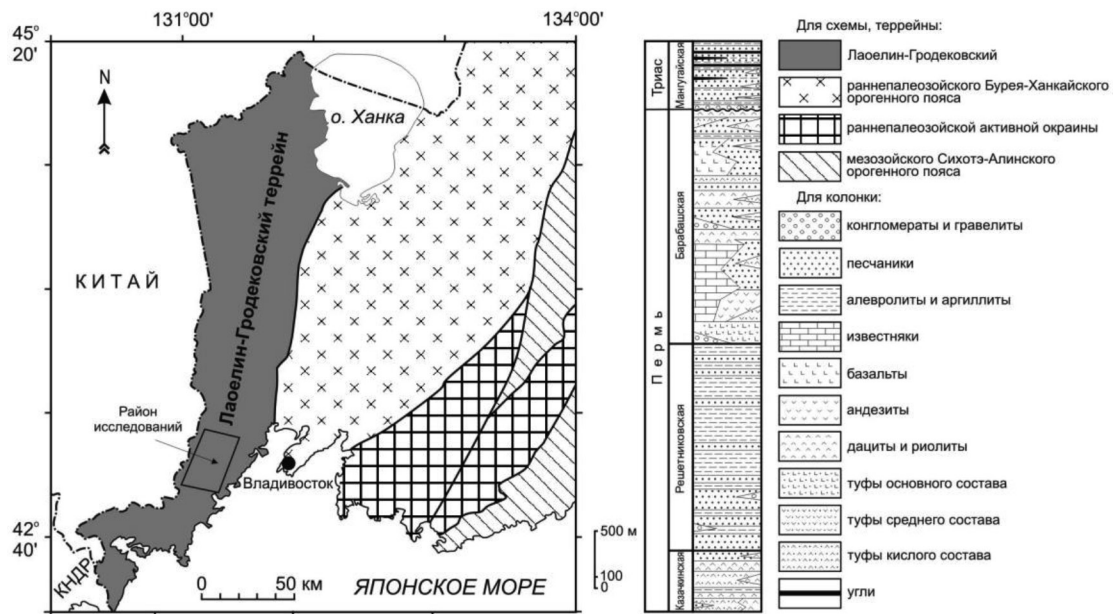


Рис. 1. Положение Лаоелин-Гродековского террейна в геологической структуре Южного Приморья [2] и стратиграфическая колонка позднефанерозойских образований его южной части

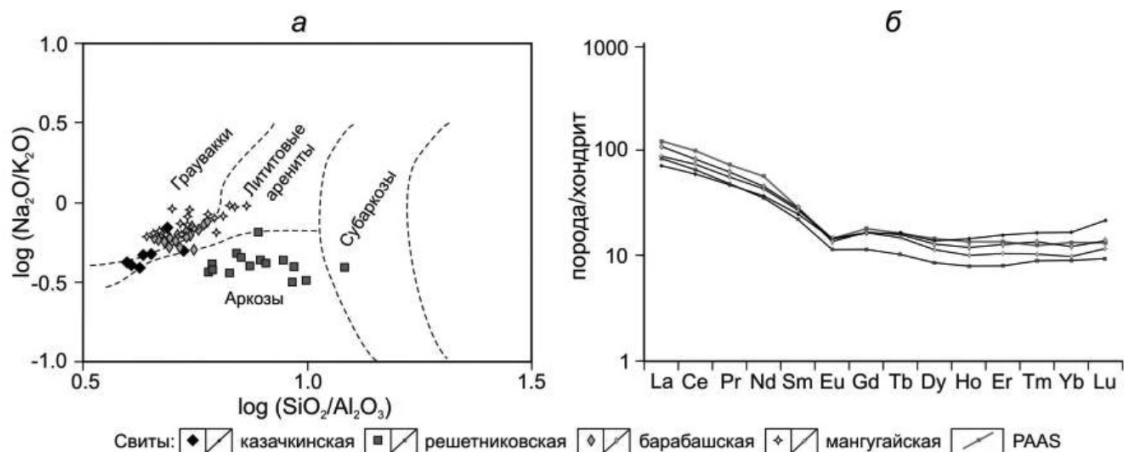


Рис. 2. Геохимический состав песчаников юга Лаоелин-Гродековского террейна: а – классификация по химическому составу [4]; б – распределение РЗЭ и их сравнение с PAAS [5]

