

УДК 552.513:552.143:551.242.22(571.63)

ОСОБЕННОСТИ ОБСТАНОВОК ФОРМИРОВАНИЯ ПАЛЕОЗОЙСКИХ И РАННЕМЕЗОЗОЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЮГО-ЗАПАДНОГО ПРИМОРЬЯ: РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ВЕЩЕСТВЕННОГО СОСТАВА ПЕСЧАНЫХ ПОРОД**Малиновский А.И.***Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, e-mail: malinovsky@fegi.ru*

В статье рассматриваются результаты изучения вещественного состава песчаных пород из палеозойских-раннемезозойских отложений Лаоелин-Гродековского террейна (Юго-Запад Приморья). Задачей исследования было всестороннее изучение вещественного состава песчаных пород с целью дальнейшей палеогеодинамической реконструкции обстановок накопления отложений террейна, а также определение типов и породных составов их источников питания. Было установлено, что песчаные породы изученных свит существенно различаются по вещественному составу и, соответственно, формировались в различных палеогеодинамических обстановках. Песчаники раннесилурийской кордонкинской свиты по петрографическим и геохимическим параметрам относятся к грауваккам, в которых доминируют тяжелые минералы, характерные для островодужных вулканитов. Интерпретация полученных данных свидетельствует о накоплении пород в бассейне, сопряженном с внутриокеанической островной дугой, для которого источником питания служили основные и средние вулканические породы самой дуги, а также осадочные и магматические породы ее основания. Минералогические и геохимические свойства ранне-среднепермской рещетниковской свиты свидетельствуют об их принадлежности к аркозам, в которых доминируют минералы гранитно-метаморфической ассоциации. Отложения свиты накапливались в бассейнах, расположенных на пассивной континентальной окраине. Источниками вещества были участвовавшие в строении этой окраины кратоны и краевые части рифтов, сложенные гранитоидами, метаморфическими и осадочными породами. Песчаники поздне триасовой тальминской свиты относятся к грауваккам, особенности состава которых позволяют предполагать их формирование на активной континентальной окраине в бассейнах рифтогенного происхождения. Обломочный материал поступал с краевых частей рифтов, сложенных кислыми и средними изверженными и метаморфическими породами. Полученные результаты позволяют рассматривать Лаоелин-Гродековский террейн как аккреционную призму, состоящую из палеозойских и раннемезозойских отложений, формировавшихся в различных геодинамических обстановках.

Ключевые слова: Лаоелин-Гродековский террейн, песчаники, вещественный состав, геодинамические обстановки

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 SANDY ROCKS**Malinovskiy A.I.***Far Eastern Geological Institute, Vladivostok, e-mail: malinovsky@fegi.ru*

The article considers the results of studying the material composition of sandy rocks from the Paleozoic-Early Mesozoic deposits of the Laeoling-Grodekovo terrane (South-West of Primorye). The task of the study was a comprehensive study of the material composition of sandy rocks in order to further paleogeodynamic reconstruction of the conditions of accumulation of terrane deposits, as well as to determine the types and rock compositions of their power sources. It was found that the sandy rocks of the studied formations differ significantly in material composition and, accordingly, were formed in different paleogeodynamic settings. According to petrographic and geochemical parameters, the sandstones of the Early Silurian Kordonka formation belong to graywackes, which are dominated by heavy minerals typical of island-arc volcanic rocks. The Interpretation of the data obtained indicates the accumulation of rocks in the basin associated with the intra-oceanic island arc, for which the basic and medium volcanic rocks of the arc itself, as well as sedimentary and igneous rocks of its base, served as a source area. The mineralogical and geochemical properties of the rocks of the Early-Middle Permian Reshetnikovka formation indicate their belonging to arkoses in which the minerals of the granite-metamorphic association dominate. Deposits of the formation accumulated in basins located on the passive continental margin. The sources of matter were the cratons and marginal parts of the rifts that participated in the structure of this margin, composed of granitoids, metamorphic and sedimentary rocks. Sandstones of the Late Triassic Talmi formation belong to the graywackes, especially the composition of which suggests their formation in an active continental margin in the basins of rift origin. Clastic material came from the marginal parts of rifts, composed of acidic and medium igneous and metamorphic rocks. The results obtained allow us to consider the Laeoling-Grodekovo terrane as an accretionary, consisting of Paleozoic and Early Mesozoic sediments formed in various geodynamic settings.

