

Геохимия нижнемеловых терригенных отложений Северного Сихотэ-Алиня и их палеогеодинамическая природа

©2022 А. И. Малиновский✉

*ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН,
пр. 100-летия Владивостока 159, 690022, Владивосток, Российская Федерация*

Аннотация

Введение: Изучение и интерпретация геохимических особенностей терригенных пород дает объективную информацию о характере процессов выветривания, переноса и захоронения материала, а также об источниках питания и палеогеодинамической природе бассейнов седиментации. Раннемеловое время – важнейший этап развития геологических структур востока Евразийского континента. Отложения раннего мела, слагающие эти структуры, занимают более половины площади хребта Сихотэ-Алинь. Геохимически осадочные породы региона изучены крайне слабо, что не позволяет судить об их геодинамической природе. Цель исследования: детальное изучение и анализ геохимических особенностей обломочных пород Северного Сихотэ-Алиня, ориентированное на выяснение состава пород областей питания и восстановление обстановок осадконакопления.

Методика: Объектами исследований были выбраны два участка, что объясняется расположением на их территории практически непрерывных разрезов нижнемеловых отложений. Петрографический состав пород изучался в шлифах с помощью поляризационных микроскопов. Содержания петрогенных элементов определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометрах iCAP 6500 Duo, СРМ-25 и VRA-30. Концентрации редких и редкоземельных элементов – методом плазменной спектроскопии (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500с.

Результаты и обсуждение: Данные, полученные в результате геохимических исследований, свидетельствуют, что изученные песчаники являются граувакками, и лишь некоторая их часть лититовыми аренидами. Они образовались преимущественно за счет физического разрушения пород источников сноса, что обусловило низкий уровень их "зрелости", химическое же выветривание играло второстепенную роль. Геохимические особенности свидетельствуют о принадлежности пород к петрогенным разностям, прошедшим один цикл переотложения и формировавшимся без существенной литодинамической переработки и сортировки обломочного материала.

Заключение: Интерпретация результатов показывает, что седиментация происходила в бассейне, пространственно и генетически связанном с крупным трансформным сдвигом, разграничивавшим Евразийский континент и прилегающую океаническую плиту. Область денудации объединяла континентальную сушу, сложенную гранитно-метаморфическими комплексами, зрелую, сильно эродированную окраинно-континентальную дугу, поставившую как кислый материал ее фундамента, так и основную-среднюю вулканокластическую. Размывались также, вероятно, аккреционные призмы Сихотэ-Алиня, содержащие пластины кремней. Все это позволяет относить изученные отложения к Журавлевскому синсдвиговому террейну.

Ключевые слова: Северный Сихотэ-Алинь, ранний мел, геохимия, песчаники, геодинамические обстановки, источники питания.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Малиновский Александр Иванович, e-mail: malinovsky@fegi.ru

Для цитирования: Малиновский А. И. Геохимия нижнемеловых терригенных отложений Северного Сихотэ-Алиня и их палеогеодинамическая природа // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2022. № 4. С. 53–68. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/53-68>

Введение

Развитие и совершенствование современной аналитической базы исследования горных пород, а также разработка достоверных и многократно апробированных методик анализа и интерпретации результатов исследований способствовали значительному развитию геохимических исследований осадочных и, в частности, терригенных пород. Поскольку геохимический состав этих пород, в отличие от их минерального, в процессе постседиментационных превращений осадка практически неизменен, его широкая интерпретация позволяет извлечь достоверную информацию о строении и составе исходных пород областей размыва, своеобразии течения процессов выветривания и переноса кластического материала, динамических обстановках областей осадконакопления, а также о геодинамической природе бассейна седиментации [1–13 и др.].

Раннемеловое время является, пожалуй, важнейшим этапом с которым связано образование и становление многочисленных геологических структур, известных на восточной окраине Евразийского континента. К этому отрезку геологической истории приурочено формирование самых разнообразных седиментационных бассейнов, фрагменты которых являются основой целого ряда широко распространенных здесь раннемеловых террейнов: океанических, островодужных, аккреционных, трансформных синсдвиговых [14–17 и др.]. Эти террейны играют важнейшую роль в геологической структуре хребта Сихотэ-Алинь (юг Дальнего Востока России) и занимают более половины его площади.

На территории хребта Сихотэ-Алинь нижнемеловые отложения в геохимическом отношении изучены крайне неравномерно. Наиболее детально исследован состав раннемеловых террейнов Южного и Западного Сихотэ-Алиня – Кемского, Журавлевского, Таухинского, Наданьхада-Бикинского [15, 16, 18–20]. Проведенные на этих объектах геохимические исследования осадочных пород позволили получить ценную информацию о составе исходных пород областей сноса, а также о палеотектонических, палеогеографических и, частично, палеоклиматических обстановках формирования отложений, связанных с самыми разнообразными по происхождению бассейнами седиментации. На Северном Сихотэ-Алине исследования подобного рода малочисленны. Здесь изучены лишь отложения мела Киселевско-Маноминского террейна (район оз. Удыль) [21] и Комсомольского (Пиванского) разреза – северного фрагмента Журавлевского террейна [22]. Очевидно, что слабая геохимическая изученность от-

ложений такой громадной территории не позволяет с уверенностью говорить об их геодинамической природе и, соответственно, о принадлежности к тому или иному типу террейнов. Для восполнения этого пробела в статье рассмотрены результаты изучения строения разрезов отложений, петрографического и геохимического состава пород, а также осуществлена палеогеодинамическая интерпретация полученных данных. Это позволило выяснить состав областей питания и установить палеогеодинамическую природу нижнемеловых терригенных отложений Северного Сихотэ-Алиня.

Фактический материал и методы исследования

В качестве объектов исследований нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня были выбраны два участка, где эти отложения представлены в полном объеме: берриас-барремские толщи изучены в районе п. Высокогорный, где они располагаются в междуречье Мули и Удоми, а готерив-аптские – в бассейне реки Бута и ее левого притока руч. Мопау (рис. 1). Выборы участков обусловлен тем, что на относительно небольших территориях расположены практически непрерывные естественные и искусственные обнажения, что позволило составить и опробовать полный разрез нижнемеловых терригенных отложений, известных в северной части хребта Сихотэ-Алинь. Образцы и пробы пород отобраны в береговых обнажениях рек Бута, Мули, Мулинка, ручьев Мопау, Дополнительный, Сакай-Бапу, Ветвистый, а также в карьерах и выемках вдоль автомобильных дорог и железной дороги Комсомольск-на-Амуре – Совгавань.

Исследования основаны на собственных материалах автора, полученных при геохимических исследованиях песчаных пород, наиболее информативных при выяснении состава и типа пород, слагающих области денудации, а также геодинамической обстановки при формировании бассейнов осадконакопления [4, 5, 11, 12, 23]. Кроме того, в качестве дополнительных использовались результаты изучения содержания редких и редкоземельных элементов (РЗЭ) в глинисто-алевритовых породах. Для исследований отбирались породы, меньше всего подвергнутые вторичным изменениям.

