

А.И. МАЛИНОВСКИЙ

Палеозойские и раннемезозойские терригенные отложения юго-западного Приморья: вещественный состав и происхождение

Рассматриваются результаты изучения вещественного состава палеозойских–раннемезозойских терригенных отложений Лаоелин-Гродековского террейна (юго-западное Приморье). Цель исследования – палеогеодинамическая реконструкция обстановок формирования отложений изученных свит, а также определение типов и породных составов их источников питания. Установлено, что отложения свит существенно различаются по вещественному составу, следовательно, они формировались в различных палеогеодинамических обстановках. Отложения кордонкинской свиты накапливались в бассейне, связанном с океанической островной дугой, при этом областью их питания была сама дуга, сложенная основными и средними вулканитами, а также магматическими и осадочными образованиями, входившими в состав ее фундамента. Накопление рещетниковской свиты происходило в бассейнах, расположенных на пассивной континентальной окраине. Источниками вещества служили участвовавшие в строении этой окраины кратоны и краевые части рифтов, сложенные гранитоидами, метаморфическими и осадочными породами. Тальминская свита формировалась на активной континентальной окраине в бассейнах рифтогенного происхождения. Источниками кластического материала были краевые части этих рифтов, сложенные кислыми и средними изверженными, а также метаморфическими породами. Полученные результаты позволяют рассматривать Лаоелин-Гродековский терреин как аккреционную призму, сложенную силурийскими, пермскими и триасовыми образованиями, сформировавшимися в различных палеогеодинамических обстановках.

Ключевые слова: юго-западное Приморье, Лаоелин-Гродековский терреин, терригенные породы, вещественный состав, обстановки формирования.

Paleozoic and Early Mesozoic terrigenous deposits of the South-West Primorye: material composition and origin. A.I. MALINOVSKY (Far East Geological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

Results of material composition study of Paleozoic–Early Mesozoic terrigenous deposits of Laoeling-Grodekovo terrane (South-West Primorye) are collected. The purpose of the study was to reconstruct paleogeodynamic setting of deposits of studied formations, as well as to determine the types and rock compositions of their power sources. It was established that the deposits differ significantly in their material composition and, accordingly, were formed in different paleogeodynamic settings. Deposits of the Kordonka formation accumulated in the basin associated with the oceanic island arc, while the source area was the arc itself, composed of basic and intermediate volcanic rocks, as well as igneous and sedimentary formations that were part of its foundation. The accumulation of the Reshetnikovka formation took place in basin located on the passive continental margin. The sources of the matter were the cratons and marginal parts of rifts participating in the structure of this margin, composed of granitoids, metamorphic, and sedimentary rocks. The accumulation of the Tal'mi formation took place on the active continental margin in the basins of riftogenic origin. The sources of the clastic material were the marginal parts of these rifts, composed of acidic and intermediate igneous Laoeling-Grodekovo terrane as an accretionary prism formed by Silurian, Permian and Triassic deposits, which were formed in various paleogeodynamic settings.

Key words: South-West Primorye, Laoeling-Grodekovo terrane, terrigenous rocks, material composition, formation settings.

МАЛИНОВСКИЙ Александр Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник (Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток). E-mail: malinovsky@fegi.ru

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-05-00037).

Введение

Выяснение палеогеографических и палеогеодинамических обстановок формирования осадочных бассейнов, фрагменты которых устанавливаются в террейнах древних орогенных поясов, расположенных на восточной окраине Азиатского континента, является одной из важнейших задач современной геологии. Решение этой проблемы невозможно без детального изучения вещественного состава терригенных пород и его достоверной генетической интерпретации, построенной на современных методиках. Проведенными в последние десятилетия исследованиями древних терригенных пород и современных морских осадков была установлена тесная связь между их вещественным составом и геодинамическими обстановками формирования бассейнов осадконакопления, а также типом и составом материнских пород областей питания [5–7, 14, 15, 17–19, 21, 25, 26 и др.].

В основу данного исследования положен оригинальный материал, полученный в результате изучения вещественного состава терригенных пород из раннесилурийских, ранне-среднепермских и позднетриасовых отложений, развитых в юго-западной части Приморья и входящих в состав палеозойско-раннемезозойского Лаоелин-Гродековского террейна. Следует отметить, что рассматриваемые отложения в этой части Приморья обнажаются лишь фрагментарно, а их литологическая изученность, несмотря на более чем вековую историю исследований, из-за плохой обнаженности и сложного строения толщ, остается крайне слабой. Проводились лишь отдельные литолого-фациальные исследования, в результате которых делались довольно общие палеогеографические реконструкции [1, 3, 4]. Вещественный же состав терригенных пород практически не изучен. В настоящее время не существует каких-либо устоявшихся представлений о геодинамической природе и источниках питания отложений террейна [2, 3, 10]. Имеющиеся построения основаны на серии предположений, носят общий характер и требуют фактических обоснований.

Цель исследования – изучение особенностей вещественного состава терригенных пород террейна и на основании его интерпретации восстановление геодинамической природы бассейнов седиментации, а также определение основных источников питания.

Основные черты геологического строения

Лаоелин-Гродековский террейн является одной из главнейших тектонических структур на восточной окраине Евразийского континента. Совместно с раннепалеозойскими террейнами Бурей-Ханкайского орогенного пояса он составляет западное обрамление позднемезозойского Сихотэ-Алинь-Северо-Сахалинского орогенного пояса [2]. Террейн находится в юго-западной части Приморского края и образует узкий (шириной до 80 км) блок, вытянутый на 300 км вдоль границы с Китаем и частично располагающийся на его территории (рис. 1). Террейн образован мозаикой разновозрастных блоков, сложенных нижнесилурийскими, пермскими и триасовыми терригенными и вулканогенными образованиями, общая мощность которых достигает 5000 м. Породы сложно дислоцированы, разбиты многочисленными разрывными нарушениями и прорваны гранитоидами позднепермского и раннемезозойского возраста.

Изученные нами отложения северной части террейна имеют следующее строение. Раннесилурийская кордонкинская свита обнажается в виде линзовидного тектонического блока, вытянутого в меридиональном направлении на 35 км при ширине до 6 км. Нижняя часть свиты (рис. 1) сложена базальтами, андезитами, туфами и туффитами основного состава, редко встречаются алевролиты, аргиллиты, кремнисто-глинистые породы. В верхней части преобладают песчаники, алевролиты, аргиллиты, сланцы, иногда присутствуют линзовидные прослои гравелитов и конгломератов, а также горизонты кремнисто-глинистых пород, базальтов, андезитов и их туфов. Общая мощность отложений свиты составляет 2000 м. Ранне-среднепермская решетниковская свита наиболее широко развита

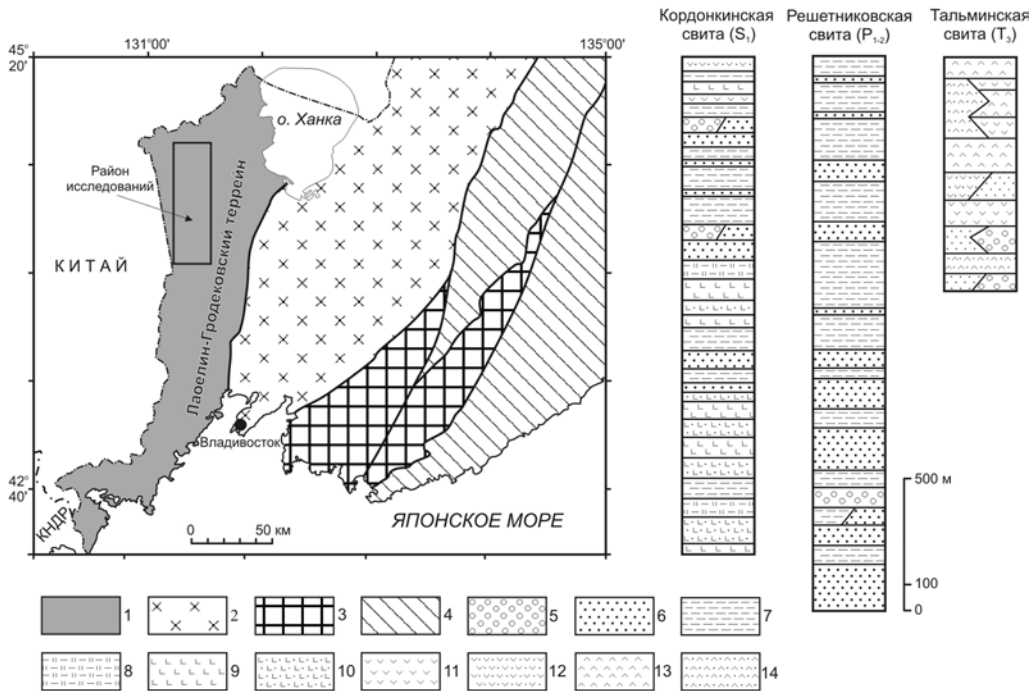


Рис. 1. Схема расположения Лаоелин-Гродековского террейна в геологических структурах юго-западного Приморья, а также литолого-стратиграфические колонки отложений изученных свит.