Keywords: Laeoling-Grodekovo terrane, sandstones, material composition, geodynamic settings

Комплексное применение методов генетическая интерпретация позволяют
детального изучения вещественного со- решить одну из насущных задач геоло-
става терригенных пород, а также по- гии Дальнего Востока России: выяснение
строенная на современных методиках его палеогеодинамических обстановок нако-

пления разновозрастных отложений в бассейнах, фрагменты которых устанавливаются в орогенных поясах, протягивающихся вдоль восточной окраины Азиатского континента. Одним из таких фрагментов, расположенным в юго-западной части Приморья, является Лаоелин-Гродековский террейн, в строении которого участвуют нижнесилурийские, ниже-среднепермские и верхнетриасовые отложения. Литологическая изученность терригенных пород, несмотря на продолжительную историю геолого-съёмочных и тематических исследований, остается низкой, а существующие представления об условиях их формирования значительно разнятся и часто не обоснованы. Цель исследования – на основании изучения и интерпретации вещественного состава песчаных пород террейна восстановить обстановки и источники питания его бассейнов седиментации.

Материалы и методы исследования

Исследования основываются на результатах комплексного изучения вещественного состава песчаных пород из палеозойских и раннемезозойских отложений Лаоелин-Гродековского террейна. Образцы и пробы для исследований были отобраны из береговых обнажений рек, выемок вдоль дорог и в карьерах. Для исследований выбраны песчаники, несущие максимальную информацию для расшифровки геодинамических обстановок накопления отложений. Петрографический и минеральный состав пород изучался с использованием поляризационного микроскопа AxioPlan 2 imaging. Минералы тяжелой фракции выделялись и определялись традиционными методами. Химический состав пород был изучен на спектрометре iCAP 6500 Duo методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой. Содержания редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) устанавливались на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500с с использованием метода плазменной спектроскопии (ICP-MS). Исследования выполнены в лабораториях Аналитического центра (ЦКП) ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток), аналитики Е.В. Волкова, П.Д. Гасанова, Г.А. Горбач, Е.В. Еловский, В.Н. Каминская, Е.А. Ткалина, Н.В. Хуркало.

Результаты исследования и их обсуждение

Лаоелин-Гродековский террейн представляет собой одну из важнейших тек-

тонических структур восточной окраины Азиатского континента, образуя западное обрамление мезозойского Сихотэ-Алинского орогенного пояса [1–3]. Террейн находится на юго-западе Приморья и представляет собой узкий (до 80 км) блок, протягивающийся на 300 км вдоль границы с Китаем и уходящий на его территорию (рис. 1). В строении террейна участвуют сложно дислоцированные силурийские, пермские и триасовые терригенные и вулканогенные образования, прорванные позднепермскими и раннемезозойскими гранитоидами [2].

Изученные отложения имеют состав, представленный на рис. 1. Раннесилурийская кордонкинская свита (2100 м) состоит из переслаивающихся разнозернистых песчаников, алевролитов и аргиллитов, сланцев, туфов, базальтов, андезитов, редко конгломератов и кремнисто-глинистых пород [2]. Ранне-среднепермская решетниковская свита (до 2100 м) сложена в основном терригенными породами: песчаниками, алевролитами, аргиллитами, конгломератами и гравелитами. Позднетриасовая тальминская свита (500–800 м) состоит в основном из вулканических пород: дацитов, риолитов, андезитов, кластолав, туфов и лишь в ее основании отмечаются пачки и линзы песчаников, конгломератов и гравелитов.

Для выяснения обстановок формирования и определения источников питания отложений террейна, в песчаниках были изучены породообразующие компоненты, тяжелые обломочные минералы, а также их геохимический состав. Результаты представлены на рис. 2.