Всего различными методами изучено и проанализировано более 100 образцов и проб терригенных пород (включая алевриты), в 88 шлифах песчаников подсчитаны порообразующие компоненты, в 85 пробах были установлены содержания петрогенных элементов, а в 77 определены концентрации редких и РЗЭ. Петрографический состав пород исследовался с помощью поляризационного микроскопа Axioplan 2 imaging (Carl Zeiss, Германия). Петрогенные элементы определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометрах 7600 Duo (ИСП-АЭС) (Thermo Scientific, США) и VRA-30 (Carl Zeiss, Германия) в лабораториях аналитической химии и рент-

геновских методов Аналитического центра (ЦКП) ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) и лаборатории рентгеноспектрального анализа СВКНИИ ДВО РАН (г. Магадан). Анализ микроэлементного состава выполнен на квадрупольном масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP-MS) Agilent 7500c (Agilent Technologies, Япония) Аналитического цен-

тра (ЦКП) ДВГИ ДВО РАН и Elan DRC II PerkinElmer (PerkinElmer Life And Analytical Sciences, Inc., США) Хабаровского инновационно-аналитического центра ИТиГ ДВО РАН. Аналитики Д.В. Авдеев, Л.С. Боковенко, Т.Д. Борходоева, Е.В. Волкова, Е.В. Еловский, В.И. Мануилова, Е.А. Ткалина, Н.В. Хуркало.

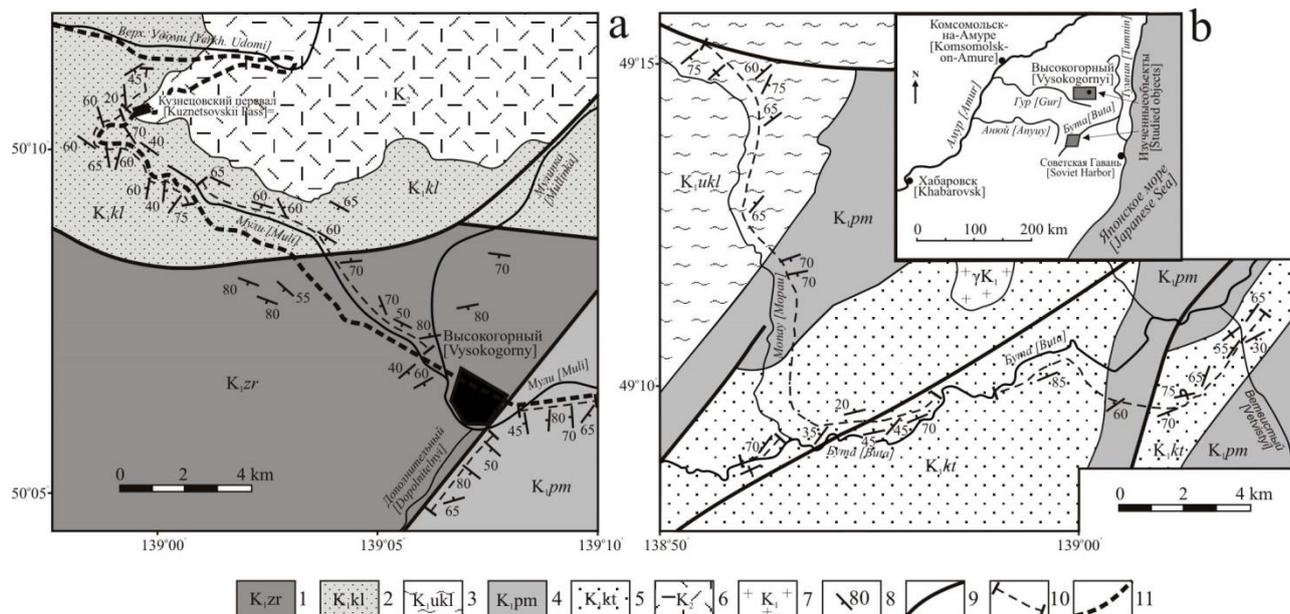


Рис. 1. Геологические карты изученных районов распространения нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня: *a* – район п. Высокогорный; *b* – бассейн р. Бута. 1–5 – свиты: 1 – журавлевская (K_{1zr}), 2 – ключевская (K_{1kl}), 3 – усть-колумбинская (K_{1ukl}), 4 – приманкинская (K_{1pm}), 5 – каталевская (K_{1kt}); 6 – позднемеловые вулканиты (K_2); 7 – раннемеловые граниты (γK_1); 8 – элементы залегания пород; 9 – разломы; 10 – линии изученных разрезов; 11 – железная дорога.

[Fig. 1. Geological maps of the studied areas of distribution of Lower Cretaceous deposits in the Northern Sikhote-Alin: (*a*) – area around Vysokogorny settlement; (*b*) – basin of the Buta river. (1–5) – ormatations: (1) – Zhuravlevskaya (K_{1zr}), (2) – Klyuchevskaya (K_{1kl}), (3) – Ust-Kolombinskaya (K_{1ukl}), (4) – Primankinskaya (K_{1pm}), (5) – Katallevskaya (K_{1kt}); (6) – Late Cretaceous volcanites (K_2); (7) – Early Cretaceous granites (γK_1); (8) – altitudes of rocks; (9) – faults; (10) – lines of the studied sections; (11) – railway.]

Геологическая позиция и основные черты строения отложений

На тектонической карте Дальнего Востока России рассматриваемые участки развития нижнемеловых отложений приурочены к зоне сопряжения разновозрастных (раннемеловых) террейнов-островодужного Кемского и синдвигового турбидитового Журавлевского [14, 15, 24]. Отложения неоднократно относились к тому или иному террейну [24–26], но только по геологическим данным однозначно определить их принадлежность было затруднительно, поскольку породы террейнов в этом регионе имеют близкий литологический состав (алевролиты, алевроаргиллиты, реже песчаники, пачки ритмичного переслаивания), практически не содержат горизонтов вулканитов, а также обладают схожими стилями дислокаций.

Берриас-аптские отложения изученного региона, имеющие общую мощность свыше 6500 м, сложены терригенными породами морского генезиса – песчаниками, алевролитами, аргиллитами, многочисленными пачками их ритмичного переслаивания, прослоями и линзами конгломератов, гравелитов и микститов. По-

роды нарушены многочисленными разломами, сильно дислоцированы, расланцованы и будинированы [24].

Разрез нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня расчленяется на 5 согласно лежащих свит: журавлевскую, ключевскую, усть-колумбинскую, приманкинскую и каталевскую. Строение и состав отложений следующие (рис. 2).

