

УДК 552.143:551.242.22:551.733.3(571.63)

**ГЕОХИМИЯ, ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ И ГЕОДИНАМИЧЕСКИЕ  
ОБСТАНОВКИ НАКОПЛЕНИЯ НИЖЕСИЛУРИЙСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ  
ОТЛОЖЕНИЙ ЛАОЕЛИН-ГРОДЕКОВСКОГО ТЕРРЕЙНА (ПРИМОРЬЕ)****Малиновский А.И., Голозубов В.В., Касаткин С.А.***Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, e-mail: malinovsky@fegi.ru*

В статье рассматриваются результаты изучения геохимического состава песчаных и глинисто-алевритовых пород из нижнесилурийских отложений кордонкинской свиты Лаоелин-Гродековского террейна Приморья. Целью исследования было выяснение особенностей геохимического состава терригенных пород свиты и на основании его генетической интерпретации – реконструкция палеогеодинамической обстановки формирования бассейна седиментации, а также определение типа и породного состава возможных источников питания. Было установлено, что по своим геохимическим характеристикам песчаные породы свиты довольно однородны, являются петрогенными, по составу соответствуют типичным грауваккам, а их формирование происходило в основном за счет механического разрушения материнских пород областей сноса. Химическое выветривание имело второстепенное значение. Химический состав глинисто-алевритовых пород близок к составу песчаников, они отличаются только меньшими содержаниями кремнекислоты. Изученные породы характеризуются низкой степенью зрелости, слабой литодинамической переработкой материала источников питания, а также высокой скоростью его захоронения. При обобщении и интерпретации полученных геохимических данных использовался актуалистический подход, основанный на их сравнении с составами древних отложений и современных глубоководных осадков, формирование которых происходило в известных геодинамических обстановках. Полученные данные по содержанию и соотношению петрогенных, редких и редкоземельных элементов в терригенных породах раннесилурийской кордонкинской свиты свидетельствуют, что осадконакопление происходило в преддуговом бассейне океанической островной дуги, примером которой является ныне существующая Идзу-Бонинская дуга. Областью питания, поставившей обломочный материал в этот седиментационный бассейн, была сама островная дуга, в строении которой участвовали основные и средние вулканы, а также магматические и осадочные породы, входившие в состав ее океанического фундамента.

**Ключевые слова:** Лаоелин-Гродековский террейн, силур, кордонкинская свита, геохимия, геодинамические обстановки

**GEOCHEMISTRY, POWER SOURCES AND GEODYNAMIC SETTINGS  
OF THE FORMATION OF UPPER SILURIAN TERRIGENOUS DEPOSITS  
OF THE LAOELING-GRODEKOV TERRANE (PRIMORYE)****Malinovskiy A.I., Golozubov V.V., Kasatkin S.A.***Far Eastern Geological Institute, FEBRAS, Vladivostok, e-mail: malinovsky@fegi.ru*

This article studies the results of the geochemical composition analysis of sandy and clayey-silty rocks from the Upper Silurian deposits of the Kordonka formation of the Laeoln-Grodekovo terrane in Primorye. The purpose of the study was to find out features of the geochemical composition of the formation's terrigenous rocks and based on its genetic interpretation at reconstructing the paleogeodynamic settings of the sedimentation basin's formation as well as determining the type and rock composition of the possible power sources. It has been found that in its geochemical characteristics sand rocks are quite uniform, are petrogenic, in composition correspond to typical graywackes, and their formation was mainly due to mechanical destruction of maternal rocks of power sources. Chemical weathering was of secondary importance. The chemical composition of clayey-silty rocks is close to the composition of sandstones, they contain a small amount of silicic acid. Studied rocks are characterized by low a degree of maturity, weak lithodynamic recycling of material of power sources and their rapid burial. In generalizing and interpreting the obtained geochemical data, an actualistic approach was used, based on their comparison with compositions of ancient deposits and modern deep-sea sediments, which were formed in well-known geodynamic settings. The obtained data on the composition and distribution of petrogenic, rare and rare earth elements in terrigenous rocks of the Upper Silurian Kordonka formation indicate that sedimentation took place in a forearc basin of an oceanic island arc (e.g. the existing Izu-Bonin arc). The power sources that supplied the clastic material to this sedimentation basin was the island arc itself, the structure of which involved the basic and intermediate volcanic rocks, as well as the igneous and sedimentary rocks that were part of its ocean base.