Песчаники кордонкинской свиты от мелко- до крупнозернистых, сортировка и окатанность обломочного материала слабая либо средняя. Обломочная часть представлена кварцем (13–22%), полевыми шпатами (32–46%), обломками пород (34–49%): вулканитами, терригенными породами, кремнями, сланцами, кварцитами. Песчаники решетниковской свиты обычно от средне- до крупнозернистых, реже мелкозернистые. Обломочный материал слабо либо средне окатан и отсортирован. В породах доминирует кварц (40–48%), меньше полевых шпатов (25–40%) и обломков пород (15–45%): метаморфических, кислых эффузивных и интрузивных. Тальминские песчаники средне- и крупнозернистые, со слабой либо средней сортировкой и окатанностью материала. Породы содержат 22–27% кварца, 24–35% полевых шпатов

и 41–54% обломков пород: средних и кислых эффузивов, гранитоидов, реже обломочных, кремнистых и метаморфических пород. В целом, по классификации породообразующих компонентов [4], кордонкинские и тальминские песчаники являются кварцево-полевошпатовыми граувакками, а решетниковские – полевошпатовыми аркозами и полевошпатово-кварцевыми граувакками (рис. 2, а).

Известно, что для различных геодинамических обстановок свойственны определенные ассоциации тяжелых минералов [7, 8]. На рис. 2, б, показаны средние содержания и характер распределения тяжелых минералов в изученных свитах. В породах кордонкинской свиты преобладает фемическая ассоциация тяжелых минералов (в сумме в среднем 92%), происходящая из основных и ультраосновных магматических пород: хромит, магнетит, пироксен, роговая

обманка, эпидот, а также ильменит и лейкоксен, которые, впрочем, могут встречаться и в гранитоидах. В подчиненную сиалическую ассоциацию (в среднем до 8%) входят минералы гранитоидов и метаморфических пород: циркон, гранат, турмалин, сфен, апатит, рутил и анатаз. В решетниковских песчаниках уже преобладает (в среднем 75%) сиалическая ассоциация, в которой основной минерал циркон (в отдельных пробах до 97%). Вместе с тем в породах содержится и небольшое количество хромита (в среднем 9%), указывающего на присутствие в источниках сноса основных и ультраосновных магматитов. В тальминских песчаниках также преобладает сиалическая ассоциация (в среднем 86%). Но, в отличие от решетниковских, здесь доминирует гранат (в среднем 64%), а вот циркона не более 25%. Фемическая ассоциация находится в резко подчиненном количестве (до 14%).