В основании видимого разреза отложений залегает журавлевская свита (берриас–валанжин), выходы которой установлены в районе п. Высокогорный. Свита, общей мощностью более 1000 м, сложена преимущественно алевролитами и аргиллитами, содержащими прослой мелкозернистых песчаников, а также пачки ритмичного переслаивания (ритмопачками) песчаников и алевролитов. Пачки имеют различную мощность элементарных ритмов (от 1–10 см до 20–30 см). Величина соотношения в пачках песчаников и алевролитов (п/а) также в значительной степени варьируют, при этом, как правило, преобладают алевролиты, мощность которых достигают 30 см, а соотношение п/а колеблется от 1/2 до 1/5. Пачки с равным либо обратным соотношением редки. Лежащая выше

валанжинская ключевская свита, мощность которой в районе п. Высокогорный достигает более 1600 м, сложена в основном ритмопачками песчаников и алевролитов. Монотонная толща переслаивания лишь изредка прерывается прослоями алевролитов и песчаников. В пачках переслаивания отмечаются ритмы самой различной мощности и соотношения п/а. В пачках, мощность ритмов в которых невелика (от 1–6 см до 10–15 см), песчаники и алевролиты обычно находятся в равном соотношении. В пачках с мощностью ритмов 20–50 см в основном преобладают песчаники, толщина которых иногда достигают 40 см. Соотношение п/а в таких случаях составляет 2/1–5/1.

Разрез нижнемеловых отложений наращивается на участке, расположенном в бассейне р. Бута. Он начинается готеривской усть-колумбинской свитой, мощность которой в изученном районе достигает 800 м. Свита сложена разнозернистыми песчаниками, содержащими горизонты алевролитов, прослои и линзы мелкогалечных конгломератов, гравелитов и микститов, а также довольно редкие пачки ритмичного переслаивания. Пачки имеют ритмы самой различной мощности: от 3–7 см до 25–35 см, но чаще всего 10–15 см. Отношение песчаник/алевролит от 2/1 до 10/1, иногда равное. Готерив–барремская приманкинская свита имеет схожий литологический состав на обоих изученных участках. Она сложена, главным образом, массивными и слоистыми алевролитами и аргиллитами, содержащими редкие пласти разнозернистых песчаников и микститов, а также маломощные ритмопачки тонкого переслаивания с мощностью ритмов от 1–7 см до 10–20 см, иногда до 30–50 см. Песчаники обычно резко преобладают: отношение п/а достигает 10/1–20/1. Мощность свиты превышает 1600 м. Облик венчающей разрез каталевской свиты (апт) определяется чередованием мощных пластов песчаников (до 300 м) и ритмопачек мощностью 20–150 м. Значительно реже встречаются пласти алевролитов и линзы гравелитов. Мощности ритмов в пачках переслаивания обычно 5–10 см, иногда до 40–50 см. Соотношение п/а в них примерно равное и лишь иногда преобладают тот или иной компонент. Мощность свиты достигает 1500 м. Таким образом, особенностями строения и состава берриас – аптских отложений, изученных в северной части хребта Сихотэ-Алинь, являются: 1) исключительно терригенный состав пород, без какого-либо заметного присутствия синседиментационных вулканических образований; 2) участие в строении разреза многочисленных пачек ритмичного переслаивания; 3) значительная (до 6500 м) мощность.

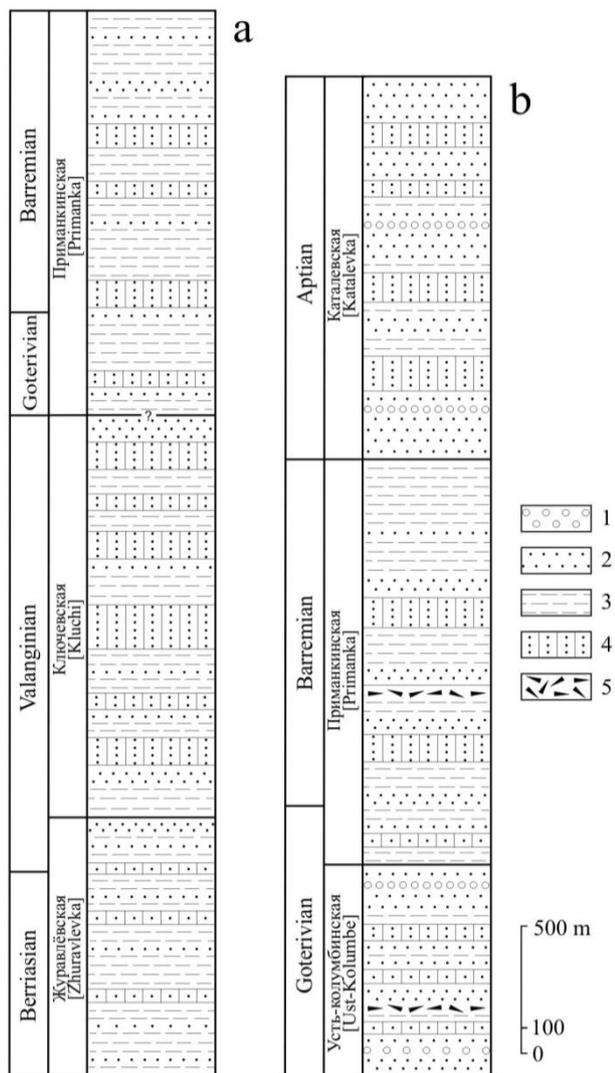


Рис. 2. Литолого-стратиграфические колонки нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня: *a* – район п. Высокогорный; *b* – бассейн р. Бута. 1 – конгломераты и гравелиты; 2 – песчаники; 3 – алевролиты и аргиллиты; 4 – ритмичное переслаивание песчаников и алевролитов; 5 – микститы.

[Fig. 2.] Lithologic and stratigraphic columns of Lower Cretaceous deposits within the Northern Sikhote-Alin: (*a*) – area around Vysokogorny settlement; (*b*) – basin of the Buta river. (1) – conglomerates and gravelstones; (2) – sandstones; (3) – siltstones and mudstones; (4) – rhythmic alternating of sandstones and siltstones; (5) – mixtites.]

**Результаты исследований
Петрографический состав песчаных пород**

Поскольку геохимические особенности песчаных пород во многом определяют их петрографическим составом, приведем краткое его описание. Песчаники во всех изученных свит в основном мелко- и среднесаммитовой размерности, породы с крупносаммитовой размерностью зерен встречаются заметно реже. Сортировка материала, как правило, средняя и хорошая, но в крупносаммитовых разностях она значительно ухудшается и, кроме того, в них часто встречаются рассеянные по всей толще породы мелкие (до 3 см) остроугольные обрывки глинистых пород. Песчаные зерна обычно изометричные и удлиненные, а по форме – угловато-окатанные, реже угловатые и окатанные. Наиболее хорошо окатаны зерна кремнистых и осадочных пород, а наименее – вулканических.

По порообразующим компонентам все песчаники изученных свит однотипны и относятся к полимиктовым. Обломочная часть, занимающая

70–90% объема породы, состоит из кварца, полевых шпатов, биотита, обломков кварцитов, эффузивных, терригенных и кремнистых пород, а также рудных минералов. По классификации В. Д. Шутова [27] (рис. 3) песчаники классифицируются как кварцево-полевошпатовые и полевошпатово-кварцевые граувакки. Содержание кварца в песчаниках колеблется от 28 до 41 %. Преобладает монокристаллический кварц часто с волнистым погасанием, поликристаллический кварц редок либо отсутствует. Содержание полевых шпатов в песчаниках колеблется в пределах 24–43 %. Среди них наиболее обычны кислые плагиоклазы (до 90 % всех полевых шпатов), встречающиеся в виде короткопризматических и таблитчатых кристаллов, либо зерен неправильной формы. Калиевые полевые шпаты представлены изометричными, в различной степени пелитизированными зернами ортоклаза и, иногда, решетчатого микроклина, в сумме не превышающих 10–13 %. Содержание основных и средних плагиоклазов невелико. Обломков пород в сумме от 25 до 45 % всех зерен. Это преимущественно кремнистые (до 25 %), терригенные (до 23 %) и вулканические (до 16 %) породы. Редки обломки кварцитов и кварц-серицитовых сланцев.