Для схемы: 1 – Лаоелин-Гродековский террейн; 2 – террейны раннепалеозойского Бурей-Ханкайского орогенного пояса; 3 – террейны раннепалеозойской активной окраины; 4 – террейны мезозойского Сихотэ-Алинского орогенного пояса. Для колонок: 5 – конгломераты и гравелиты; 6 – песчаники; 7 – алевролиты и аргиллиты; 8 – кремнисто-глинистые породы; 9 – базальты; 10 – туфы основного состава; 11 – андезиты; 12 – туфы среднего состава; 13 – дациты и риолиты; 14 – туфы кислого состава

в северной части террейна. В нижней части она сложена песчаниками с прослоями и линзами алевролитов, аргиллитов, конгломератов и гравелитов. В верхней части преобладают глинисто-алевритовые породы. Мощность свиты до 2100 м. Позднетриасовая тальминская свита состоит в основном из вулканических пород: дацитов, риолитов, андезитов, их кластолав и туфов. Терригенные отложения устанавливаются лишь в основании свиты, где наблюдаются пачки и линзы песчаников, конгломератов и гравелитов. Мощность свиты невыдержанная и колеблется от 500 до 800 м.

Объекты и методы исследований

Исследовались нижнесилурийские, пермские и триасовые терригенные отложения северной части Лаоелин-Гродековского террейна. Каменный материал отбирался из естественных обнажений, расположенных в бортах рек Кордонка, Байкал, Золотая, Комиссаровка, Решетинка, Молоканка, а также в придорожных выемках и карьерах у сел Софье-Алексеевское, Байкал, Рубиновка. Для детального изучения вещественного состава были выбраны песчаники, поскольку они несут наиболее богатую и достоверную информацию о типе и породном составе питающих провинций, а также геодинамических обстановках формирования бассейнов седиментации.

Минерально-петрографический состав пород исследовался с помощью поляризационного микроскопа МИН-8 и универсального микроскопа Axioplan 2 imaging. Тяжелые минералы песчаников извлекались и определялись общепринятыми многократно

апробированными методами [6, 20 и др.]. Анализ химического состава тяжелых минералов выполнен на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100. Содержания петрогенных элементов определялись методом атомно-эмиссионной спектromетрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре iCAP 6500 Duo. Концентрации редких и редкоземельных элементов устанавливались методом плазменной спектromетрии (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500с. Все исследования выполнены в лабораториях аналитической химии и рентгеновских методов Центра коллективного пользования Дальневосточного геологического института ДВО РАН (г. Владивосток).

Результаты исследований

Для выяснения происхождения разновозрастных отложений Лаоелин-Гродовского террейна, реконструкции палеогеодинамических обстановок их формирования, а также определения состава материнских пород источников питания в песчаниках были изучены состав породообразующих компонентов, содержания и соотношения тяжелых обломочных минералов, микрохимический состав некоторых из них, а также геохимические особенности пород.

По петрографическому составу песчаники раннесилурийской кордонкинской свиты от мелко- до крупнозернистых, иногда неравномерно-зернистые. Сортировка материала слабая либо средняя. Зерна угловатые, угловато-окатанные, редко окатанные. Содержание кварца в песчаниках колеблется от 13 до 22 %. Кварц в основном монокристаллический, остроугольный, изометричный либо слабоудлиненный, часто с волнистым погасанием, что характерно для кварца из эффузивных пород. Полевых шпатов от 32 до 46 %. Преобладают кислые плагиоклазы, составляющие от 55 до 85 % всех полевых шпатов. Основных и средних плагиоклазов от 10 до 30 %. Калиевые полевые шпаты редки. Обломки пород в сумме составляют от 34 до 49 %, среди них преобладают основные и средние эффузивы (40–64 % общего количества обломков), меньше терригенных (17–35 %) и кремнистых (8–21 %) пород, а обломки кварцитов и сланцев редки. Таким образом, по породообразующим компонентам кордонкинские песчаники являются преимущественно вулканомиктовыми, а на классификационной диаграмме В.Д. Шутова [11] попадают в поле кварцево-полевошпатовых граувакк (рис. 2).

Песчаники ранне-среднепермской решетниковской свиты обычно от средне- до крупнозернистых, значительно реже мелкозернистые. Породы обладают слабой либо средней степенью сортированности и окатанности обломочного материала, при этом с увеличением зернистости окатанность ухудшается. В обломочной части преобладает кварц, его общее содержание колеблется от 40 до 48 %. Обычно это монокристаллические разности с волнистым погасанием, происходящие из кислых эффузивов, либо поликристаллические с изрезанными лапчатыми контурами, характерные для гранитоидов. Полевых шпатов в песчаниках 25–40 %. Преобладают кислые плагиоклазы (67–82 % всех полевых шпатов). Калиевые полевые шпаты (15–27 %) представлены ортоклазом и реже микроклином. Основные и средние плагиоклазы крайне редки. Среди обломков пород, в сумме составляющих от 15 до 45 %, присутствуют в основном кислые эффузивные и интрузивные, а также метаморфические породы, содержание каждой из групп в отдельных пробах достигает 45 %. По В.Д. Шутову [11], песчаники относятся к полевошпатовым аркозам и частично полевошпатово-кварцевым грауваккам (рис. 2).

Песчаники позднепермской тальминской свиты средне- и крупнозернистые, редко мелкозернистые со средней либо слабой степенью сортированности и окатанности обломочного материала. Содержание кварца в них колеблется от 22 до 27 %. Встречаются как монокристаллические остроугольные зерна эффузивного кварца, так и поликристаллические, характерные для гранитоидов. Полевых шпатов в песчаниках 24–35 %. Это преимущественно кислые плагиоклазы – альбит и олигоклаз (60–80 %). Калиевых полевых

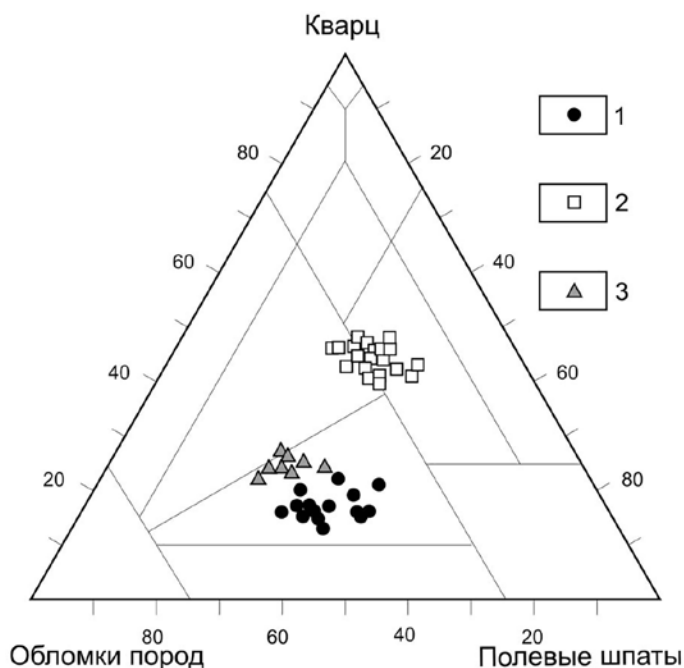


Рис. 2. Состав породообразующих компонентов в песчаных породах изученных свит Лаоелин-Гродековского террейна [11]. Свиты: 1 – кордонкинская, 2 – решетниковская, 3 – тальминская

шпатов (ортоклаз и микроклин) до 20 %. Основные и средние плагиоклазы редки. Обломки пород, составляющие 41–54 % объема песчаников, представлены осадочными породами (31–45 %), средними и кислыми эффузивами и гранитоидами (34–58 %). Обломки кремней и метаморфитов редки (до 16 %). По В.Д. Шутову [11], песчаники являются кварцево-полевошпатовыми граувакками (рис. 2).