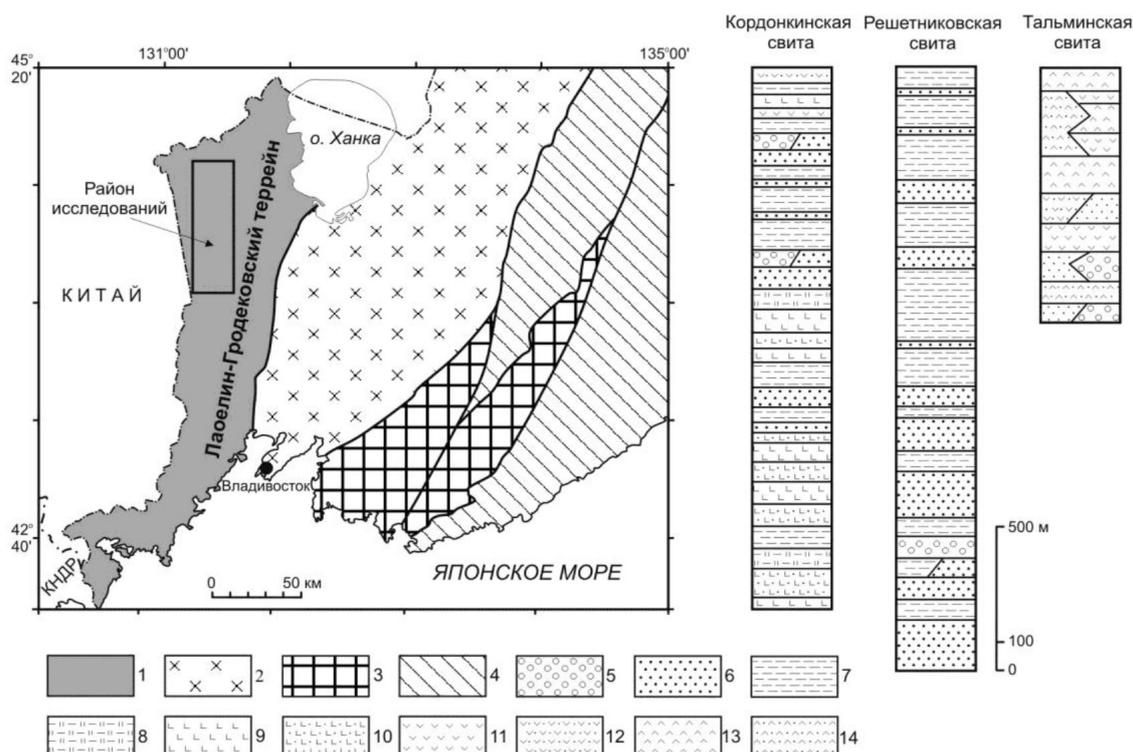


Рис. 1. Схематическая геологическая карта Юго-Западного Приморья [2] и литолого-стратиграфические колонки изученных свит. Для карты: 1 – Лаолин-Гродековский террейн; 2 – террейны раннепалеозойского Бурей-Ханкайского орогенного пояса; 3 – террейны раннепалеозойской активной окраины, 4 – террейны позднемезозойского Сихотэ-Алинского орогенного пояса. Для колонок: 5 – конгломераты и гравелиты; 6 – песчаники; 7 – алевроаргиллиты; 8 – кремнисто-глинистые породы; 9 – базальты; 10 – туфы основного состава; 11 – андезиты; 12 – туфы среднего состава; 13 – дациты и риолиты; 14 – туфы кислого состава

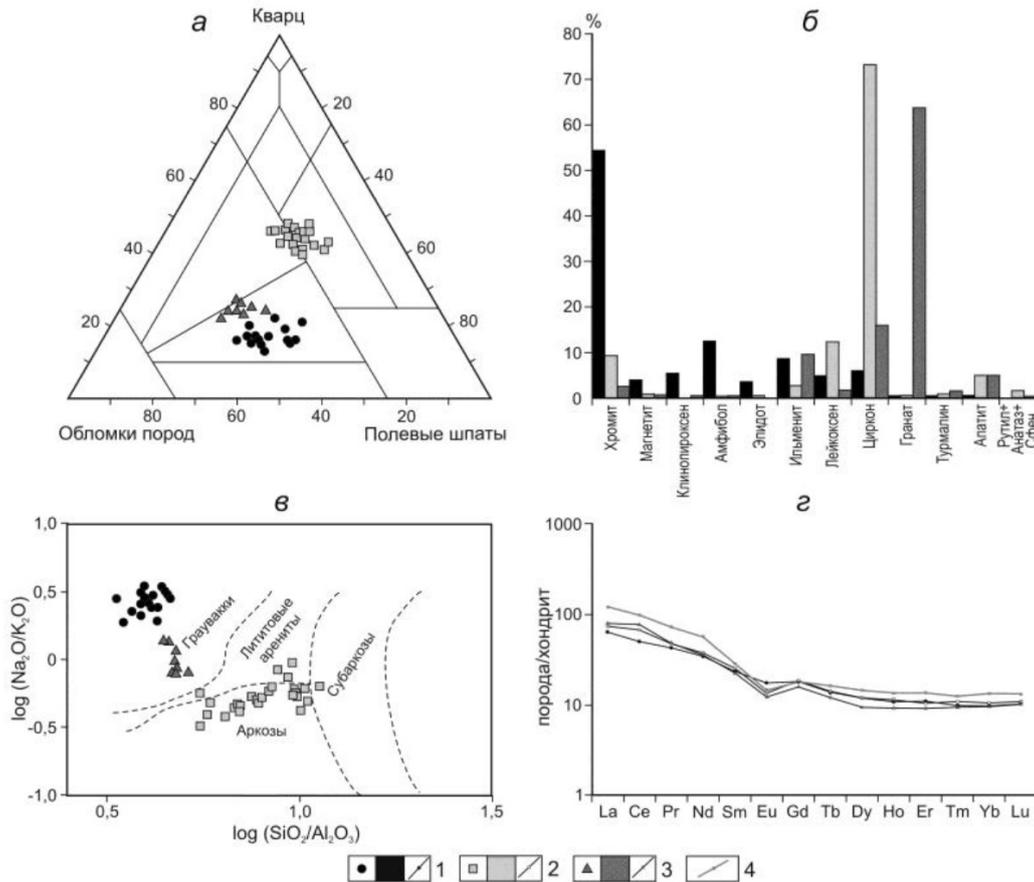


Рис. 2. Минералого-геохимический состав песчаников изученных свит Лаолин-Гродековского террейна; а – классификационная диаграмма по пороодообразующим компонентам [4]; б – состав и характер распределения тяжелых обломочных минералов; в – классификационная диаграмма по химическому составу [5]; г – спектры распределения РЗЭ и их сопоставление с РААС [6].
1–3 – свиты: 1 – кордонкинская, 2 – решетниковская, 3 – тальминская; 4 – РААС