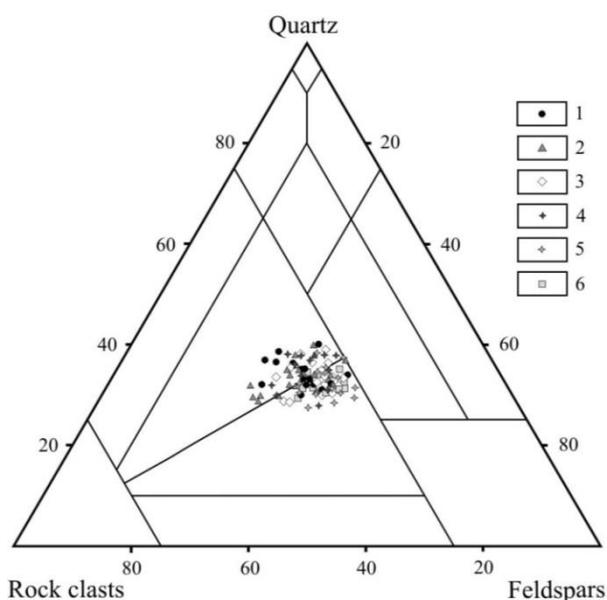


Рис. 3. Породообразующие компоненты песчаников изученных свит [27]. Свиты: 1 – журавлевская; 2 – ключевская; 3 – усть-колумбинская; 4–5 – приманкинская; 4 – район п. Высокогорный, 5 – бассейн р. Бута; 6 – каталевская.

[Fig. 3. Rock-forming components of sandstones within the studied formations [27]. Formations: (1) – Zhuravlevskaya; (2) – Klyuchevskaya; (3) – Ust-Kolombinskaya (4–5) – Primankinskaya: (4) – area around Vysokogorny settlement, (5) – basin of the Buta river; (6) – Katalevskaya.]

Таким образом, петрографические особенности изученных песчаных пород позволяет предполагать, что размывавшаяся область питания была гетерогенной и объединяла сложный комплекс кремнистых, терригенных, гранитно-метаморфических и вулка-

нических пород. Достаточно высокие содержания кварца и плагиоклазов свидетельствует о доминировании в ее составе кислых изверженных пород. Вместе с тем, присутствие обломков кремнистых и кремнисто-глинистых пород указывает на присутствие в области размыва фрагментов аккреционных призм, широко распространенных в современной структуре Северного Сихотэ-Алиня.

Геохимическая характеристика песчаных пород

По химическому составу песчаники изученных свит достаточно близки (табл. 1). В породах свит, развитых в районе п. Высокогорный, лишь несколько выше содержания SiO_2 , варьирующие в среднем по свитам от 74.71 % до 76.43 %. В несколько более молодых песчаниках бассейна р. Бута они изменяются в среднем от 70.34 % до 72.65 %. Помимо этого, в породах, обнажающихся в районе п. Высокогорный, немногим ниже содержания TiO_2 (0.38–0.40 % и 0.41–0.46 %, соответственно), Al_2O_3 (9.95–11.86 % и 13.66–14.64 %), MgO (0.87–0.96 % и 0.69–1.05 %) и CaO (0.80–0.91 % и 1.00–1.14 %), но выше $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (3.44–4.15 % и 2.53–3.02 %). В целом, несмотря на некоторые незначительные различия, вероятно объясняющиеся влиянием местных источников сноса, все изученные песчаники по содержанию петрогенных элементов занимают промежуточное положение между граувакками и лититовыми аренидами (или субграувакками), отличаясь от "среднего" состава последних пониженным содержанием кремнекислоты, но повышенным TiO_2 , Al_2O_3 , MgO и суммарного железа [28]. Помимо этого, во всех песчаниках Na_2O преобладает над K_2O (2.85–3.86 % и 1.81–2.95 % соответственно), что свойственно грауваккам [28]. На классификационной диаграмме $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})-\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ [29] (рис. 4а) изученные песчаники определяются как граувакки и лишь небольшая часть из них (главным образом породы журавлевской, ключевской и приманкинской свит района п. Высокогорный) попадает в поле лититовых аренидов или субграувакк – петрографическому типу песчаных пород, занимающему промежуточное положение между граувакками и аркозами. На классификационной диаграмме Si–Al–Fe [30] (рис. 4б) фигуративные точки песчаников, располагаясь вдоль линии гранит-базальт, в основном соответствуют субграуваккам и, лишь частично, аркозам и грауваккам, а их состав близок к составу гранита.

Использование ряда геохимических показателей (модулей) (см. табл. 1) дает возможность получить объективную информацию о составе слагающих область размыва комплексах материнских пород, о роли и интенсивности процессов физического и химического выветривания, литогенной либо петрогенной природе осадков. Также возможно более корректная палеорекострукция ранее существовавших обстановок седиментации [1, 2, 4, 31–35 и др.).

Табл. 1. Средние содержания петрогенных (масс. %) элементов в песчаниках изученных свит
[Table 1. Average contents of petrogenic (wt. %) elements in sandstones of the studied formations]

Компонент [Component]	1	2	3	4	5	6
n	14	32	14	9	13	16
SiO ₂	74.77	75.63	72.38	76.43	72.65	70.34
TiO ₂	0.39	0.41	0.41	0.40	0.43	0.46
Al ₂ O ₃	11.74	10.51	13.70	9.95	13.66	14.64
Fe ₂ O ₃	1.63	3.11	1.72	1.60	1.25	2.27
FeO	2.00	0.81	0.80	1.84	1.58	0.75
MnO	0.06	0.06	0.04	0.06	0.06	0.08
MgO	1.01	1.15	1.05	0.94	0.69	0.95
CaO	0.90	0.83	1.02	0.83	1.00	1.14
Na ₂ O	2.85	3.03	3.86	3.13	3.50	3.83
K ₂ O	2.11	1.98	2.81	2.12	2.73	2.95
P ₂ O ₅	0.20	0.15	0.13	0.13	0.18	0.16
п.п.п.	0.13	0.15	0.05	0.12	0.13	0.21
H ₂ O	1.97	1.96	1.80	2.04	1.98	2.04
Сумма	99.77	99.79	99.77	99.74	99.83	99.82
ГМ	0.21	0.20	0.23	0.18	0.23	0.26
ТМ	0.032	0.039	0.030	0.040	0.032	0.031
ФМ	0.06	0.07	0.05	0.06	0.05	0.06
ЖМ	0.30	0.39	0.18	0.39	0.21	0.21
НКМ	0.42	0.45	0.49	0.53	0.46	0.46
СИА	58	55	55	53	56	56
WIP	51	51	64	52	60	65

Примечание: n – количество анализов. Свиты: 1 – журавлевская, 2 – ключевская, 3 – усть-колумбинская; 4–5 – приманкинская: 4 – район п. Высокогорный, 5 – бассейн р. Бута; 6 – каталевская.
 [Note: n is the number of analyses. Formations: (1) – Zhuravlevskaya; (2) – Klyuchevskaya; (3) – Ust-Kolombinskaya; (4–5) – Primankinskaya: (4) – area around Vysokogorny settlement, (5) – basin of the Buta river; (6) – Katalevskaya.]