Песчаники казачкинской свиты крупнозернистые, со слабой либо средней сортировкой и окатанностью материала. Вследствие своей крупной размерности порода состоит в основном (59–68%) из обломков пород: кислых и средних эффузивов, обломочных и кремнистых пород, сланцев и кварцитов. Кварца в породах 18–23%, а полевых шпатов 16–20%. Решетниковские песчаники средне- и крупнозернистые, со слабой либо средней степенью сортировки и окатанности обломков. В породах больше всего кварца (37–47%), но гораздо меньше полевых шпатов (25–37%) и обломков пород (22–32%) – кислых интрузивных и эффузивных, метаморфических и осадочных. Барабашские песчаники мелко- крупнозернистые, характеризуются преобладанием материала с умеренной степенью сортированности и окатанности. Породы состоят из кварца (28–35%), полевых шпатов (34–44%) и обломков пород (25–33%): кислых и средних магматических, обломочных, кремневых и метаморфических. Мангугайские песчаники разнозернистые, со слабой и средней сортировкой и окатанностью обломков. Кварца в них 33–40%, полевых шпатов 21–33%, обломков осадочных, метаморфических, кислых и средних магматических пород – 31–41%. По петрографической классификации решетниковские песчаники относятся к аркозам, а казачкинские, барабашские и мангугайские к грауваккам: кварцево-полевошпатовым и полевошпатово-кварцевым.

По геохимическим параметрам песчаники изученных свит существенно

отличаются. Песчаники казачкинской свиты однородны: в них довольно высокие содержания SiO_2 (70,71–75,63%) и Al_2O_3 (14,35–17,92%), но при этом, соответственно, пониженные TiO_2 (0,45–0,74%), $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (0,90–1,75%) и MgO (0,14–0,22%). Помимо этого, K_2O преобладает над Na_2O (2,49–4,25% и 1,24–2,11%), что свойственно аркозам и лититовым арениитам. Решетниковские песчаники заметно отличаются от пород других свит: в них больше всего SiO_2 (76,95%–86,89%), но и заметно меньше TiO_2 (0,15–0,41%), Al_2O_3 (6,93–13,01%), $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (0,84–1,61%) и MgO (0,14–0,45%). Для них также свойственно типичное для аркозов резкое преобладание K_2O над Na_2O (1,86–4,00% и 0,68–1,61%). В породах барабашской свиты, напротив, самые низкие содержания SiO_2 , незначительно изменяющиеся от 68,06% до 74,34%. Такие же мало изменяющиеся содержания TiO_2 (0,33–0,49%), Al_2O_3 (12,52–15,06%), $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (2,66–3,82%) и MgO (0,50–1,19%). K_2O по-прежнему преобладает над Na_2O (3,31–5,05% и 1,78–2,83%), что сближает породы с аркозами. В песчаниках мангугайской свиты изменения в химическом составе более значительны: SiO_2 (70,07–80,81%), TiO_2 (0,28–0,80%), Al_2O_3 (10,54–17,10%), $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (0,93–4,00%) и MgO (0,12–1,16%). Преобладание K_2O над Na_2O незначительно (1,13–2,80% и 0,05–1,93%), что также позволяет рассматривать породы как граувакки. На диаграмме химической классификации [4] (рис. 2а) казачкинские песчаники отвечают лититовым арениитам, что согласуется с преобладанием в их соста-

ве обломков пород. На этой же диаграмме решетниковские песчаники соответствуют типичным аркозам, а барабашские и мангугайские – грауваккам и, частично, лититовым аренитам.