По химическому составу песчаники террейна существенно различаются. Геохимические особенности пород кордонкинской свиты достаточно подробно освещены в предыдущей публикации [2]. Отметим лишь низкие содержания в них SiO_2 (54,50–64,51%), повышенные $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (6,63–9,26%), MgO (2,36–7,83%), TiO_2 (0,61–1,19%) и Al_2O_3 (12,22–16,65%), а также обычные для граувакк преобладания Na_2O над K_2O . Решетниковские песчаники резко отличаются от кордонкинских, что выражается в высоких содержаниях SiO_2 (75,22–86,55%), пониженных TiO_2 (0,15–0,68%), Al_2O_3 (6,71–13,72%) и $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (0,29–2,60%), а также свойственным уже аркозам преобладанием K_2O над Na_2O . Песчаники тальминской свиты по химии занимают промежуточное положение между породами кордонкинской и решетниковской свит. Содержание оксидов в них изменяет-

ся незначительно: SiO_2 (66,90%–71,66%), TiO_2 (0,42–0,92%), Al_2O_3 (13,84–15,02%), $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (2,68–4,67%), MgO (0,73–1,26%), при этом отношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} \leq 1$, что приближает их к грауваккам. На классификационной диаграмме (рис. 2, в) [5] песчаники кордонкинской и тальминской свит попадают в поле граувакк, а решетниковской – аркоз и частично лититовых аренитов и субаркоз.

В песчаных породах изученных свит суммарные концентрации РЗЭ относительно невелики: в кордонкинской свите 55–183 г/т, решетниковской 97–179 г/т и тальминской 97–148 г/т. Спектры распределения РЗЭ (рис. 2, г) в песчаниках всех свит характеризуются умеренной степенью фракционирования при невысоком отношении легких лантаноидов к тяжелым (La_N/Yb_N в кордонкинской свите 3,58–8,97, в решетниковской 4,81–11,29, в тальминской 6,05–8,10). Вместе

с тем в кордонкинской свите эти спектры характеризуются отсутствием либо слабо проявленной отрицательной европиевой аномалией (Eu/Eu^* 0,71–1,14) [2], в то время как в решетниковской и тальминской она достаточно выражена (0,48–0,79 и 0,55–0,69 соответственно). Сопоставление со средним постаршеим глинистым сланцем (РААС) [6] показывает, что во всех свитах породы обеднены подавляющим большинством элементов (от 1,1 до 2,4 раза).

Палеогеодинамическая интерпретация полученных минералого-геохимических данных осуществлена с использованием классических дискриминантных диаграмм, разработанных при сравнении результатов

исследования древних обломочных пород и современных отложений, накапливавшихся в известных геодинамических обстановках [2, 7, 8].

Положение точек состава песчаников на диаграммах, используемых для реконструкции геотектонических типов источников питания (рис. 3, а, б) [8, 9], свидетельствует, что для отложений кордонкинской свиты областью питания была переходная, частично эродированная островная дуга, при этом отложения формировались как за счет разрушения основных-средних вулканитов самой дуги, так и магматических и обогащенных кварцем осадочных пород ее фундамента (рис. 3, в, г) [10, 11].