**Keywords:** Laoelin-Grodekovo terrane, silurian, kordonka formation, geochemistry, geodynamic settings

Изучение геохимических особенностей терригенных пород, принимающих участие в строении древних террейнов, имеет важнейшее значение для реконструкции геодинамических обстановок формирования седиментационных бассейнов, в которых эти породы накапливались, а также для выяснения тектонического типа и породного

состава областей их питания [1–3]. В складчатых областях, где из-за плохой обнаженности и сложного строения толщ геологические исследования крайне затруднены, правильная интерпретация полученных геохимических данных во многом определяет надежность палеореконструкций, достоверность стратиграфических схем, геологиче-

ских разрезов и карт. В настоящее время каких-либо устоявшихся представлений о геодинамической природе нижнесилурийских отложений палеозойско-раннемезозойского Лаоэлин-Гродековского террейна Приморья нет [4]. Имеющиеся построения носят в целом общий характер и основаны на серии предположений, которые требуют фактических обоснований. Цель данной публикации – показать особенности геохимического состава терригенных пород раннесилурийской кордонкинской свиты террейна и на основании его интерпретации установить геодинамическую природу бассейна седиментации, а также определить источники его питания.

### Материалы и методы исследования

В основу исследования положены результаты изучения содержания и характера соотношений петрогенных, редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) в раннесилурийских терригенных породах Лаоэлин-Гродековского террейна Приморья. Пробы пород отбирались из обнажений, располагающихся вдоль берега р. Кордонка, в придорожных выемках и карьерах. Для аналитических исследований выбирались породы, наименее затронутые вторичными изменениями, что контролировалось петрографическими наблюдениями. Содержания петрогенных элементов определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре iCAP 6500 Duo. Определение концентраций редких и редкоземельных элементов выполнялось методом плазменной спектроскопии (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500с. Все исследования выполнены в лабораториях аналитической химии и рентгеновских методов Аналитического центра (ЦКП) ДВГИ ДВО РАН, аналитики Е.В. Волкова, Г.А. Горбач, Е.В. Еловский, В.Н. Каминская, Е.А. Ткалина, Н.В. Хуркало.

### Результаты исследования и их обсуждение

Лаоэлин-Гродековский террейн расположен в юго-западной части Приморского края, протягиваясь вдоль границы с Китаем на 300 км и частично располагаясь на его территории (рис. 1). Террейн совместно с раннепалеозойскими террейнами Бурей-Ханкайского орогенного пояса составляет западное обрамление позднемезозойского Сихотэ-Алинь-Северо-Сахалинского орогенного пояса [4, 5]. Террейн образован

мозаикой разновозрастных блоков, сложенных главным образом интенсивно дислоцированными пермскими и триасовыми терригенными и вулканогенными образованиями, прорванными гранитоидами позднепермского и юрского возраста. В западной части террейна выделяется линзовидный тектонический блок, протягивающийся в меридиональном направлении на 35 км при ширине до 6 км и сложенный нижнесилурийскими отложениями, относящимися к кордонкинской свите. Мощность ее отложения достигает 2100 м. Они представлены песчаниками различной зернистости, алевритами, аргиллитами, слюдными сланцами, туфами и тефроидами, базальтами и андезитами, иногда конгломератами и кремнистыми породами. Раннесилурийский возраст свиты устанавливается на основании многочисленных находок остатков граптолитов и брахиопод [6].