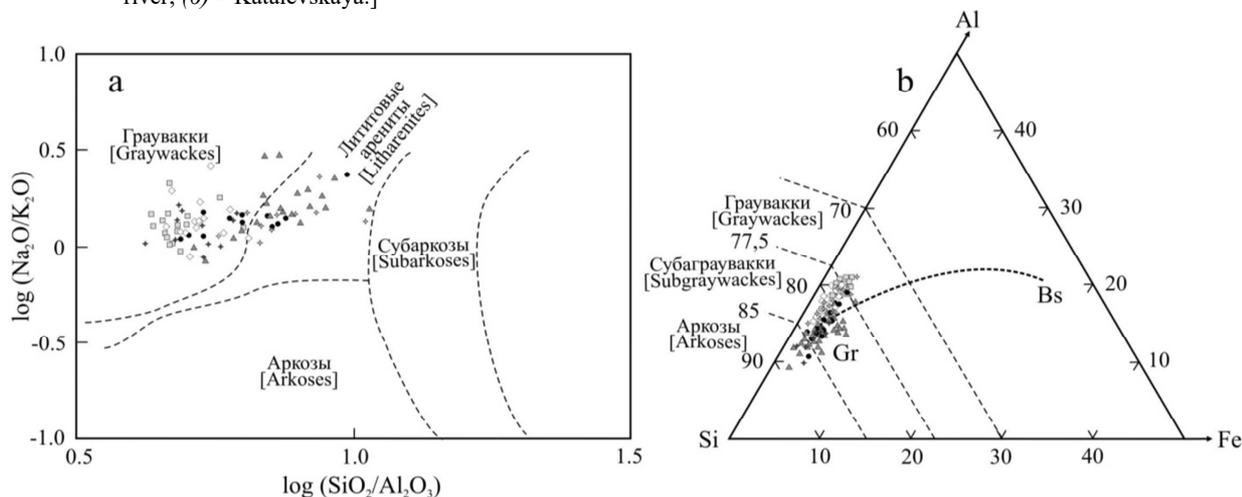


Рис. 4. Классификационные диаграммы для песчаников изученных свит: а – $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})-\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ [29]; б – Si–Al–Fe [30]. Линия Gr–Bs – гранит–базальтовый тренд. Условные обозначения см. на рис. 3.
[Fig. 4. Classification diagrams for sandstones of the studied formations: (a) – $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})-\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ [29]; (b) – Si–Al–Fe [30]. The Gr–Bs line stands for a granite-basalt trend. Legend see in Fig. 3.]

Абсолютные содержания породообразующих оксидов в терригенных породах определяется не только минеральным составом их обломочной части, но и зависит от их "зрелости", т.е. степени химического выветривания материнских пород областей питания. Уровень "зрелости" песчаных пород определяется величиной гидролизатного модуля ($\text{ГМ}=(\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiO}_2+$

$\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{FeO}+\text{MnO})/\text{SiO}_2$) [34]. Для песчаников мела Северного Сихотэ-Алиня его значения в среднем по свитам невелики и изменяются от 0.18 до 0.26, что свидетельствует об их невысокой "зрелости" и образовании за счет физического разрушения исходных пород при незначительном влиянии процессов химического выветривания. Невысокая степень выветри-

вания пород отражается также в низких значениях индекса химического изменения ($CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO + Na_2O + K_2O)] \times 100$) [35], в среднем по свитам незначительно варьирующих от 53 до 58, и высоких – индексов выветривания ($WIP = 100 \times (2 \times Na_2O / 0.35 + MgO / 0.9 + 2 \times K_2O / 0.25 + CaO / 0.7)$) [36], изменяющихся от 51 до 65, что в целом свидетельствует о преобладании в составе палеоводосборов геохимически «незрелых», слабо выветрелых пород (рис. 5) [37].

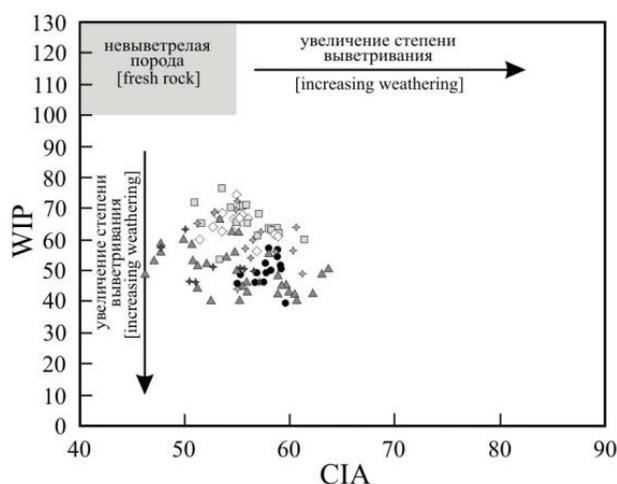


Рис. 5. Диаграмма степени химического выветривания CIA–WIP для изученных песчаников [37]. Условные обозначения см. на рис. 3.

[Fig. 5. Diagram of the degree of chemical weathering of CIA–WIP for the studied sandstones [37]. Legend see in Fig. 3.]

Величина фемического модуля ($FM = (Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO) / SiO_2$) в значительной степени зависит от содержания в терригенных отложениях продуктов гидролиза и кремнезема, что в целом позволяет распознавать среди песчаников граувакки и аркозы [34]. По этому показателю песчаники Северного Сихотэ-Алиня в основном соответствует грауваккам, либо незначительно отклоняются в сторону аркозов (0.05–0.07). Такие значения FM хорошо согласуются с низким содержанием в песчаниках обломков основных вулканитов и высоким – кварца, кремнистых и других кремнесодержащих пород.

Модуль нормированной щелочности ($NKM = Na_2O + K_2O / Al_2O_3$) позволяет распознавать в осадочных породах примесь вулканокластики и, соответственно, также помогает различать аркозы и граувакки [33, 34]. Относительно высокие значения в изученных песчаниках NKM (0.42–0.53) также свидетельствуют об их промежуточном положении между граувакками и аркозами и объясняются присутствием в породах достаточно большого количества слюд, полевых шпатов и обломков кислых изверженных пород. Значения железного (ЖМ = $(Fe_2O_3 + FeO + MnO) / (TiO_2 + Al_2O_3)$) и титанового (ТМ = TiO_2 / Al_2O_3) модулей позволяют судить о составе материнских пород областей сноса [34]. В рассматриваемых песчаниках эти значения невысоки (0.18–0.39 и 0.030–0.040 соответственно), что объясняется преобладанием в областях палеоводосборов кис-

лых изверженных пород имеющих, в свою очередь, низкие значения ЖМ и ТМ. Влияние же на осадконакопление основной вулканокластики было незначительным. Следует отметить, что по всем приведенным показателям изученные песчаники очень близки песчаникам из раннемелового синдвигового Журавлевского террейна Сихотэ-Алиня [18].