Многочисленными исследованиями [5, 6, 19, 20, 22 и др.] установлено, что различным тектоническим обстановкам седиментации свойственны определенные ассоциации тяжелых минералов. На рис. 3 показаны средние содержания и распределение тяжелых обломочных минералов в песчаниках изученных свит. В отложениях кордонкинской свиты наиболее распространена ассоциация тяжелых минералов, связанных с разрушением основных и ультраосновных магматических пород: хромит, магнетит, пироксен, роговая обманка, эпидот, а также ильменит и лейкоксен, которые могут встречаться и в гранитоидах. В среднем суммарное содержание этой ассоциации составляет 92 % всех минералов, а в отдельных пробах – 100 %. Основной минерал ассоциации – хромит, среднее содержание которого 55 %, а в некоторых пробах 88 %. В меньших количествах встречаются амфибол (до 50 %), пироксены (до 30 %), магнетит (до 9 %), эпидот (до 21 %), ильменит и лейкоксен (в сумме до 45 %). Вторую ассоциацию тяжелых минералов образуют циркон, гранат, турмалин и апатит – минералы, связанные с разрушением кислых изверженных и метаморфических пород. Суммарное содержание этих минералов крайне невелико: в среднем не превышает 8 % и лишь циркон в отдельных пробах составляет 10–18 %.

В песчаниках решетниковской свиты резко преобладает (в среднем 75 %, а в отдельных пробах до 90 %) ассоциация минералов, связанных с кислыми изверженными и метаморфическими породами: циркон – основной минерал ассоциации (в отдельных пробах до 97 % всех минералов), турмалин (до 7 %), гранат (до 3 %), сфен (до 3 %), а также апатит, рутил и анатаз, содержащиеся в значительно меньших количествах. Кроме того, часто присутствуют ильменит и лейкоксен (в отдельных пробах в сумме до 35 %), происходящие,

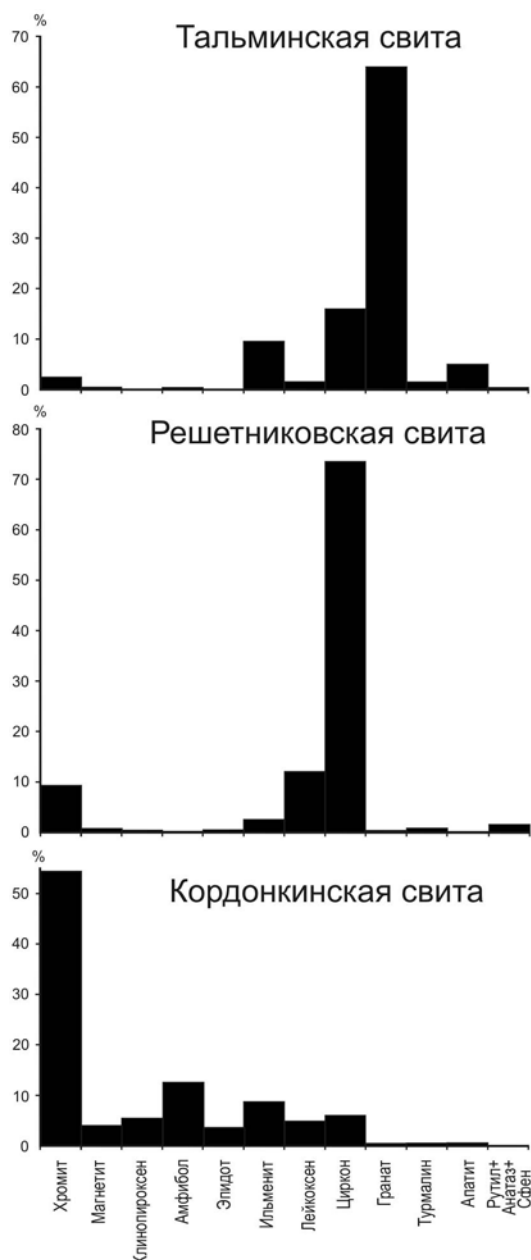


Рис. 3. Средние содержания и характер распределения тяжелых обломочных минералов в песчаных породах изученных свит Лаолин-Гродековского террейна

вероятно, из раннепалеозойских ильменитовых гранитоидов Ханкайского массива Южного Приморья. Вместе с тем в тяжелой фракции обычно содержится небольшое количество хромита (в среднем 9 %), указывающего на участие в строении источников сноса пород и основного, и ультраосновного состава.

В песчаниках тальминской свиты также преобладает ассоциация тяжелых минералов, связанных с кислыми интрузивными и метаморфическими породами (в среднем 86 %, в некоторых пробах даже до 98 %). Но, в отличие от решетниковской свиты, ведущая роль в них принадлежит гранату (в среднем 64 %, а в отдельных пробах до 86 %), а вот циркона значительно меньше (до 25 %). Остальные минералы этой ассоциации (турмалин, апатит, рутил, сфен) составляют первые проценты либо находятся в знаковых количествах. Ильменит (до 10 %), вероятно, происходит из тех же ильменитовых гранитоидов Ханкайского массива. Источником же гранатов, обильно встречающихся в песчаниках, возможно, были известные в изученном районе выходы позднепермских–раннетриасовых метаморфических пород [10].

Данные по химическому составу песчаных пород рассматриваемых свит террейна приведены в таблице. По содержанию основных породообразующих оксидов песчаники кордонкинской свиты очень однородны: содержание SiO_2 в них варьирует от 54,50 до 57,75 % и лишь в двух пробах оно превышает 60 %. Породам свойственны высокие содержания суммарного железа $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (6,63–9,26 %), MgO (2,36–7,83 %), TiO_2 (0,61–1,19 %) и Al_2O_3 (12,22–16,65 %). Песчаники характеризуются типичным для граувакк

преобладанием Na_2O над K_2O (2,56–4,29 % и 0,86–2,13 % соответственно).

На классификационной диаграмме Ф.Дж. Петтиджона с соавторами [8] точки составов песчаников свиты компактно группируются в поле граувакк (рис. 4).

Песчаные породы решетниковской свиты по химическому составу резко отличаются от пород кордонкинской свиты. Прежде всего это выражается в значительно более высоком содержании SiO_2 (75,22–86,55 %). Вместе с тем в них значительно ниже содержания TiO_2 (0,15–0,68 %), Al_2O_3 (6,71–13,72 %), $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (0,29–2,60 %), MgO (0,04–0,43 %) и CaO (0,06–0,53 %). Кроме того, этим песчаникам свойственно типичное для аркозов

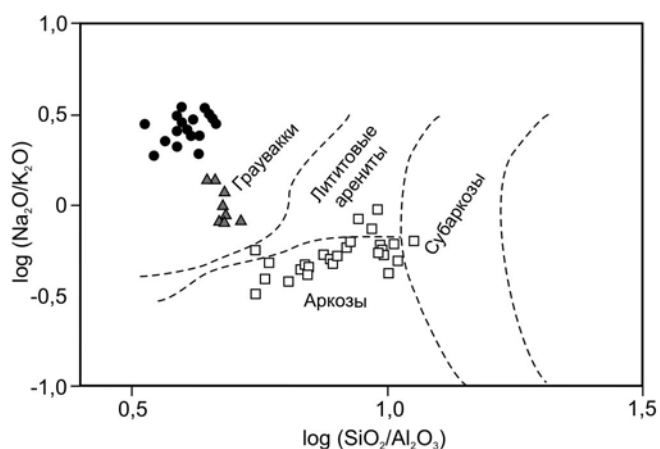


Рис. 4. Классификация песчаных пород по химическому составу [8].
Усл. обозначения см. на рис. 2

**Содержание петрогенных (масс. %), редких и редкоземельных элементов (г/т)
в песчаных породах Лаолин-Гродековского террейна**

Элементы, показатели	Кордонкинская свита (n = 17)	Решетниковская свита (n = 27)	Тальминская свита (n = 8)
SiO ₂	<u>54,50–64,51</u> 57,06	<u>75,22–86,55</u> 81,68	<u>66,90–71,66</u> 69,20
TiO ₂	<u>0,61–1,19</u> 0,83	<u>0,15–0,68</u> 0,39	<u>0,42–0,92</u> 0,68
Al ₂ O ₃	<u>12,22–16,65</u> 14,05	<u>6,71–13,72</u> 10,19	<u>13,84–15,02</u> 14,52
Fe ₂ O ₃	<u>1,61–6,93</u> 3,41	<u>0,13–1,61</u> 0,60	<u>2,35–3,97</u> 3,17
FeO	<u>2,33–6,31</u> 4,61	<u>0,12–1,66</u> 0,51	<u>0,33–0,83</u> 0,55
MnO	<u>0,03–0,17</u> 0,11	<u>0,01–0,05</u> 0,02	<u>0,03–0,15</u> 0,07
MgO	<u>2,36–7,83</u> 6,08	<u>0,04–0,43</u> 0,31	<u>0,73–1,26</u> 0,91
CaO	<u>0,33–5,57</u> 3,02	<u>0,06–0,53</u> 0,18	<u>0,64–1,29</u> 0,86
Na ₂ O	<u>2,56–4,29</u> 3,49	<u>0,96–1,85</u> 1,47	<u>1,89–3,20</u> 2,48
K ₂ O	<u>0,86–2,13</u> 1,33	<u>1,88–4,06</u> 2,71	<u>1,81–3,22</u> 2,39
P ₂ O ₅	<u>0,12–0,56</u> 0,20	<u>0,01–0,11</u> 0,06	<u>0,10–0,15</u> 0,12
H ₂ O	<u>0,43–1,59</u> 0,87	<u>0,78–3,80</u> 0,25	<u>1,39–2,79</u> 1,93
п.п.п.	<u>2,40–6,28</u> 4,71	<u>2,33–6,31</u> 1,61	<u>2,28–3,81</u> 3,03
ГМ	<u>0,35–0,47</u> 0,40	<u>0,10–0,21</u> 0,14	<u>0,25–0,30</u> 0,27
ФМ	<u>0,15–0,30</u> 0,25	<u>0,01–0,04</u> 0,02	<u>0,05–0,08</u> 0,07