Для геохимических исследований использовались наиболее типичные по своим петрографическим свойствам песчаные и глинисто-алевритовые породы. Изученные песчаники по размерности, от мелко- до крупнозернистых, обладают слабой либо средней степенью сортированности и окатанности обломочного материала. По пороодообразующим компонентам породы относятся к кварц-полевошпатовым и собственно грауваккам. Обломочная составляющая представлена кварцем (10–25%), полевыми шпатами (25–60%) и обломками пород (35–65%), среди которых в различных количествах встречаются кремнистые, вулканические и терригенные породы, кварциты и сланцы.

По химическому составу песчаные породы кордонкинской свиты очень близки: содержание  $\text{SiO}_2$  варьирует от 54,50% до 57,75% и лишь в двух пробах превышает 60%,  $\text{TiO}_2$  (0,61–1,19%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (12,22–16,66%),  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (6,63–9,26%),  $\text{MgO}$  (2,36–7,83%). Помимо этого, песчаники характеризуются преобладанием  $\text{Na}_2\text{O}$  над  $\text{K}_2\text{O}$  (2,26–4,39% и 0,86–2,13% соответственно). По своим геохимическим параметрам песчаники являются типичными граувакками (рис. 2) [7]. Химический состав глинисто-алевритовых пород близок к составу песчаников, они отличаются только меньшими содержаниями  $\text{SiO}_2$  (54,29–58,74%) и  $\text{MgO}$  (3,20–4,50%), но большими –  $\text{TiO}_2$  (0,64–1,42%),  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (17,15–18,67%) и  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  (7,72–12,28%). Кроме того,  $\text{K}_2\text{O}$  в них преобладает над  $\text{Na}_2\text{O}$  (2,67–3,44% и 1,28–2,31% соответственно).