Величины полученных литохимических модулей, а также положение их фигуративных точек на ряде модульных диаграмм (положительная корреляция между парами модулей ФМ–ТМ, ФМ–ЖМ и отрицательная либо ее отсутствие между другими парами) (рис. 6) [33, 34], свидетельствует о петрогенной природе изученных пород. Они прошли один цикл перетолжения, и формировались без существенной литодинамической переработки и сортировки обломочного материала.

Заметную помощь в выяснении породного состава источников питания и определении геодинамической обстановки осадконакопления оказывает исследование концентраций и особенностей распределения в терригенных породах редких и редкоземельных (РЗЭ) элементов. Изучались как песчаные, так и глинисто-алевритовые породы, поскольку содержания и характер распределения микроэлементов в них близки. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Для изученных песчаных и глинисто-алевритовых пород характерны относительно невысокие уровни содержания РЗЭ, суммы которых в среднем по свитам варьируют от 123 г/т до 149 г/т, что меньше или близко к среднему его значению для верхней континентальной коры (146.4 г/т) [12]. Кроме того, породам свойственны умеренно дифференцированные графики нормированных к хондриту [38] концентраций РЗЭ со сравнительно невысокой степенью обогащения легкими лантаноидами относительно тяжелых (LaN/YbN от 7.70 до 12.03), а также отчетливо проявленная отрицательная европиевая аномалия (Eu/Eu* от 0.54 до 0.60). Сравнение концентраций и характера распределения РЗЭ в изученных породах с постархейским австралийским средним глинистым сланцем (PAAS) [12] показывает, что все они незначительно обеднены как легкими, так и тяжелыми элементами (в 1.1–2.1 раза), что может свидетельствовать об отсутствии либо малозначительном участии основного и ультраосновного материала в формировании отложений. (рис. 7)

Палеогеодинамическая интерпретация полученных результатов

Палеогеодинамическая интерпретация полученных данных по геохимическому составу раннемеловых песчаников Северного Сихотэ-Алиня осуществлялась с помощью ряда дискриминантных диаграмм, в основу построения которых положен ряд индикаторных пороодообразующих оксидов, микроэлементов и их соотношений, что позволило авторам диаграмм выделить поля, соответствующие различным типам источников сноса и геодинамических обстановок накопления терригенной кластики [5–11 и др.].

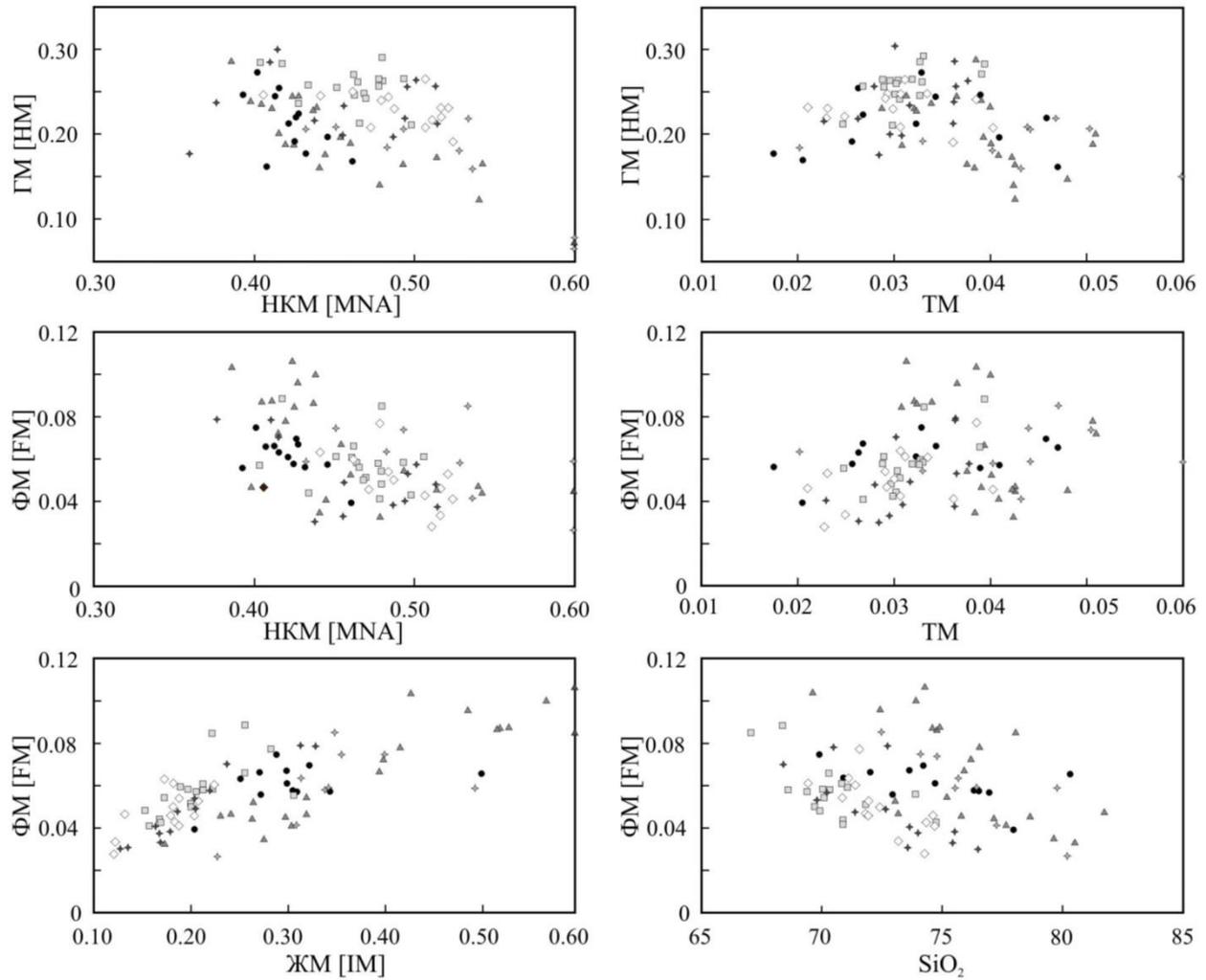


Рис. 6. Модульные диаграммы для изученных песчаников [33, 34]. Условные обозначения см. на рис. 3.
[Fig. 6. Modular diagrams for the studied sandstones [33, 34]. Legend see in Fig. 3.]