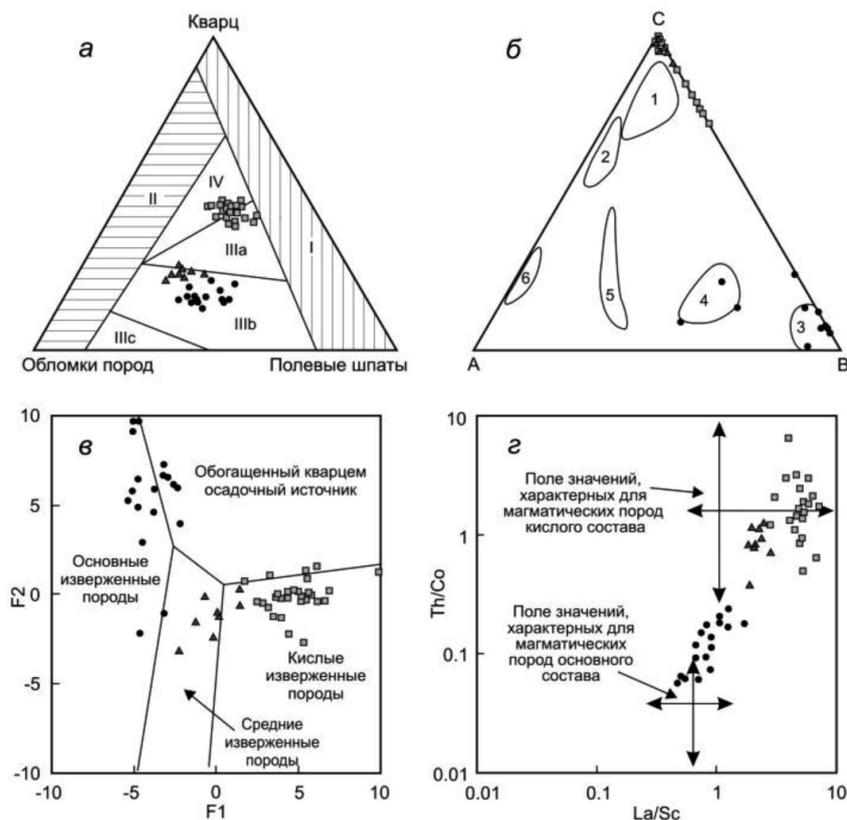


Рис. 3. Источники питания для отложений изученных свит террейна: а – по породообразующим компонентам [9]. Типы областей питания: I – устойчивые кратоны и блоки основания, II – ремобилизованные орогены, III – магматические дуги (IIIa – расчлененные, глубоко эродированные, IIIb – переходные, IIIc – нерасчлененные, слабо эродированные), IV – смешанные источники питания; б – по тяжелым обломочным минералам [8]. А – амфиболы; В – клино-, ортопироксены, оливины и хромиты; С – другие прозрачные минералы. Типы питающих провинций: 1 – континентальные блоки (кратоны и краевые части рифтов); 2 – коллизионные орогены; 3–6 – магматические дуги: 3 – незэродированные, 4 – переходные слабоэродированные, 5 – переходные эродированные, 6 – сильноэродированные; в–г – вероятные составы материнских пород по геохимическим данным на диаграммах: в – F1–F2 [10]: $F1 = 30,638 \cdot TiO_2 / Al_2O_3 - 12,541 \cdot Fe_2O_3^* / Al_2O_3 + 7,329 \cdot MgO / Al_2O_3 + 12,031 \cdot Na_2O / Al_2O_3 + 35,402 \cdot K_2O / Al_2O_3 - 6,382$; $F2 = 56,5 \cdot TiO_2 / Al_2O_3 - 10,879 \cdot Fe_2O_3^* / Al_2O_3 + 30,875 \cdot MgO / Al_2O_3 - 5,404 \cdot Na_2O / Al_2O_3 + 11,112 \cdot K_2O / Al_2O_3 - 3,89$; г – $La/Sc - Th/Co$ [11]. Условные обозначения см. на рис. 2