Для геохимической характеристики осадочных пород применяются литохимические модули, раскрывающие черты их сходства и различия, устанавливающие степень зрелости осадков, а также помогающие выявить состав источников питания и определить тектонические режимы седиментации [6-8]. Изученным песчаникам свойственны невысокие уровни гидрוליатного модуля $GM = (Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2$ (0,16–0,29 в казачкинской, барабашской и мангугайской свитах, и еще более низкие 0,10–0,19 – в решетниковской), что говорит о достаточно высокой степени их зрелости и значительной роли химического выветривания в областях сноса. Значительная выветрелость исходных пород устанавливается и по высоким показателям индекса химического изменения $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$, изменяющимся от 55–67 в барабашских песчаниках до 61–90 – в мангугайских. Показателем, устанавливающим принадлежность песчаников к определенному петрографическому типу, является фемический модуль $FM = (Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO)/SiO_2$. В решетниковских и казачкинских песчаниках он низок, что характерно для аркозов (0,02–0,03 и 0,01–0,03). Барабашские и мангугайские породы по ФМ располагаются между граувакками и аркозами (0,05–0,07 и 0,02–0,06). Величина титанового модуля $TM = TiO_2/Al_2O_3$ отражает петрографическую принадлежность пород областей размыва. В пермских песчаниках его значения невелики (0,022–0,044), и лишь в мангугайской свите они поднимаются до 0,055. Невысокие значения модуля связаны с доминированием в областях размыва гранитоидов, которым свойственны именно низкие значения ТМ. На преобладающе кислый состав пород источников сноса указывают и низкие значения железного модуля $JM = (Fe_2O_3 + FeO + MnO)/(TiO_2 + Al_2O_3)$: в казачкинской и решетниковской свитах они изменяются от 0,05 до 0,15. Несколько же более высокие его значения в барабашской и мангугайской свитах (0,10–0,28) говорят о присутствии в области питания и пород основного-среднего состава. Величина модуля нормированной

щелочности $NKM = Na_2O + K_2O/Al_2O_3$, довольно высокая во всех пермских песчаниках (0,35–0,55), в целом соответствует аркозам. Это связано с большим содержанием в породах слюд и калишпатов. В породах мангугайской свиты значения НКМ значительно ниже (0,09–0,25), что приближает их к грауваккам и связано с их насыщенностью глинистым матриксом, обломками тонкозернистых пород и средних вулканитов. Полученные величины модулей, а также соотношения между ними свидетельствуют о петрогенной природе казачкинских и барабашских песчаников и, напротив, литогенной – решетниковских и мангугайских, прошедших многократный процесс переотложения обломочно-го материала.

Характер распределения микроэлементов в песчаниках однотипен. Для них свойственны относительно невысокие суммы концентраций РЗЭ (84–189 г/т), умеренно дифференцированные графики их распределения (La_N/Yb_N от 2,94–5,15 в казачкинской свите до 5,88–13,66 – в решетниковской) и четко проявленная отрицательная европиевая аномалия ($Eu/Eu^* = 0,55–0,85$) (рис. 26). По содержанию РЗЭ все породы близки к постархейскому австралийскому глинистому сланцу (РААС) [5], отличаясь незначительной обедненностью большинства элементов (до 1,7 раза), и лишь иногда они превышают РААС.

Для палеодинамических реконструкций обстановок формирования отложений использованы широко известные, разработанные в конце прошлого столетия, дискриминантные диаграммы, ссылки на которые приведены в многочисленных публикациях [7; 9; 10]. Распределение фигуративных точек химического состава песчаников на диаграмме F1–F2 (рис. 3а) свидетельствует, что породы казачкинской, решетниковской и барабашской свит локализованы в области составов, представляющих собой продукты размыва кислых магматических пород. Точки отложений мангугайской свиты преимущественно ложатся в область пород, образованных за счет эрозии средних и, частично, кислых пород. Интерпретация состава редких и РЗЭ на диаграммах Hf–La/Th, Zr/Sc–Th/Sc и La/Sc–Th/Co (рис. 3 б–г) подтверждает вывод о формировании отложений в основном за счет кислых магматических пород, при участии обогащенных кварцем и цирконом древних осадочных пород и основных-средних вулканитов.