Табл. 2. Средние содержания редких и редкоземельных элементов (г/т) в терригенных породах изученных свит
[Table 2. Average content of rare and rare earth elements (g/t) in terrigenous rocks of the studied formations]

Компонент [Component]	1	2	3	4	5	6
n	10	30	14	13	2	8
l	2	3	4	5	6	7
Li	13.96	32.48	33.41	33.38	40.02	54.54
Be	1.26	1.44	-	1.36	-	-
Sc	7.78	10.02	7.47	10.40	7.33	7.78
V	61.30	70.93	55.83	66.02	54.67	63.65
Cr	53.84	67.86	52.49	53.58	54.83	55.25
Co	9.81	9.45	10.40	6.44	16.81	17.15
Ni	24.83	19.46	19.45	18.12	14.37	18.82
Cu	22.15	25.05	19.89	20.31	85.55	21.89
Zn	69.05	139.52	-	89.89	-	-
Ga	14.54	15.93	16.43	15.80	17.79	17.65
Rb	76.16	116.22	103.11	106.48	106.32	99.35
Sr	124.93	130.15	159.20	116.71	191.50	170.77
Y	16.21	17.36	15.71	16.60	13.38	13.32
Zr	165.24	114.44	77.55	156.46	82.84	68.16
Nb	9.10	9.69	9.54	9.48	8.92	9.11
Mo	0.94	0.74	1.14	0.59	0.69	0.67

Продолжение Табл. 2

[Continued Table 2]

1	2	3	4	5	6	7
Sn	2.85	5.92	-	2.69	-	-
Cs	5.25	14.74	12.86	6.21	11.37	14.60
Ba	430.30	519.68	424.19	455.14	634.16	514.04
La	22.85	25.73	27.71	28.21	27.72	28.10
Ce	51.65	60.57	58.95	64.85	61.42	61.06
Pr	5.79	6.22	6.88	6.87	6.97	7.00
Nd	23.55	25.67	24.96	27.83	24.48	24.34
Sm	4.73	4.95	4.68	5.25	4.56	4.45
Eu	0.85	0.96	0.89	0.95	0.96	0.88
Gd	4.42	5.35	4.70	5.32	4.72	4.57
Tb	0.61	0.67	0.62	0.67	0.60	0.59
Dy	3.76	3.82	3.15	3.70	3.04	2.91
Ho	0.69	0.70	0.61	0.71	0.60	0.57
Er	1.97	2.09	1.73	2.10	1.77	1.66
Tm	0.29	0.28	0.25	0.29	0.27	0.25
Yb	1.96	1.95	1.62	2.03	1.74	1.60
Lu	0.28	0.28	0.25	0.28	0.27	0.25
Hf	2.47	3.70	-	3.70	-	-
Ta	0.47	0.66	-	0.63	-	-
Pb	21.88	18.78	28.07	15.37	17.48	17.22
Th	7.64	9.48	10.54	10.36	10.68	9.99
U	1.86	1.77	2.15	1.98	2.23	2.06
Eu/Eu*	0.56	0.58	0.57	0.54	0.60	0.58
La _N /Yb _N	7.70	8.65	11.76	9.14	9.12	12.03

Примечание: n – количество анализов. Свиты: 1 – журавлевская, 2 – ключевская, 3 – усть-колумбинская; 4–5 – приманкинская; 4 – район п. Высокогорный, 5 – бассейн р. Бута; 6 – каталевская. Прочерк – не определялось.

[Note: n is the number of analyses. Formations: (1) – Zhuravlevskaya; (2) – Klyuchevskaya; (3) – Ust-Kolombinskaya (4–5) – Primankinskaya; (4) – area around Vysokogorny settlement, (5) – basin of the Buta river; (6) – Katalevskaya. Dash - not defined.]

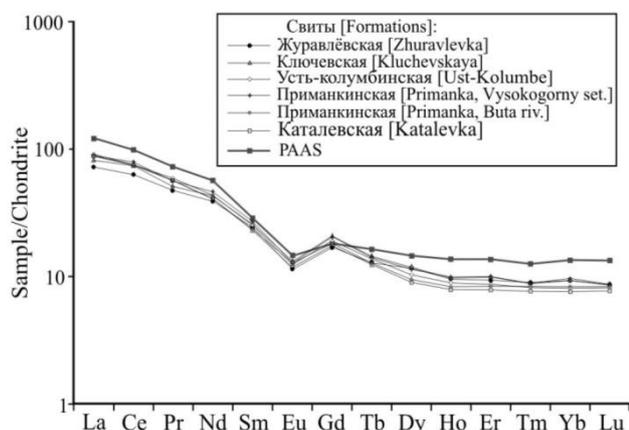


Рис. 7. Спектры распределения РЗЭ, нормированные к хондриту [38], в терригенных породах изученных свит и сопоставление их с PAAS [12].

[Fig. 7. Rare earth elements (REE) distribution spectra normalised by chondrite [38] in terrigenous rocks of the studied formations and their comparison with PAAS [12].]

Геохимические особенности песчаников Северного Сихотэ-Алиня свидетельствуют об их принадлежности к петрогенным грауваккам и, лишь частично, лититовым ареникам. Породы характеризуются невысокой "зрелостью" кластического материала, что свидетельствует об их образовании за счет размыва прак-

тически не претерпевших химического выветривания материнских пород областей сноса. Породам свойственны невысокие и умеренные значения литохимических модулей ФМ, ЖМ, НКМ и ТМ, относительно небольшие уровни концентрации РЗЭ, при незначительной степени обогащенности легкими лантаноидами относительно тяжелых, а также отчетливо проявленная отрицательная европиевая аномалия. Это позволяет предполагать существование источников питания, сложенных как кислыми, так и, в значительно меньшей мере, основными и средними магматическими породами.

Положение фигуративных точек изученных пород на диаграмме, используемой для разделения питающих провинций различных типов и стадий развития островных дуг [9] (рис. 8а), свидетельствует, что отложения сформировавшихся за счет продуктов разрушения континентальной либо сильно расчлененной островной дуги, в которой размывались практически только сохранившиеся кислые магматические породы ее основания. Локализация точек на парных диаграммах F₁-F₂, Hf-La/Th, La/Sc-Th/Co и Zr/Sc-Th/Sc [7, 8, 10, 39] (рис. 8б-е), используемых для установления породного состава источников питания, свидетельствует, что ими были, в основном, кислые изверженные породы. Роль средней и, возможно, основной вулканокластике, как и осадочных пород, обогащен-

ных древними обломочными компонентами, была незначительной. Доля участия в составе пород основных и средних компонентов оценивается по положе-

нию их точек на диаграмме Cr/Th–Th/Sc [40] (рис. 8f). Эта доля, очевидно, не превышала 20–30%, составляя в среднем менее 15 %.