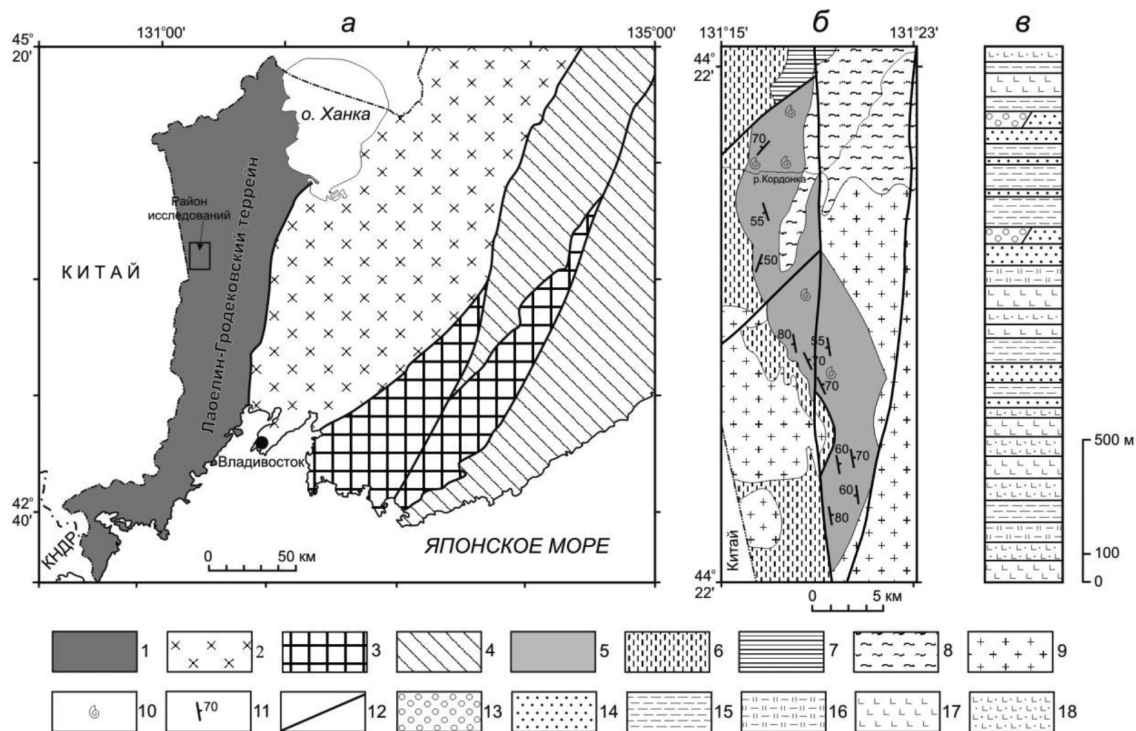


Рис. 1. Схема расположения Лаолин-Гродековского террейна в геологических структурах Южного Приморья – а; геологическая карта района распространения отложений кордонкинской свиты – б; литолого-стратиграфическая колонка отложений кордонкинской свиты – в. Для схемы: 1 – Лаолин-Гродековский террейн; 2 – террейны раннепалеозойского Бурей-Ханкайского орогенного пояса; 3 – террейны раннепалеозойской активной окраины, 4 – террейны мезозойского Сихотэ-Алинского орогенного пояса. Для карты: 5 – кордонкинская свита ( $S_{kr}$ ); 6 – решетниковская свита ( $P_{1,rs}$ ); 7 – барабаишская свита ( $P_{2,3br}$ ); 8 – павловская свита ( $P_3-N_{pv}$ ); 9 – позднепермские граниты ( $gP_3$ ); 10 – места нахождения фауны; 11 – элементы залегания пород; 12 – разломы. Для колонки: 13 – конгломераты и гравелиты; 14 – песчаники; 15 – алевриты и аргиллиты; 16 – кремнистые и кремнисто-глинистые породы; 17 – базальты и андезиты; 18 – туфы и туффиты

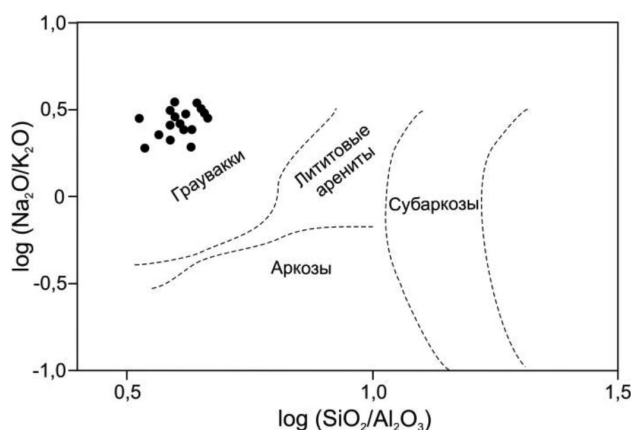


Рис. 2. Классификационная диаграмма для песчаных пород кордонкинской свиты [7]

Использование ряда петрохимических модулей [8] позволяет получить объективную информацию о степени зрелости изученных пород, литогенной либо пе-

трогенной природе осадков, а также корректно проводить палеореконструкции условий и обстановок осадконакопления. По этим показателям породы кордонкин-

ской свиты характеризуются: 1) значениями гидролизатного модуля  $ГМ = (Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2$ , варьирующими от 0,35–0,47 для песчаных пород до 0,46–0,55 для глинисто-алевритовых, что свидетельствует об их низкой зрелости и образовании за счет физического выветривания пород областей сноса, химическое выветривание имело второстепенное значение, 2) высоким показателем фемичности  $ФМ = (Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO)/SiO_2$  (во всех породах от 0,15 до 0,30), позволяющим относить их к типичным грауваккам, 3) высокой титанистостью  $ТМ = TiO_2/Al_2O_3$  (в песчаниках 0,041–0,071, а в глинисто-алевритовых породах 0,037–0,055), но пониженной нормативной щелочностью  $НКМ = (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$  (0,28–0,37 и 0,24–0,31 соответственно), что обычно связано со значительной примесью в породах кластики основных вулканитов.