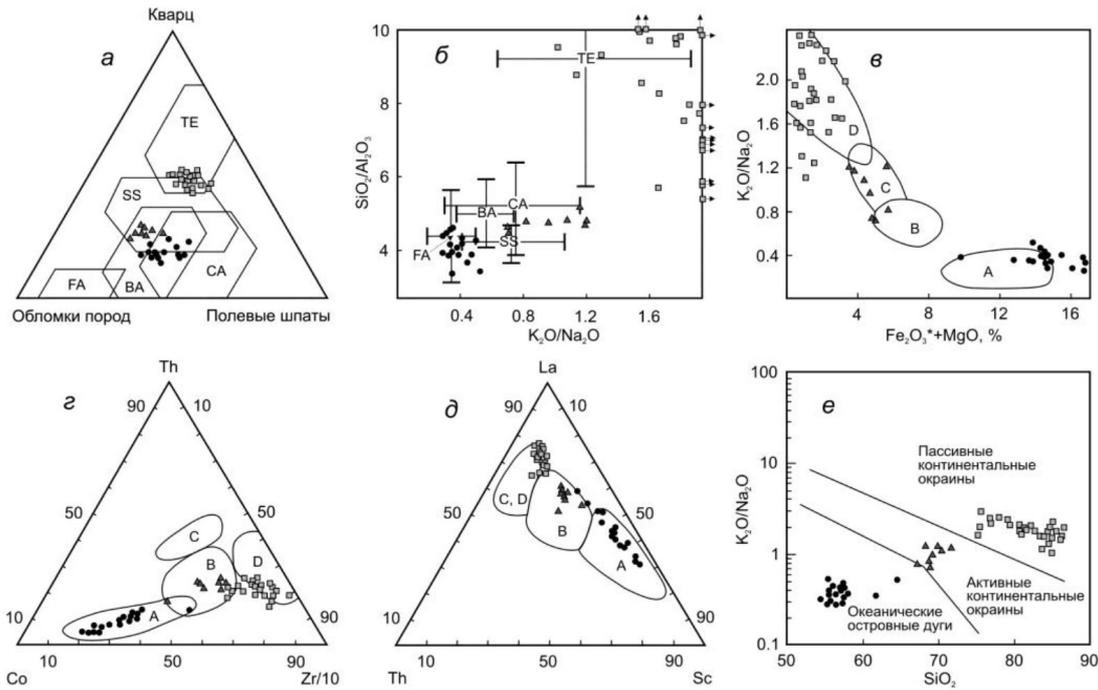


Рис. 4. Палеогеодинамические обстановки формирования отложений изученных свит: а, б – типы бассейновых обстановок [12]: а – по порообразующим компонентам песчаников, б – по их химическому составу. Бассейны: пассивных (ТЕ) и активных континентальных окраин, осложненных сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам (SS); сопряженные: с окраинно-континентальной магматической дугой (СА), с океанической вулканической дугой (FA – преддуговые и ВА – задуговые бассейны), в-д – типы бассейнов по геохимическим данным [13, 14], сопряженные: А – с океаническими, В – с континентальными островными дугами, С – с активными, D – с пассивными континентальными окраинами. $Fe_2O_3^*$ – общее железо, е – бассейны различных тектонических обстановок [15]. Условные обозначения см. на рис. 2

Реконструкция типов источников питания для решетниковской свиты показывает, что на осадконакопление в основном влияли размывавшиеся блоки пассивной континентальной окраины: кратоны и краевые части рифтов, сложенные кислыми изверженными, метаморфическими и обогащенными кварцем осадочными породами (рис. 3). Интерпретация состава песчаников тальминской свиты неоднозначна. Источниками ее питания могли быть как переходная, частично эродированная энсиалическая островная дуга, так и краевые части рифтов, связанных с активной континентальной окраиной. Размывались кислые и средние изверженные породы, а также породы низких стадий метаморфизма (рис. 3).

Существование определенных типов и породного состава источников питания подразумевает и конкретные геодинамические обстановки образования связанных с ними осадочных бассейнов [2, 7]. Положение точек состава песчаников кордон-

кинской свиты на диаграммах, предложенных рядом авторов [12–14] для разделения песчаников из бассейнов различных геодинамических обстановок (рис. 4), позволяет говорить об их формировании в бассейне, сопряженном с внутриокеанической островной дугой [2]. Интерпретация состава решетниковских песчаников (рис. 4) свидетельствует об их накоплении в бассейнах (внутри- и межконтинентальных рифтах и авлакогенах), связанных с пассивной континентальной окраиной. Интерпретация состава тальминских песчаников неоднозначна. На части диаграмм (рис. 4, г, д) их точки попадают в поля бассейнов окраинно-континентальных дуг, но на большинстве же других (рис. 4, а, б, в, е) они ложатся в поля бассейнов активных континентальных окраин, в том числе осложненных дислокациями по трансформным разломам. Исходя из этого, а также учитывая вероятную принадлежность областей сноса к краевым частям рифтов, можно предположить нако-

пление отложений на активной континентальной окраине в бассейнах рифтогенного происхождения.