Элементы, показатели	Кордонкинская свита (n = 17)	Решетниковская свита (n = 27)	Тальминская свита (n = 8)
Tm	<u>0,041–0,074</u> 0,059	<u>0,019–0,040</u> 0,035	<u>0,040–0,061</u> 0,047
Hf	<u>0,28–0,41</u> 0,34	<u>0,36–0,62</u> 0,41	<u>0,29–0,39</u> 0,34
Cf	<u>44–55</u> 50	<u>61–69</u> 64	<u>60–65</u> 62
Be	<u>0,48–1,54</u> 0,84	<u>0,52–2,47</u> 1,24	<u>1,29–1,94</u> 1,61
Rb	<u>8,56–45,62</u> 21,31	<u>34,62–123,60</u> 82,28	<u>45,22–115,76</u> 80,49
Cs	<u>0,19–3,36</u> 1,13	<u>0,78–3,35</u> 1,65	<u>3,56–6,23</u> 4,89
Sr	<u>144,2–925,2</u> 314,1	<u>34,9–125,9</u> 65,4	<u>88,7–238,5</u> 163,6
Ba	<u>188,4–867,6</u> 517,1	<u>178,9–731,3</u> 443,8	<u>296,8–557,4</u> 427,1
Zr	<u>55,8–233,1</u> 117,2	<u>89,8–372,0</u> 198,8	<u>103,1–190,8</u> 146,9
Nb	<u>2,61–13,62</u> 5,79	<u>4,17–12,52</u> 7,93	<u>5,71–9,15</u> 7,43
Y	<u>11,74–24,81</u> 19,13	<u>12,76–25,46</u> 18,23	<u>16,21–26,34</u> 21,28
Sc	<u>10,16–29,01</u> 21,73	<u>2,70–9,80</u> 5,33	<u>8,40–15,40</u> 11,90
V	<u>105,5–228,8</u> 153,7	<u>12,2–52,0</u> 26,8	<u>37,9–114,8</u> 76,3
Cr	<u>48,9–845,9</u> 343,8	<u>30,6–67,9</u> 43,9	<u>33,8–174,2</u> 104,0
Co	<u>14,01–31,49</u> 23,13	<u>1,31–11,68</u> 3,92	<u>5,29–19,28</u> 12,28
Ni	<u>24,2–273,0</u> 137,0	<u>6,2–23,0</u> 11,0	<u>16,9–46,0</u> 31,5
Cu	<u>14,28–58,11</u> 35,54	<u>6,62–20,86</u> 13,33	<u>14,26–42,64</u> 28,45
Zn	<u>65,6–105,2</u> 82,0	<u>16,1–62,2</u> 33,6	<u>58,0–95,6</u> 76,8
Ga	<u>8,66–18,82</u> 13,14	<u>7,58–19,94</u> 12,81	<u>14,76–18,08</u> 16,42
Mo	<u>0,06–0,97</u> 0,56	<u>0,83–2,44</u> 1,54	<u>0,47–4,85</u> 2,66
Sn	<u>0,06–2,67</u> 1,06	<u>1,04–2,77</u> 1,77	<u>1,32–3,74</u> 2,53
La	<u>8,99–33,89</u> 20,26	<u>16,92–37,62</u> 25,17	<u>17,63–28,92</u> 23,28
Ce	<u>19,59–77,71</u> 41,06	<u>46,06–86,47</u> 63,56	<u>45,27–61,95</u> 53,61
Pr	<u>2,60–9,12</u> 5,28	<u>3,84–9,00</u> 5,92	<u>4,17–6,94</u> 5,55
Nd	<u>10,59–35,31</u> 20,78	<u>14,34–33,76</u> 21,58	<u>14,26–27,37</u> 20,82
Sm	<u>2,41–7,39</u> 4,55	<u>2,97–6,58</u> 4,37	<u>3,30–5,98</u> 4,64

Элементы, показатели	Кордонкинская свита (n = 17)	Решетниковская свита (n = 27)	Тальминская свита (n = 8)
Eu	<u>0,75–1,84</u> 1,30	<u>0,64–1,33</u> 0,91	<u>0,79–1,30</u> 1,05
Gd	<u>2,51–6,49</u> 4,74	<u>2,86–6,07</u> 4,13	<u>3,53–5,88</u> 4,71
Tb	<u>0,41–0,86</u> 0,66	<u>0,38–0,93</u> 0,57	<u>0,50–0,84</u> 0,67
Dy	<u>2,52–5,09</u> 3,88	<u>2,26–4,44</u> 3,06	<u>2,88–4,62</u> 3,75
Ho	<u>0,51–1,03</u> 0,79	<u>0,49–1,02</u> 0,67	<u>0,53–1,04</u> 0,79
Er	<u>1,68–2,99</u> 2,33	<u>1,27–2,65</u> 1,94	<u>1,73–2,50</u> 2,16
Tm	<u>0,21–0,43</u> 0,31	<u>0,21–0,48</u> 0,31	<u>0,26–0,47</u> 0,36
Yb	<u>1,62–2,40</u> 2,04	<u>1,12–2,94</u> 2,02	<u>1,67–2,50</u> 2,09
Lu	<u>0,24–0,51</u> 0,33	<u>0,23–0,52</u> 0,33	<u>0,27–0,44</u> 0,35
Hf	<u>1,71–5,48</u> 3,08	<u>2,55–9,30</u> 5,22	<u>3,29–4,91</u> 4,10
Ta	<u>0,14–0,77</u> 0,35	<u>0,28–0,84</u> 0,54	<u>0,45–0,69</u> 0,57
Pb	<u>5,85–12,19</u> 8,89	<u>7,68–26,77</u> 12,04	<u>10,36–15,59</u> 12,98
Th	<u>1,42–1,42</u> 3,13	<u>2,93–8,57</u> 5,69	<u>4,79–8,05</u> 6,42
U	<u>0,52–1,67</u> 1,00	<u>0,92–2,80</u> 1,66	<u>1,54–3,29</u> 2,42
La _N /Yb _N	<u>3,58–8,97</u> 6,58	<u>4,81–11,29</u> 8,28	<u>6,05–8,10</u> 7,07
Eu/Eu*	<u>0,69–1,14</u> 0,84	<u>0,48–0,79</u> 0,64	<u>0,55–0,69</u> 0,61

Примечание. n – количество анализов. В числителе – минимальное и максимальное значения, в знаменателе – среднее.

преобладание K_2O над Na_2O (1,88–4,06 и 0,96–1,85 % соответственно). На классификационной диаграмме [8] точки составов песчаников попадают в основном в поле аркозов и лишь частично – в поля лититовых аренитов и субаркозов (рис. 4).

Песчаники тальминской свиты по химическому составу занимают промежуточное положение между породами кордонкинской и решетниковской свит. Содержание всех оксидов в них изменяется незначительно: SiO_2 от 66,90 до 71,66 %, TiO_2 от 0,42 до 0,92 %, Al_2O_3 от 13,84 до 15,02 %, $FeO + Fe_2O_3$ от 2,68 до 4,67 %, MgO от 0,73 до 1,26 % и CaO от 0,64 до 1,29 %. Содержания Na_2O и K_2O близки (1,89–3,20 и 1,81–3,22 % соответственно), хотя в среднем отношение $K_2O/Na_2O < 1$, что позволяет рассматривать тальминские песчаники как граувакки. Это подтверждается и их положением на классификационной диаграмме [8] (рис. 4).