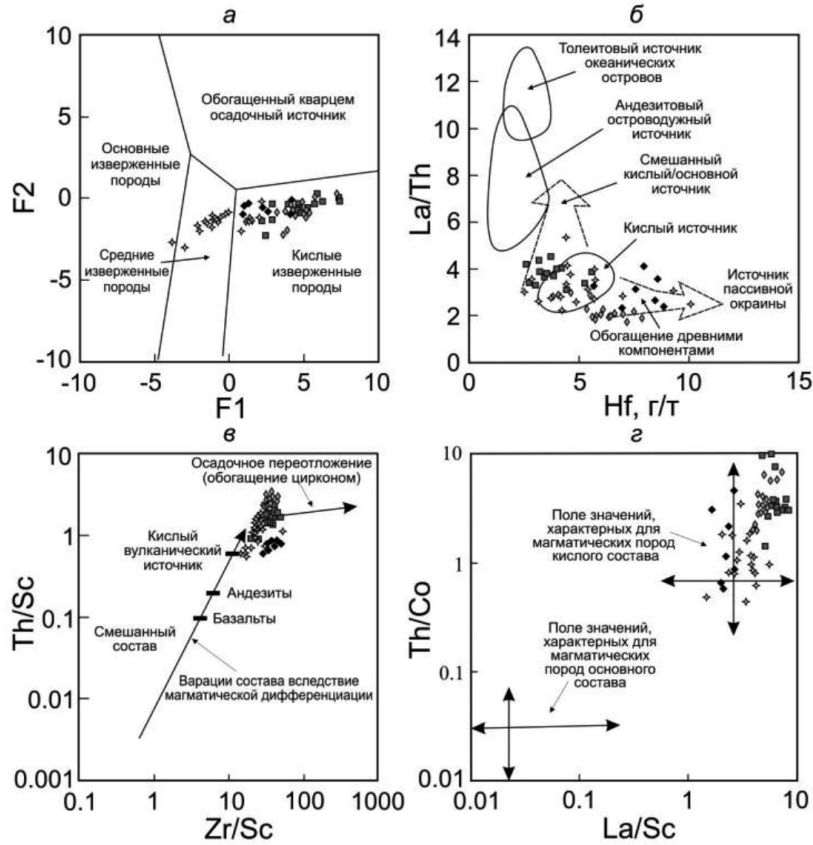


Рис. 3. Источники кластики для песчаников Лаолин-Гродековского террейна, диаграммы: а – F1-F2; б – Hf-La/Th; в – Zr/Sc-Th/Sc; з – La/Sc-Th/Co [6-8]. Условные обозначения см. на рис. 2