Заключение

Рассмотрен вещественный состав палеозойских и раннемезозойских песчаных пород Лаоелин-Гродековского террейна Юго-Западного Приморья. Изучение и интерпретация полученных данных свидетельствуют, что породы существенно отличаются по составу и формировались в различных геодинамических обстановках. Формирование отложений кордонкинской свиты происходило в бассейне, связанном с внутриокеанической островной дугой. Источниками материала были основные и средние вулканы дуги, а также магматические и осадочные породы ее основания. Отложения решетниковской свиты накапливались в бассейнах пассивной континентальной окраины. Источниками питания были входящие в состав этой окраины кратоны и краевые части рифтов, сложенные кислыми изверженными, метаморфическими и осадочными породами. Тальминская свита формировалась на активной континентальной окраине в бассейнах рифтогенного происхождения. Источниками кластики выступали краевые части этих рифтов, сложенные кислыми и средними изверженными породами и метаморфитами. В целом полученные результаты позволяют рассматривать Лаоелин-Гродековский террейн как аккреционную призму, состоящую из палеозойских и раннемезозойских отложений, формировавшихся в различных геодинамических обстановках.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 19-05-00037-а.

Список литературы / References

1. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. А.И. Ханчука. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2006. 572 с.
Geodynamics, Magmatism and Metallogeny of the Russian / Pod red. A.I. Khanchuk. Kn. 1. Vladivostok: Dal'nauka, 2006. 572 p. (in Russian).
2. Малиновский А.И., Голозубов В.В., Касаткин С.А. Геохимия, источники питания и геодинамические обстанов-

ки накопления нижнесилурийских терригенных отложений Лаоелин-Гродековского террейна (Приморье) // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 121–127. DOI: 10.17513/use.37250.

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 Laoling-Grodekovo terrane (Primorye) // Advancer in current natural sciences. 2019. № 11. P. 121–127 (in Russian).

3. The Central Asian Orogenic Belt: Geology, Evolution, Tectonics and Models. Ed. A. Kröner. Stuttgart: Borntraeger Science Publisher, 2015. 313 p.

4. Шутов В.Д. Классификация песчаников // Литология и полезные ископаемые. 1967. № 5. С. 86–102.

Shutov V.D. Classification of Sandstones // Litologiya i poleznyye iskopayemye. 1967. № 5. P. 86–102 (in Russian).

5. Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R., Sand and Sandstone. New York: Springer, 1972. 618 p.

6. Taylor S.R., McLennan S.M. Planetary crusts: Their composition, origin and evolution. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 378 p.

7. Малиновский А.И. Источники питания и обстановки формирования кайнозойских отложений Западно-Сахалинского террейна по результатам изучения тяжелых обломочных минералов // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2019. № 3 (43). С. 5–25. DOI: 10.31431/1816-5524-2019-3-43-5-25.

Malinovskiy A.I. Source areas and geodynamic settings of Cenozoic deposits of the West Sakhalin terrane by the results of studying of heavy detrital minerals // Vestnik KRAUNTs. Nauki o Zemle. 2019. № 3 (43). P. 5–25 (in Russian).

8. Garzanti E., Ando S. Plate tectonics and heavy mineral suites of modern sands. Heavy minerals in use. Developments in sedimentology. 2007. Amsterdam: Elsevier, 2007. V. 58. P. 741–764. DOI: 10.1016/S0070-4571(07)58029-5.

9. Dickinson W.R., Suczek C.A. Plate tectonics and sandstone composition. Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 1979. V. 63. № 12. P. 2164–2182.

10. Roser B.P., Korsch R.J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. Chem. Geol. 1988. V. 67. P. 119–139. DOI: 10.1016/0009-2541(88)90010-1.

11. 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. P. 305–327. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00133-X.

12. Potter P.E., Maynard J.B., Pryor W.A. Sedimentology of shale: study guide and reference source. New York: Springer-Verlag, 2012. 303 p.

13. Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical compositions of sandstones. J. Geol. 1983. V. 91. № 6. P. 611–627. DOI: 10.1086/628815.

14. Bhatia M.R., Crook K.A.W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins. Contrib. Mineral. Petrol. 1986. V. 92. P. 181–193. DOI: 10.1007/BF00375292.

15. Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. J. Geol. 1986. V. 94. № 5. P. 635–650. DOI: 10.1086/629071.