Черты сходства и различий химического состава изученных песчаников хорошо выявляются при рассмотрении ряда литохимических модулей [13] (см. таблицу). По величине гидролизатного модуля $GM = (Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2$, используемого для количественной оценки степени химического выветривания пород, т.е. их «зрелости», породы изученных свит существенно различаются.

Песчаники кордонкинской свиты характеризуются высокими значениями этого модуля (0,35–0,47), что свидетельствует о низком уровне их зрелости и образовании преимущественно за счет физического разрушения материнских пород областей сноса при подчиненной роли химического выветривания. На невысокую степень выветривания исходных пород также указывают и характерные для слабыветрелых пород значения индекса химического изменения $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O)] \times 100$ [23], колеблющиеся в песчаниках от 44 до 55.

В породах решетниковской свиты значения ГМ составляют 0,10–0,21, а CIA 61–69, что свидетельствует о значительно большей степени их зрелости и, соответственно, более высокой роли химического выветривания материнских пород областей сноса.

Тальминские песчаники характеризуются относительно невысоким уровнем зрелости и преобладанием процессов физического выветривания в областях сноса (ГМ = 0,25–0,30, CIA = 60–65).

Величина фемического модуля $ФМ = (Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO) / SiO_2$ используется для разделения граувакк и аркозов. По этому показателю песчаные породы кордонкинской свиты относятся к типичным грауваккам (ФМ = 0,15–0,30). В свою очередь породы решетниковской свиты, обладая низким показателем фемичности (ФМ = 0,01–0,04), соответствуют аркозам, а тальминской свиты занимают промежуточное положение между граувакками и аркозами (ФМ = 0,05–0,08).

Наблюдаемые в кордонкинских песчаниках повышенные значения титанового модуля $ТМ = TiO_2 / Al_2O_3$ (0,041–0,074), но пониженные значения модуля нормативной щелочности НКМ = $(Na_2O + K_2O) / Al_2O_3$ (0,28–0,41) связаны со значительной примесью в породах основной вулканокластике, а также с высокой литодинамической сортировкой обломочного материала, приводящей к увеличению в них содержания титановых минералов, что хорошо видно при рассмотрении состава тяжелой фракции. Породы решетниковской свиты обладают повышенными значениями НКМ (0,36–0,62). Это объясняется широким развитием в них слюд и полевых шпатов, в том числе калиевых. В то же время для этой свиты характерны низкие значения ТМ (0,019–0,040), что связано с преобладанием среди пород источников питания гранитоидов, отличающихся низкими значениями ТМ. Тальминские песчаники обладают невысокой нормативной щелочностью (НКМ = 0,29–0,39), но повышенной титанистостью (ТМ = 0,040–0,061), что, вероятно, связано с присутствием обломков высокотитанистых, но низкоглиноземистых вулканитов.

Суммарные содержания редкоземельных элементов (РЗЭ) в песчаниках кордонкинской свиты относительно невелики и варьируют от 55 до 183 г/т. Спектры распределения РЗЭ, нормализованные к составу хондрита [16] (рис. 5), во всех изученных пробах в целом однотипны и характеризуются нормальными трендами распределения с умеренной степенью фракционирования и невысоким отношением легких лантаноидов к тяжелым ($La_N / Yb_N = 3,58–8,97$), а также отсутствием либо слабо выраженной отрицательной европиевой аномалией ($Eu / Eu^* = 0,71–1,14$). По сравнению с постархейским средним глинистым сланцем (РААС), принятым за средний состав верхней континентальной коры [27], породы незначительно (от 1,1 до 2,1 раза) обеднены большинством элементов, и лишь иногда некоторые из них (Eu, Gd, Tb, Dy) находятся в равных либо несколько более высоких концентрациях. В песчаных породах решетниковской свиты суммарное содержание РЗЭ несколько выше (97–179 г/т). Для них также характерны умеренно фракционированные спектры распределения РЗЭ (рис. 5), но с несколько более высокими отношениями La_N / Yb_N (4,81–11,29), а также достаточно хорошо выраженной отрицательной европиевой аномалией (Eu / Eu^* от 0,48 до 0,79). По сравнению с РААС породы обеднены всеми элементами (до 2,4 раза) и лишь в отдельных пробах Sm, Eu и Gd находятся в близких либо незначительно более высоких концентрациях. Песчаникам тальминской свиты свойственны относительно невысокие суммарные концентрации РЗЭ (97–148 г/т), нормальные спектры их распределения с невысокими отношениями La_N / Yb_N (6,05–8,10) и выраженной отрицательной европиевой аномалией ($Eu / Eu^* = 0,55–0,69$) (рис. 5).

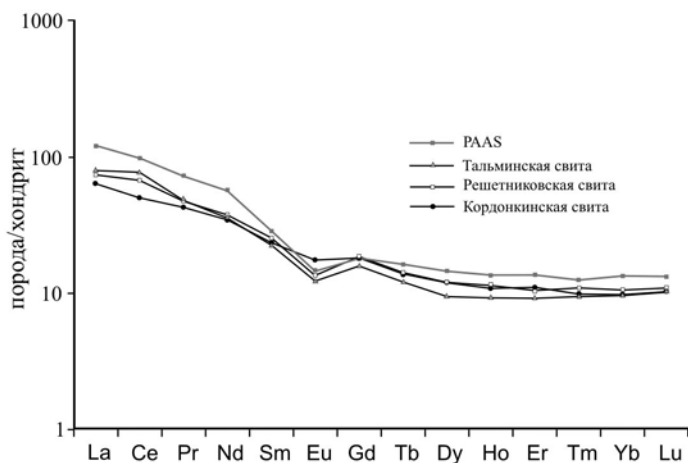


Рис. 5. Спектры распределения РЗЭ, нормированных к хондриту [16], в песчаных породах изученных свит и сопоставление их с PAAS [24]

Сравнение с PAAS показывает небольшую обедненность (до 2,4 раза) пород практически всеми элементами.

Интерпретация результатов исследования

Палеогеодинамическая интерпретация полученных минералого-геохимических данных осуществлена при помощи серии широко известных дискриминантных диаграмм, построенных на основании сравнения результатов изучения древних терригенных пород и современных осадков, формирование которых происходило в известных тектонических обстановках [17–19, 21, 25, 26 и др.].

На диаграмме В. Диккинсона и К. Сучека [18] (рис. 6, а), предназначенной для выявления тектонических типов источников питания по составу породообразующих компонентов песчаников, видно, что отложения раннесилурийской кордонкинской свиты формировались за счет размыва переходной, частично эродированной островной дуги, в которой главным источником вещества были основные и средние вулканиты, бронирующие ее фундамент. В целом аналогичные результаты получены при анализе ассоциаций тяжелых минералов из кордонкинских песчаников на диаграмме Э. Гарзанти и С. Андо [19] (рис. 6, б). Точки их составов попадают в поля питающих провинций островных дуг, главным образом незэродированных и частично переходных слабозэродированных. Интерпретация химического состава песчаных пород, приведенная на диаграмме Б. Роузера и Р. Корша [26] (рис. 6, в), свидетельствует о том, что в области сноса доминировали основные и средние вулканические породы, но присутствовали и обогащенные кварцем осадочные образования. Относительно невысокие суммарные концентрации РЗЭ в породах кордонкинской свиты, невысокие величины отношения легких элементов к тяжелым, а также отсутствие либо слабое проявление отрицательной Eu-аномалии позволяют говорить об их формировании за счет размывавшихся основных и средних вулканитов, что подтверждается расположением их фигуративных точек на диаграмме La/Sc–Th/Co [17] (рис. 6, г).