Концентрации и характер распределения редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) в песчаных и глинисто-алевритовых породах кордонкинской свиты близки. В сумме содержания РЗЭ в них относительно невелики (в песчаниках 76–140 г/т, в глинисто-алевритовых породах 75–206 г/т). Породы характеризуются умеренно фракционированными спектрами распределения РЗЭ с невысокими отношениями легких лантаноидов к тяжелым ( $La_N/Yb_N$  в песчаниках 3,70–8,97, в глинисто-алевритовых породах 5,50–10,28), а также отсутствием либо слабо выраженной отрицательной европиевой аномалией ( $Eu/Eu^*$  в песчаниках 0,71–1,14, в глинистых породах 0,60–0,94) (рис. 3). По сравнению со средним постархейским глинистым сланцем (РААС) [9] по-

роды обеднены всеми элементами (от 1,1 до 2,1 раза) и лишь иногда некоторые из них находятся в равных либо несколько более высоких концентрациях.

Реконструкция палеогеодинамических обстановок формирования нижнесилурийских отложений кордонкинской свиты осуществлена при помощи серии широко известных дискриминантных диаграмм, построенных на основании актуалистического подхода, т.е. их сравнения с результатами изучения древних отложений и современных глубоководных осадков, формирование которых происходило в известных тектонических обстановках. При построении диаграмм использован ряд индикаторных оксидов, редких элементов и их соотношений, отражающих минерально-петрографический состав материнских пород источников питания, а также особенности накопления осадков в различных тектонических обстановках. На диаграммах, используемых для выяснения геодинамических обстановок формирования бассейнов осадконакопления, фигуративные точки песчаников кордонкинской свиты группируются (либо приближаются к ним) в полях бассейнов, сопряженных с внутриокеанической островной дугой, примером которой является Идзу-Бонинская дуга [10–12] (рис. 4, а–д). Судя по положению точек на диаграмме [13], это вероятно был ее преддуговой бассейн (рис. 4, е). Точки состава глинисто-алевритовых пород иногда смещаются в область окраинно-континентальных островных дуг, что, вероятно, связано с большим, по сравнению с песчаниками, содержанием глинистых минералов и меньшим – обломочных компонентов.

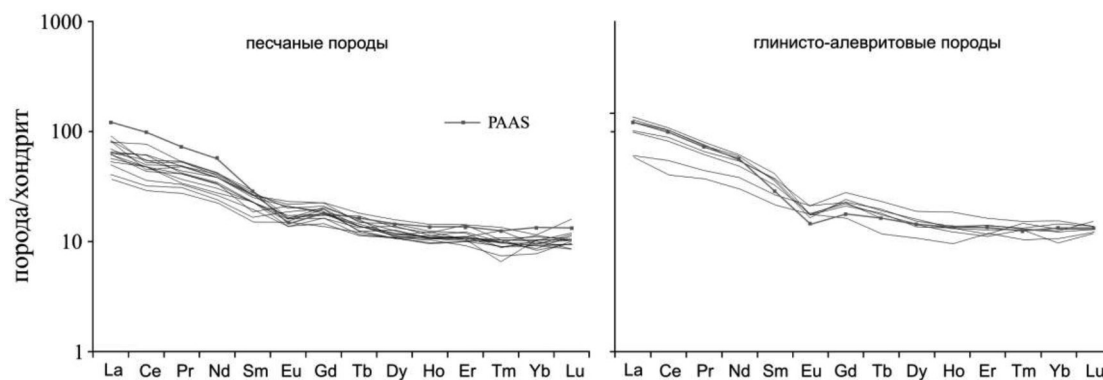


Рис. 3. Спектры распределения РЗЭ, нормированных по хондриту, в песчаниках и глинисто-алевритовых породах кордонкинской свиты и сопоставление их с РААС [9]