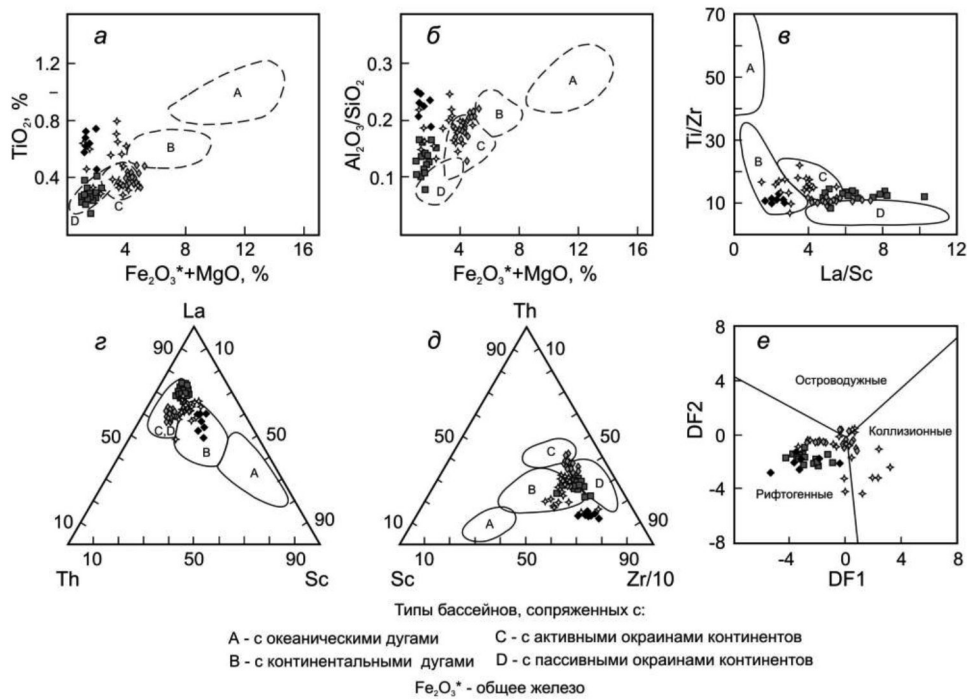


Рис. 4. Диаграммы интерпретации обстановок осадконакопления для отложений Лаолин-Гродековского террейна по геохимическому составу: а-д – типы бассейнов [6; 7; 9]; е – типы обстановок для пород с содержанием SiO₂ > 63% [10]. Условные обозначения см. на рис. 2

Локализация точек составов пород на диаграммах, применяемых для сравнения тектонических обстановок в различных седиментационных бассейнах [6; 7; 9] (рис. 4 а-д), показывает, что отложения казачкинской свиты накапливались в бассейне, связанном с континентальной островной дугой, решетниковской – в бассейнах, располагавшихся на пассивной континентальной окраине, а барабашской – на активной континентальной окраине. Эти бассейны были связаны с крупными движениями по трансформным разломам. Точки пород мангугайской свиты ложатся в поля бассейнов как континентальных дуг, так и активных окраин. На диаграмме DF1–DF2 [10] (рис. 4е) казачкинские и решетниковские песчаники занимают поле рифтогенных обстановок: авлакогенов, внутри- и межконтинентальных рифтов. Природа барабашской и мангугайской свит неоднозначна: их точки попадают в поля всех выделенных обстановок.

Заключение

В результате проведенных исследований получены новые данные о геохимическом составе позднефанерозойских песчаных пород юга Лаоелин-Гродековского террейна (Приморье). Полученные результаты позволили восстановить геодинамические обстановки формирования его отложений и определить породный состав областей питания. Установлено, что отложения существенно различаются по геохимическому составу: песчаники барабашской и мангугайской свит более соответствуют грауваккам, казачкинской – лититовым ареникам, а решетниковской – аркозам. Породы характеризуются довольно высокой зрелостью кластического материала. Анализ полученных результатов на диаграммах, предназначенных для определения возможных обстановок осадконакопления и источников питания, показал, что точки составов пород свит попадают в поля с различными тектоническими режимами, что позволяет предполагать их накопление в обстановке, связанной с крупномасштабными, трансформными движениями океанической плиты относительно континентальной [3]. Отложения накапливались в основном за счет источников, сложенных кислыми магматическими породами, при незначительном участии основных-средних вулканитов и обогащенных древними компонентами осадочных пород.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-05-00037-а.