Дополнительную информацию о типе вулканического источника питания можно получить, изучая микрохимический состав некоторых тяжелых обломочных минералов: клинопироксена, роговой обманки, хромита и граната. Клинопироксены из песчаников кордонкинской свиты по составу соответствуют диопсиду и авгиту, а их происхождение устанавливается на диаграмме, позволяющей различать пироксены из базальтов различных геодинамических обстановок [24] (рис. 7, а). На этой диаграмме большинство из них

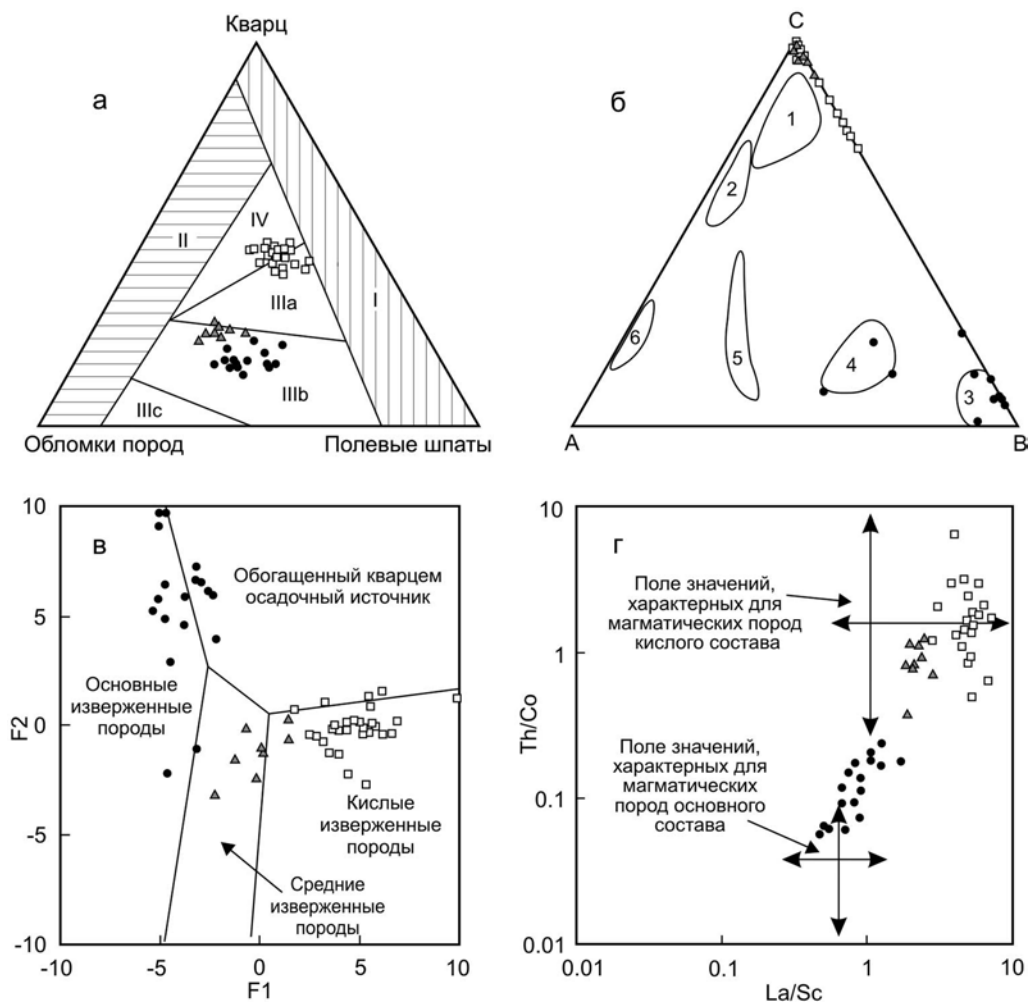


Рис. 6. Возможные источники питания для терригенных пород изученных свит. *а* – по пороодообразующим компонентам [18]. Типы областей питания: I – устойчивые кратоны и поднятые блоки основания, II – ремобилизованные орогены, III – магматические дуги (IIIa – расчлененные, глубокоэродированные, IIIb – переходные, IIIc – нерасчлененные, слабоэродированные), IV – смешанные источники питания; *б* – по тяжелым обломочным минералам [19]. А – амфиболы; В – клинопироксены, 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 [26]; $F1 = 30,638 \times TiO_2/Al_2O_3 - 12,541 \times Fe_2O_3^*/Al_2O_3 + 7,329 \times MgO/Al_2O_3 + 12,031 \times Na_2O/Al_2O_3 + 35,402 \times K_2O/Al_2O_3 - 6,382$; $F2 = 56,5 \times TiO_2/Al_2O_3 - 10,879 \times Fe_2O_3^*/Al_2O_3 + 30,875 \times MgO/Al_2O_3 - 5,404 \times Na_2O/Al_2O_3 + 11,112 \times K_2O/Al_2O_3 - 3,89$; *г* – La/Sc–Th/Co [17]. Усл. обозначения см. на рис. 2

соответствуют клинопироксенам базальтов островных дуг и частично базальтов океанического дна, которые, вероятно, входили в состав основания островной дуги. Положение точек состава обломочных амфиболов из кордонкинских песчаников на диаграмме Fe–Al–10Ti [22] (рис. 7, б) также свидетельствует о том, что их источником были вулканические породы островных (вероятно, энсиматических) дуг, а также метаморфические и интрузивные породы их основания. Присутствие хромитов в тяжелой фракции песчаников обычно указывает на участие в составе области питания ультраосновных и основных интрузивных и вулканических пород. Изученные хромиты по химическому составу очень однородны. Их особенностью является отсутствие либо крайне низкие (менее 1,5 %)

содержания TiO_2 . На диаграмме $Al_2O_3-Cr_2O_3-10TiO_2$ [12] (рис. 7, в) они соответствуют хромитам из магматических офиолитов, входивших, вероятно, в состав основания дуги.

Реконструируя типы и состав пород источников питания на основании изучения вещественного состава терригенных пород, мы подразумеваем и определенные геодинамические обстановки формирования связанных с ними седиментационных бассейнов. Реконструкция этих обстановок осуществлена при помощи дискриминантных диаграмм, приведенных на рис. 8. Формирование отложений кордонкинской свиты, судя по положению точек состава породообразующих компонентов песчаников на диаграмме Дж. Мейнарда и его соавторов [21] (рис. 8, а), происходило в обстановках, соответствующих как бассейнам, связанным с окраинно-континентальными магматическими дугами, так и задуговым бассейнам океанических островных дуг. На диаграммах М. Бхатия и А. Крука [14, 15],