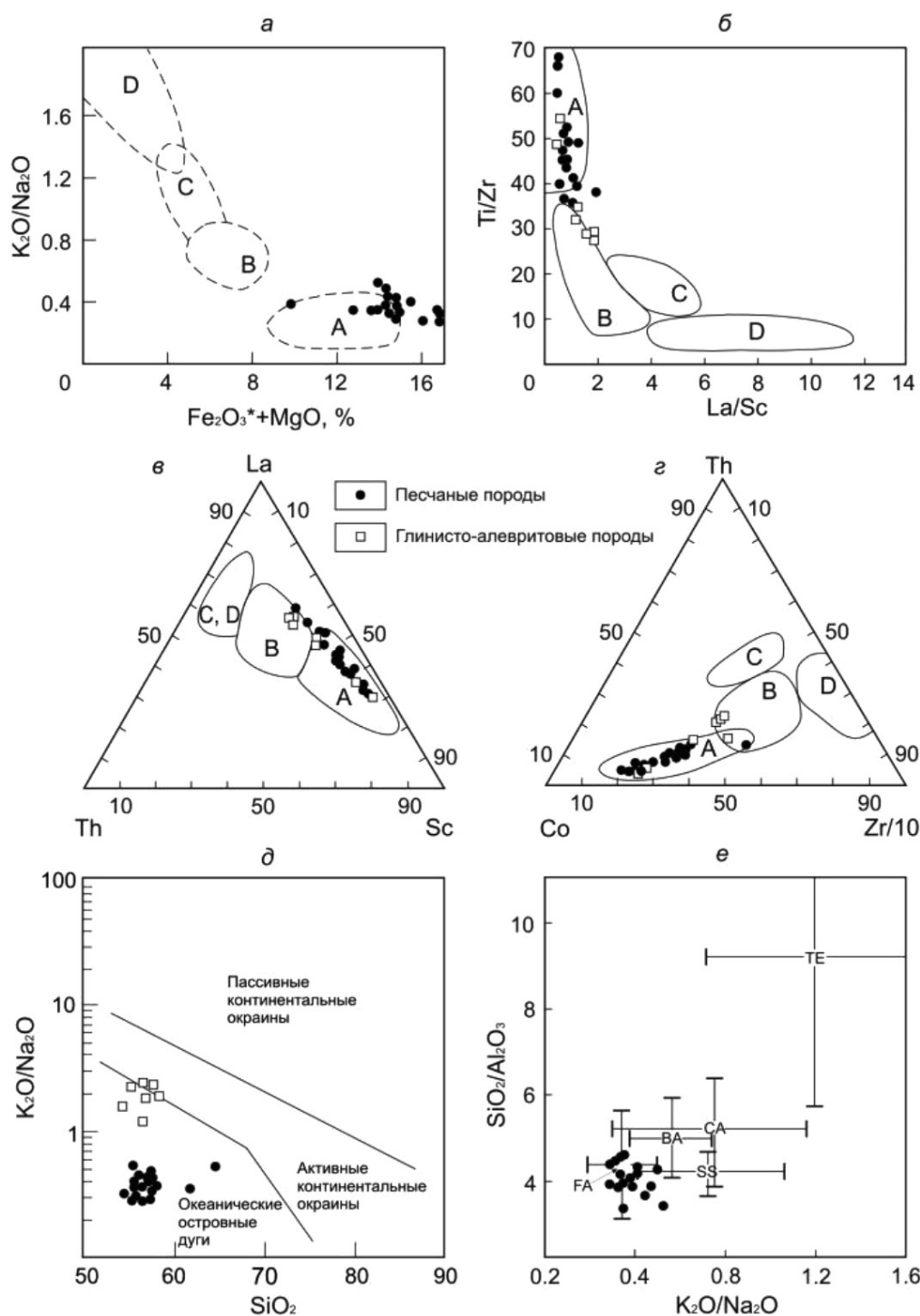


Рис. 4. Палеогеодинамическая интерпретация геохимического состава терригенных пород кордонкинской свиты. а–г – типы седиментационных бассейнов, связанных: А – с океаническими, В – с окраинно-континентальными островными дугами, С – с активными, D – с пассивными континентальными окраинами [10, 11]; д, е – типы бассейновых обстановок [12, 13]. Для е – бассейны: пассивных континентальных окраин (ТЕ); активных континентальных окраин, осложненных сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам (SS); сопряженных с окраинно-континентальными островными дугами (СА); с океаническими дугами (FA – преддуговые и ВА – задуговые бассейны)