Список литературы / References

1. Чашин А.А., Чашин С.А., Касаткин С.А., Голозубов В.В. Позднетриасовые вулканиты Тальминского комплекса (Юго-Западное Приморье): минералогия, геохимия и генезис // Успехи современного естествознания. 2020. № 11. С. 139–148. DOI: 10.17513/use.37528.
2. Chashchin A.A., Chashchin S.A., Kasatkin S.A., Golozubov V.V. Late Triassic volcanic rocks of Talminsky complex (South-Western Primorye): mineralogy, geochemistry and genesis // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya. 2020. № 11. P. 139–148 (in Russian).
3. Малиновский А.И., Голозубов В.В., Касаткин С.А. Геохимия, источники питания и геодинамические обстановки накопления нижнесилурийских терригенных отложений Лаоелин-Гродековского террейна (Приморье) // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 121–127. DOI: 10.17513/use.37250.
4. Malinovskiy A.I., Golozubov V.V., Kasatkin S.A. Geochemistry, power sources and geodynamic settings of the formation of upper Silurian terrigenous deposits of the Laeoling-Grodekovo terrane (Primorye) // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya. 2019. № 11. P. 121–127 (in Russian).
5. Малиновский А.И. Особенности обстановок формирования палеозойских и раннемезозойских отложения Юго-Западного Приморья: результаты изучения и интерпретации вещественного состава песчаных пород // Успехи современного естествознания. 2020. № 7. С. 132–138. DOI: 10.17513/use.37443.
6. Malinovskiy A.I. Features of the environments of the formation of Paleozoic and Early Mesozoic deposits of South-Western Primorye: the results of the study and interpretation of the material composition of sand rocks // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya. 2020. № 7. P. 132–138 (in Russian).
7. Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. Sand and Sandstone. New York: Springer. 1987. 553 p. DOI: 10.1007/978-1-4612-1066-5.
8. Taylor S.R., McLennan S.M. Planetary crusts: Their composition, origin and evolution. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 378 p. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2009.tb00744.
9. Летникова Е.Ф., Вещева С.В., Прошенкин А.И. Неопрогерозойские терригенные отложения Тувино-Монгольского массива: геохимическая корреляция, источники сноса, геодинамическая реконструкция // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 12. С. 2110–2121.
10. Letnikova E.F., Proshenkin A.I., Veshcheva S.V. Neoproterozoic terrigenous deposits of the Tuva-Mongolian massif: Geochemical correlation, source areas, and geodynamic reconstruction // Geologiya i geofizika. 2011. V. 52. № 12. С. 1662–1671. DOI: 10.1016/j.rgg.2011.11.013.
11. Малиновский А.И. Палеогеодинамические обстановки формирования отложений Западно-Сахалинского террейна по геохимическим данным // Успехи современного естествознания. 2017. № 6. С. 83–89. DOI: 10.17513/use.3650.
12. Malinovsky A.I. Paleogeodynamic settings of the West Sakhalin terrain sediments formation based on geochemical data // Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya. 2017. № 6. P. 83–89 (in Russian).
13. Маслов А.В., Мизенс Г.А., Подковыров В.Н., Гареев Э.З., Сорокин А.А., Смирнова Ю.Н., Сокур Т.М. Синорогенные псаммиты: основные черты литохимии // Литология и полезные ископаемые. 2013. № 1. С. 70–96. DOI: 10.7868/S0024497X12050047.
14. Maslov A.V., Mizens G.A., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., Sorokin A.A., Smirnova Yu.N., Sokur T.M. Synorogenic psammites: major lithochemical features // Litologiya i poleznyye iskopayemye. 2013. V. 48. № 1. P. 74–97. DOI: 10.1134/S0024490212050045.
15. Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гареев Э.З., Сергеева Н.Д. Синрифтовые песчаники: особенности валового химического состава и положение на дискриминантных палеогеодинамических диаграммах // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 59–80. DOI: 10.5800/GT-2018-9-1-0337.
16. Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., Sergeeva N.D. Syn-rift sandstones: the features of bulk chemical compositions, and positions on paleogeodynamic discriminant diagrams // Geodinamika i tektonofizika. 2018. V. 9. № 1. P. 59–80 (in Russian).
17. Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. Chem. Geol. 2013. V. 355. P. 117–133. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.07.014.