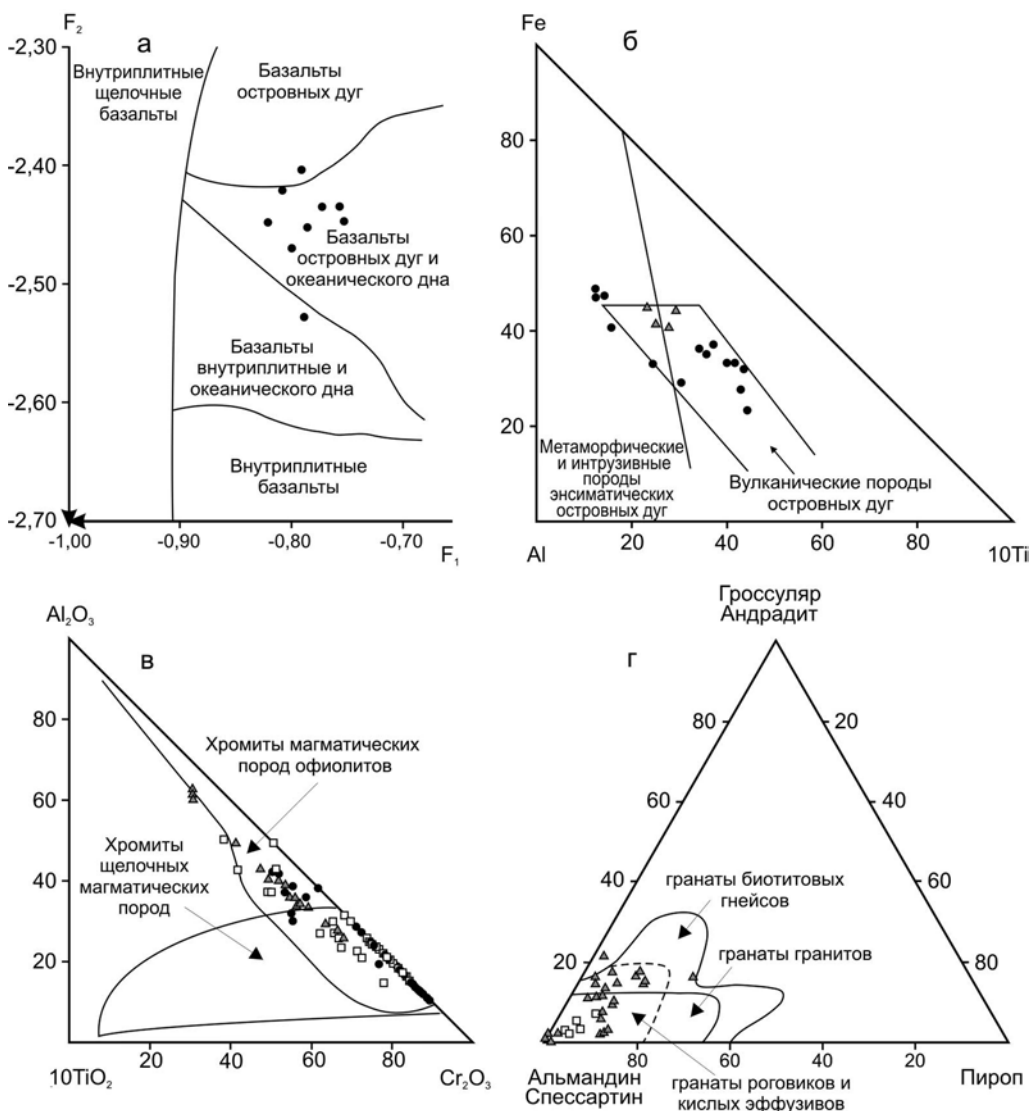


Рис. 7. Микрохимический состав тяжелых обломочных минералов из песчаников изученных свит и их возможные вулканические источники. а – для клинопироксенов [24]: $F_1 = -0,012 \times SiO_2 - 0,0807 \times TiO_2 + 0,0026 \times Al_2O_3 - 0,0012 \times FeO - 0,0026 \times MnO + 0,0087 \times MgO - 0,0128 \times CaO - 0,0419 \times Na_2O$; $F_2 = -0,0496 \times SiO_2 - 0,0818 \times TiO_2 - 0,02126 \times Al_2O_3 - 0,0041 \times FeO - 0,1435 \times MnO - 0,0029 \times MgO - 0,0085 \times CaO + 0,0160 \times Na_2O$; б – для амфиболов [22]; в – для хромитов [12]; г – для гранатов [9]. Усл. обозначения см. на рис. 2

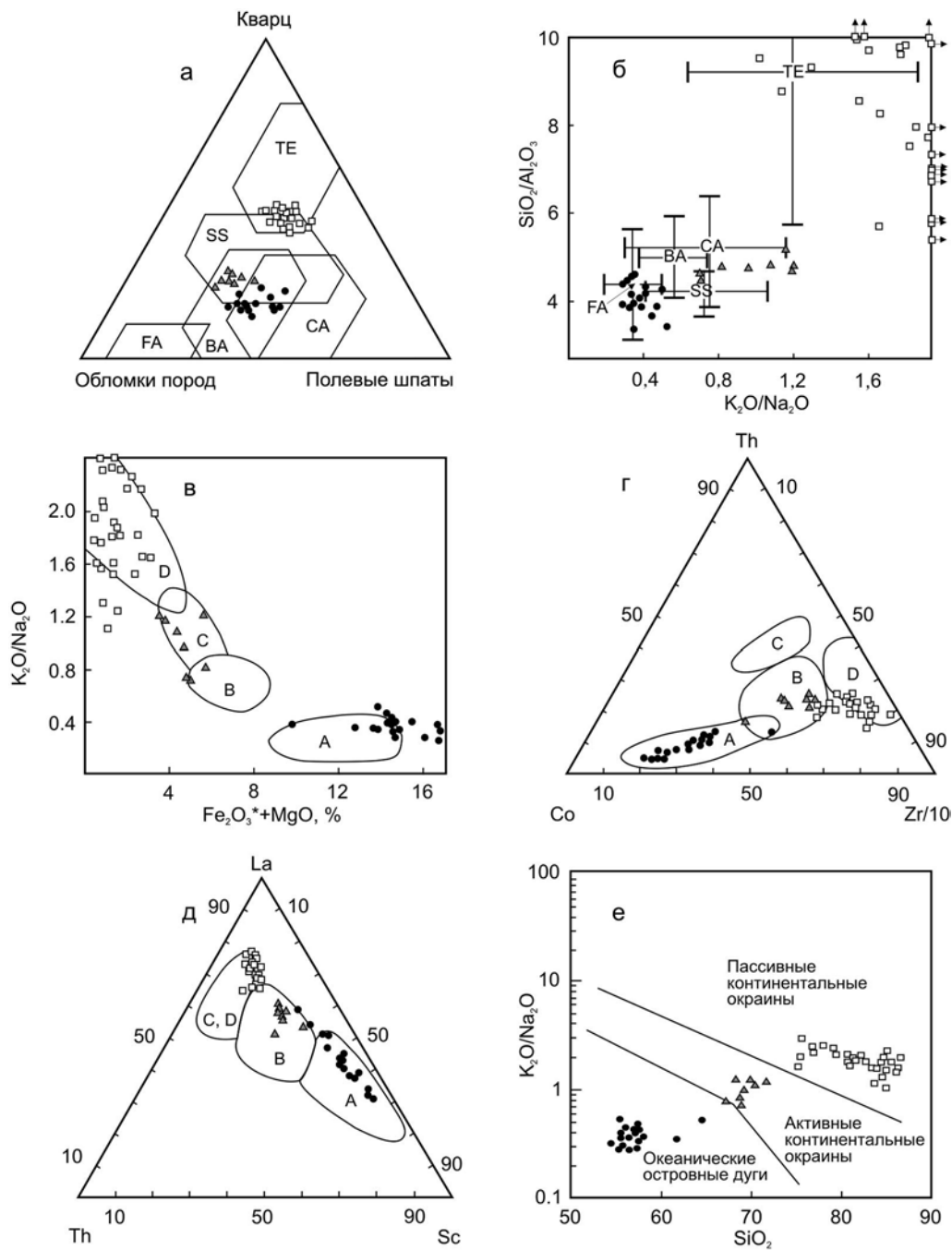


Рис. 8. Палеогеодинамические обстановки формирования терригенных отложений изученных свит на основании интерпретации их вещественного состава. *a, б* – типы бассейновых обстановок [21]: *a* – по порообразующим компонентам песчаников, *б* – по их химическому составу. Бассейны: пассивных континентальных окраин (TE); активных континентальных окраин, осложненных сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам (SS); сопряженные: с окраинно-континентальной магматической дугой (CA), с океанической вулканической дугой (FA – преддуговые, BA – задуговые бассейны); *в-д* – типы седиментационных бассейнов по геохимическим данным [14, 15]. Поля бассейнов, сопряженных: А – с океаническими, В – с континентальными островными дугами, С – с активными, D – с пассивными континентальными окраинами. Fe_2O_3^* – общее железо; *e* – бассейны различных тектонических обстановок [25]. Усл. обозначения см. на рис. 2

используемых для разделения по геохимическому составу отложений из бассейнов различных тектонических обстановок, кордонкинские песчаники попадают либо приближаются к полям осадочных бассейнов, сопряженных с океаническими островными дугами, примером которых является современная Идзу-Бонинская дуга (рис. 8, *в-д*). На диаграмме Дж. Мейнарда и соавторов [21] (рис. 8, *б*) точки песчаников также попадают в поля бассейнов океанических островных дуг, тяготея при этом к обстановкам преддуговых бассейнов. Также однозначно обстановки океанических дуг устанавливаются и на диаграмме Б. Роузера и Р. Корша [25] (рис 8, *е*).

Генетическая интерпретация вещественного состава песчаных пород ранне-среднепермской решетниковской свиты основана на тех же принципах, описанных выше. На диаграмме В. Диккинсона и К. Сучека [18], выявляющей типы источников питания по порообразующим компонентам (рис. 6, *а*), точки пород группируются у поля устойчивых кратонов и поднятых блоков основания, представляющих собой выступы кристаллического фундамента в обрамлении рифтовых зон или вдоль трансформных разломов, при этом формально попадая в поля смешанных источников питания и расчлененных, глубоко эродированных магматических дуг, в которых эрозия достигла батолитов гранитоидов, слагающих их основания. Анализ соотношения ассоциаций тяжелых минералов песчаников на диаграмме Э. Гарзанти и С. Андо [19] (рис. 6, *б*) показывает, что на осадконакопление главное влияние оказывали размывавшиеся блоки пассивной континентальной окраины: кратоны и краевые части рифтов. Судя по составу обломочных гранатов [9] (рис. 7, *з*), эти блоки, очевидно, были сложены кислыми изверженными породами, а также, возможно в меньшей мере, породами низких стадий метаморфизма. Высокие содержания в породах свиты кремнекислоты, преобладание K_2O над Na_2O , низкая их фемичность, относительная обогащенность легкими РЗЭ по сравнению с тяжелыми, отчетливо выраженная отрицательная Eu аномалия и положение точек пород на дискриминантных диаграммах (рис. 6, *в, з*) подтверждают вывод о формировании отложений главным образом за счет разрушения кислых магматических пород при некотором участии обогащенных кварцем осадочных источников. Вместе с тем присутствие в тяжелой фракции песчаников свиты небольшого количества хромитов, относящихся к низкотитанистому типу ($TiO_2 < 1\%$) [12] (рис. 7, *в*), указывает на участие в строении источников сноса и древних, вероятно метаморфизованных, пород основного и ультраосновного состава. Реконструкция геотектонических обстановок формирования отложений решетниковской свиты на всех приведенных дискриминантных диаграммах (рис. 8) однозначно свидетельствует об их накоплении в седиментационных бассейнах пассивных континентальных окраин, к которым относятся внутри- и межконтинентальные рифты и авлакогены.