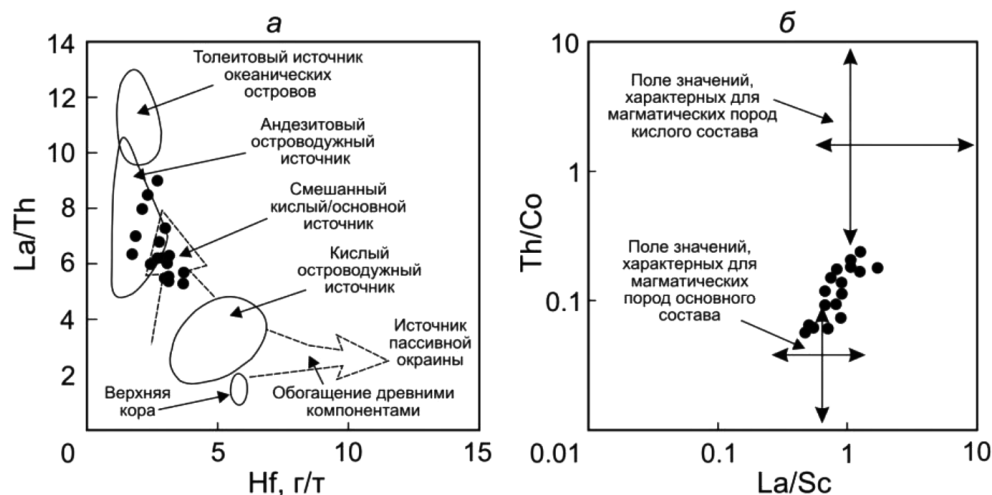


Рис. 5. Источники обломочного материала для терригенных пород кордонкинской свиты Лаоелин-Гродековского террейна [14, 15]

Изучение содержания и характера распределения редких и редкоземельных элементов в терригенных породах позволяет судить о типе и составе материнских пород областей питания. Относительно невысокие суммарные содержания во всех породах свиты РЗЭ, невысокие отношения легких элементов к тяжелым, а также отсутствие либо слабое проявление отрицательной Eu аномалии позволяет говорить об их формировании за счет эрозии основных и средних вулканитов. Источником питания, судя по расположению точек на диаграммах, используемых для распознавания состава питающих провинций (рис. 5) [14, 15], была сама океаническая островная дуга. Отложения формировались за счет разрушения основных и средних вулканических образований дуги, а также магматических и осадочных образований ее фундамента.

### Заключение

Для выяснения состава питающих провинций и геодинамического режима формирования нижнесилурийских отложений кордонкинской свиты Лаоелин-Гродековского террейна Приморья был изучен геохимический состав слагающих ее песчаных и глинисто-алевритовых пород. Полученные результаты позволяют говорить, что по геохимическим параметрам изученные породы являются петрогенными граувакками, образовавшимися в основном за счет механического разрушения материнских пород. Породы характеризуются низкой зрелостью, слабой литодинамиче-

ской переработкой материала источников питания, а также высокой скоростью его захоронения. Палеогеодинамическая интерпретация результатов исследования свидетельствует, что седиментация происходила в обстановке, соответствующей преддуговому бассейну океанической островной дуги. Областью питания была сама дуга, сложенная основными и средними вулканитами, а также магматическими и осадочными образованиями, входившими в состав ее фундамента.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ № 19-05-00037-а и № 19-05-00229-а.

### Список литературы / References

1. Летникова Е.Ф., Вещева С.В., Прошенкин А.И., Кузнецов А.Б. Неопротерозойские терригенные отложения Тувино-Монгольского массива: геохимическая корреляция, источники сноса, геодинамическая реконструкция // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 12. С. 2110–2121.  
Letnikova E.F., Proshenkin A.I., Veshcheva S.V., Kuznetsov A.B. Neoproterozoic terrigenous deposits of the Tuva-Mongolian massif: Geochemical correlation, source-lands, and geodynamic reconstruction. Russian Geology and Geophysics. 2011. V. 52. № 12. С. 1662–1671. DOI: 10.1016/j.rgg.2011.11.013.
2. Малиновский А.И. Палеогеодинамические обстановки формирования отложений Западно-Сахалинского террейна по геохимическим данным // Успехи современного естествознания. 2017. № 6. С. 83–89.  
Malinovsky A.I. Paleogeodynamic settings of the West Sakhalin terrain sediments formation based on geochemical data // Advances in current natural sciences. 2017. № 6. P. 83–89 (in Russian).
3. Маслов А.В., Подковыров В.Н., Мизенс Г.А., Ножкин А.Д., Фазлиахметов А.М., Малиновский А.И., Худолей А.К., Котова Л.Н., Купцова А.В., Гареев Э.З., Зайнуллин Р.И. Дискриминантные палеогеодинамические диаграммы для терригенных пород: опыт сопоставления // Геохимия. 2016. № 7. С. 579–595. DOI: 10.7868/S0016752516060030.

- Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Mizens G.A., Nozhkin A.D., Fazliakhmetov A.M., Malinovsky A.I., Khudoley A.K., Kotova L.N., Kuptsova A.V., Gareev E.Z., Zainullin R.I. Tectonic Setting Discrimination Diagrams for Terrigenous Rocks: a Comparison. *Geochem. International*. 2016. V. 54. № 7. P. 569–583. DOI: 10.1134/S0016702916060033.
4. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
- Geodynamics, Magmatism and Metallogeny of the Russian East / Ed. A.I. Khanchuk, Vladivostok: Dalnauka, 2006. Book 1. 572 p. (in Russian).
5. Karel Schulmann. The Central Asian Orogenic Belt: Geology, Evolution, Tectonics and Models. Ed. A. Kröner. Stuttgart: Borntraeger Science Publisher, 2015. 313 p. DOI: 10.1016/j.gsfc.2016.10.003.
6. Изосов Л.А., Смирнова О.Л., Емельянова Т.А. Кордонкинская свита Западного Приморья: тектоно-стратиграфический комплекс? // Региональные проблемы. 2016. Т. 19. № 1. С. 3–7.
- Izosov L.A., Smirnova O.L., Emelyanova T.A. The Kordonka Suite in Western Primorye: tectono-stratigraphic complex? // *Regional Problems*. 2016. V. 19. № 1. P. 3–7 (in Russian).
7. Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R., Sand and Sandstone. New York: Springer. 1972. 618 p.
8. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Geochemical indicators of lithogenesis. Syktyvkar: Geoprint, 2011. 742 p. (in Russian).
9. Taylor S.R., McLennan S.M. Planetary crusts: Their composition, origin and evolution. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 378 p.
10. Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical compositions of sandstones. *J. Geol.* 1983. V. 91. № 6. P. 611–627.
11. Bhatia M.R., Crook A.W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1986. V. 92. № 2. P. 181–193.
12. 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. *J. Geol.* 1986. V. 94. № 5. P. 635–650.
13. Potter P.E., Maynard J.B., Pryor W.A. Sedimentology of shale: study guide and reference source. New York: Springer-Verlag. 2012. 303 p.
14. Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions. And metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chem. Geol.* 2002. V. 191. № 4. P. 305–327. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00133-X.
15. Floyd P.A., Leveridge B.E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones. *J. Geol. Soc. London*. 1987. V. 144. P. 531–542. DOI: 10.1144/gsjgs.144.4.0531.