Генетическая интерпретация вещественного состава терригенных пород позднепермской тальминской свиты неоднозначна. Реконструкция тектонических типов источников питания на диаграмме В. Диккинсона и К. Сучека [18] (рис. 6, *а*) свидетельствует о формировании отложений как за счет переходных, частично разрушенных, так и за счет расчлененных, глубокоэродированных окраинно-континентальных островных дуг, в которых размывались средние и кислые вулканы самой дуги, а также гранитоиды ее фундамента. В пользу этого вывода говорит состав изученных обломочных хромитов и амфиболов, соответствующих минералам вулканических, интрузивных и метаморфических пород островных дуг [22] (рис. 7, *б, в*). Вместе с тем анализ ассоциаций тяжелых минералов на диаграмме [19] (рис. 6, *б*) свидетельствует о том, что рассматриваемые песчаники соответствуют породам, питающей провинцией которых являются краевые части рифтов. Судя по составу гранатов из отложений свиты [9] (рис. 7, *з*), эти источники были сложены гранитоидами, кислыми эффузивами, а также породами амфиболитовой и роговиковой фаций метаморфизма. Относительно высокие содержания в породах свиты кремнекислоты, незначительная их обогащенность легкими РЗЭ по сравнению с тяжелыми, отчетливо выраженная отрицательная европиевая аномалия и положение точек на диаграммах, используемых для интерпретации геохимического состава терригенных пород (рис. 6, *в, з*),

указывают на то, что основными источниками кластики были размывавшиеся кислые и средние изверженные породы. Геотектоническая интерпретация самих обстановок формирования отложений тальминской свиты также неоднозначна. На части дискриминантных диаграмм (рис. 8, *з, д*) точки составов ее песчаников попадают в поля бассейнов, сопряженных с окраинно-континентальными островными дугами, на других же диаграммах (рис. 8, *а–в, е*) они группируются в полях бассейнов активных континентальных окраин, осложненных сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам. Исходя из этого, а также учитывая общегеологическую ситуацию [2] и установленную выше вероятную принадлежность областей питания к краевым частям рифтов, можно в целом сделать вывод о рифтогенной природе отложений свиты.

Заключение

Рассмотрен вещественный состав палеозойских и раннемезозойских терригенных отложений Лаоелин-Гродековского террейна юго-западного Приморья. Обобщение и интерпретация полученных данных позволили восстановить геодинамические обстановки формирования отложений развитых здесь свит, а также определить тектонический тип и породный состав областей их питания. Полученные результаты свидетельствуют о том, что эти отложения существенно различаются по вещественному составу и, следовательно, формировались в различных палеогеодинамических обстановках.

Накопление отложений раннесилурийской кордонкинской свиты происходило в седиментационном бассейне, связанном с океанической островной дугой, примером которой является современная Идзу-Бонинская дуга. Областью питания, поставлявшей обломочный материал в этот бассейн, была сама дуга, сложенная основными и средними вулканитами, а также магматическими и осадочными образованиями, входившими в состав ее фундамента.

Отложения ранне-среднепермской решетниковской свиты формировались в условиях, соответствующих обстановкам бассейнов пассивных континентальных окраин. Обломочный материал поступал главным образом с участвовавших в строении этой окраины кратонов и краевых частей рифтов, сложенных кислыми изверженными и в меньшей мере метаморфическими и обогащенными кварцем осадочными породами.

Формирование отложений поздне триасовой тальминской свиты, исходя из полученных данных и с учетом общегеологической ситуации, происходило на активной континентальной окраине в бассейнах рифтогенного происхождения. Источниками кластики были краевые части этих рифтов, сложенные кислыми и средними изверженными породами, а также породами низкой стадии метаморфизма.

В целом полученные результаты позволяют рассматривать Лаоелин-Гродековский терреин как составной [2], образованный тесно сжатыми блоками силурийского, пермского и триасового возраста, имеющими различный состав и формировавшимися в различных палеогеодинамических обстановках.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бураго А.И., Котляр Г.В. Решетниковская свита Западного Приморья // Палеозой Дальнего Востока. Хабаровск: ДВНЦ АН СССР, 1974. С. 258–267.
2. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / под ред. А.И. Ханчука. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
3. Изосов Л.А., Смирнова О.Л., Емельянова Т.А. Кордонкинская свита Западного Приморья: тектоно-стратиграфический комплекс // Регион. пробл. 2016. Т. 19, № 1. С. 3–7.
4. Изосов Л.А., Кандауров А.Т., Баженов В.А., Корень Т.А., Шишкина Г.Р., Колобова И.М., Кулькова Н.П. Силурийские отложения Приморья // Тихоокеан. геология. 1988. № 5. С. 75–82.

5. Малиновский А.И., Голозубов В.В. Строение, состав и обстановки формирования нижнемеловых отложений Журавлевского террейна (Центральный Сихотэ-Алинь) // Литология и полез. ископаемые. 2012. № 4. С. 399–424.
6. Малиновский А.И., Маркевич П.В., Тучкова М.И. Тяжелые обломочные минералы терригенных пород как индикаторы геодинамических обстановок в палеобассейнах орогенных областей Востока Азии // Вестн. КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. Вып. 8, № 2. С. 97–111.
7. Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гареев Э.З. К оценке палеогеодинамических обстановок формирования осадочных последовательностей нижнего и среднего рифея Учуро-Майского региона и Башкирского мегантиклинория // Тихоокеан. геология. 2012. Т. 31, № 5. С. 55–68.
8. Петтиджон Ф.Дж., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 535 с.
9. Соболев В.Н. Генетические типы гранатов. М.: Наука, 1964. 219 с.
10. Ханчук А.И., Раткин В.В., Рязанцева М.Д., Голозубов В.В., Гонохова Н.Г. Геология и полезные ископаемые Приморского края: очерк. Владивосток: Дальнаука, 1995. 82 с.
11. Шутов В.Д. Классификация песчаников // Литология и полез. ископаемые. 1967. № 5. С. 86–102.
12. Щека С.А., Вржосек А.А. Ультраосновной вулканизм Тихоокеанского комплекса и вопросы систематики меймечитов и коматинитов // Вулканология и сейсмология. 1983. № 2. С. 3–16.
13. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.
14. Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical compositions of sandstones // J. Geol. 1983. Vol. 91, N 6. P. 611–627.
15. Bhatia M.R., Crook K.A.W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins // Contrib. Mineral. Petrol. 1986. Vol. 92. P. 181–193.
16. Boynton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // Rare Earth element geochemistry / ed. P. Henderson. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 63–114.
17. 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. Vol. 191. P. 305–327.
18. Dickinson W.R., Suezek C.A. Plate tectonics and sandstone composition // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 1979. Vol. 63, N 12. P. 2164–2182.
19. Garzanti E., Ando S. Plate tectonics and heavy mineral suites of modern sands // Heavy Minerals in Use. Developments in sedimentology. 2007. Vol. 58. P. 741–764.
20. Markevich P.V., Malinovsky A.I., Tuchkova M.I., Sokolov S.D., Grigoriev V.N. The use of heavy minerals in determining the provenance and tectonic evolution of Mesozoic and Cenozoic sedimentary basins in the continent – Pacific Ocean transition zone: examples from Sikhote-Alin and Koryak-Kamchatka Regions (Russian Far-East) and Western Pacific // Heavy Minerals in Use. Developments in sedimentology. 2007. Vol. 58. P. 789–822.
21. Maynard J.B., Valloni R., Yu H.-S. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins // Trench-forearc geology: sedimentation and tectonics on modern and ancient active plate margins / ed. J.K. Leggett. Oxford, 1982. Pt 2. P. 551–561.
22. Nechaev V.P., Isphording W.C. Heavy-mineral assemblages of continental margins as indicators of plate tectonic environments // J. Sed. Petrol. 1993. Vol. 63, N 6. P. 1110–1117.
23. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. Vol. 299. P. 715–717.
24. Nisbet E.G., Pearce J.A. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings // Contrib. Mineral. Petrol. 1977. Vol. 63. P. 149–160.
25. Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio // J. Geol. 1986. Vol. 94, N 5. P. 635–650.
26. Roser B.P., Korsch R.J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data // Chem. Geol. 1988. Vol. 67. P. 119–139.
27. Taylor S.R., McLennan S.M. Planetary crusts: Their composition, origin and evolution. Cambridge: Univ. Press, 2009. 378 p.