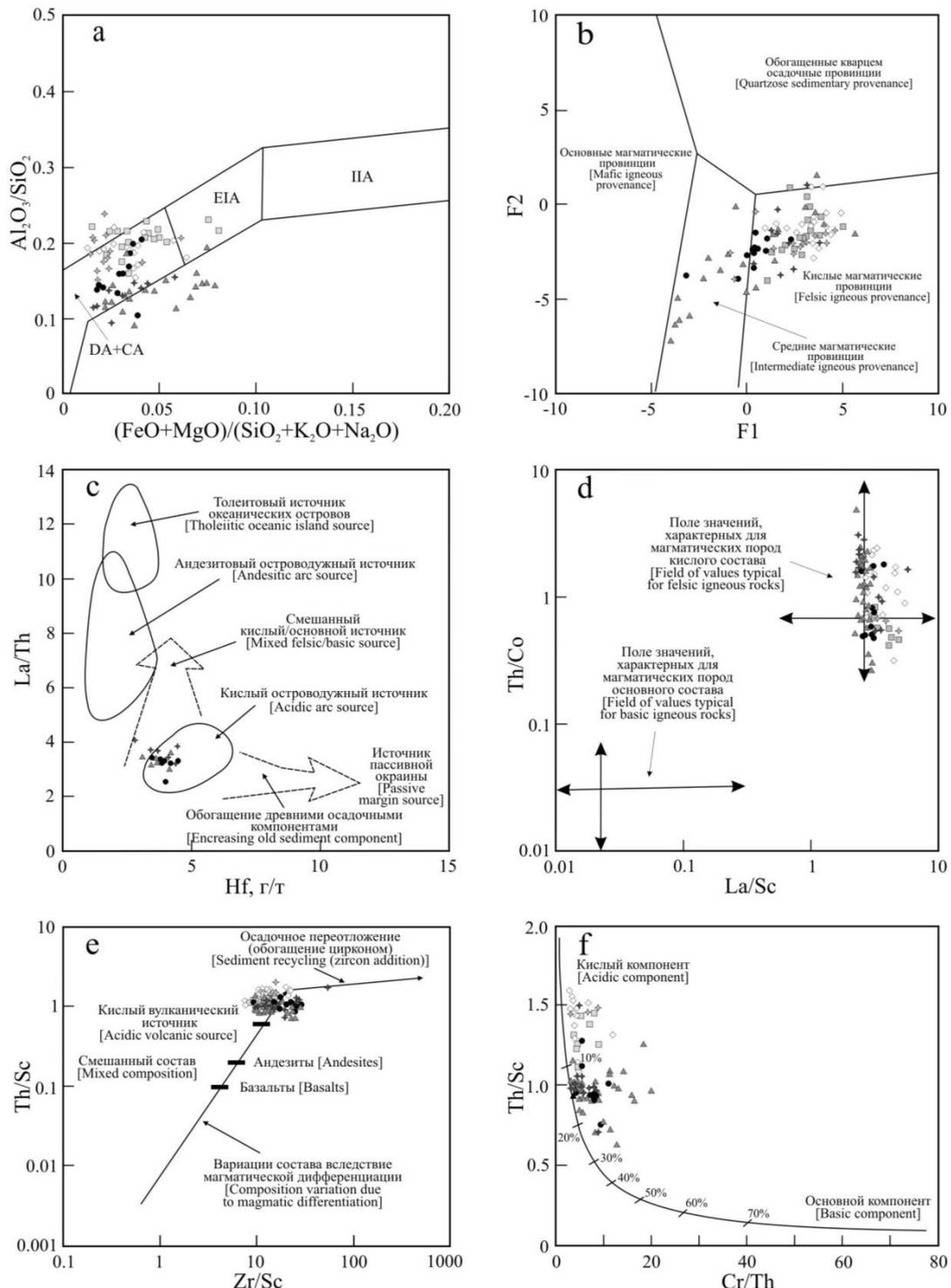


Рис. 8. Возможные источники питания для изученных терригенных отложений: *a* – типы питающих провинций магматических дуг [9]: *IIA* – незрелые океанические островные дуги, *EAI* – развитые, слабо эродированные островные дуги, *DA* – расчлененные островные дуги, *CA* – континентальные островные дуги; *b–e* – вероятный породный состав питающих провинций на диаграммах: *b* – F1–F2 [39]. F1=30.638×TiO₂/Al₂O₃ – 12.541×Fe₂O₃*/Al₂O₃ + 7.329×MgO/Al₂O₃ + 12.031×Na₂O/Al₂O₃ + 35.402×K₂O/Al₂O₃ – 6.382; F2=56.5×TiO₂/Al₂O₃ – 10.879×Fe₂O₃*/Al₂O₃ + 30.875×MgO/Al₂O₃ – 5.404×Na₂O/Al₂O₃ + 11.112×K₂O/Al₂O₃ – 3.89; *c* – Hf–La/Th [8]; *d* – La/Sc–Th/Co [7]; *e* – Zr/Sc–Th/Sc [10]; *f* – доля участия в терригенных породах материала основного-среднего состава [40]. Условные обозначения см. на рис. 3.

[Fig. 8. Possible provenance areas for the studied terrigenous deposits. (a) – types of distributive provinces of magmatic arcs [9]: (IIA) – immature oceanic island arcs, (EAI) – developed, weakly eroded island arcs, (DA) – dissected island arcs, (CA) – continental island arcs; (b–e) – probable rock composition of the distributive provinces in the diagrams: (b) – F1–F2 [39]. $F1=30.638 \times TiO_2/Al_2O_3 - 12.541 \times Fe_2O_3^*/Al_2O_3 + 7.329 \times MgO/Al_2O_3 + 12.031 \times Na_2O/Al_2O_3 + 35.402 \times K_2O/Al_2O_3 - 6.382$; $F2=56.5 \times TiO_2/Al_2O_3 - 10.879 \times Fe_2O_3^*/Al_2O_3 + 30.875 \times MgO/Al_2O_3 - 5.404 \times Na_2O/Al_2O_3 + 11.112 \times K_2O/Al_2O_3 - 3.89$; (c) – Hf–La/Th [8]; d – La/Sc–Th/Co [7]; (e) – Zr/Sc–Th/Sc [10]; (f) – the share participation of the material of the basic-intermediate composition in terrigenous rocks [40]. Legend see in Fig. 3.]

Таким образом, питающая провинция объединяла древнюю континентальную сушу и глубоко расчлененную окраинно-континентальную (энсиалическую) дугу, в которой в результате эрозии были выведены на поверхность интрузии гранитов, подстилавших вулканиды. Отложения формировались преимущественно за счет разрушения гранитно-метаморфических комплексов суши и фундамента дуги, сильно редуцированные вулканические образования самой дуги играли второстепенную роль. Кроме того, судя по присутствию в обломочной части песчаников фрагментов кремнистых пород, можно предполагать присутствие в области размыва и широко распространенных в Сихотэ-Алине юрско-раннемеловых аккреционных призм, в строении которых участвовали пластины океанические кремни.

Реконструкция палеогеодинамических обстановок накопления нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня по геохимическому составу терригенных пород осуществлялась с использованием серии дискриминантных диаграмм, приведенных на рис. 9. На диаграммах М. Бхатия и А. Крука [5, 6] (рис. 9а–г), используемых для разграничения песчано-алевритовых пород из бассейнов различных геодинамических обстановок, фигуративные точки изученных пород тяготеют, главным образом, к полям седиментационных бассейнов активных континентальных окраин андийского типа. Они включали в себя, с точки зрения разрабатывавших эти диаграммы авторов [5, 11, 23 и др.] и окраины, осложненные сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам. Заметно реже точки попадают в поле бассейнов, связанных с окраинно-континентальными магматическими дугами. Еще более однозначно обстановки соответствующие осадочным бассейнам активных континентальных окраин устанавливаются на диаграмме Si_2O-K_2O/Na_2O [11] (см. рис. 9h), на которой уже все точки компактно лежат в поле бассейнов активных континентальных окраин. На дискриминантной диаграмме DF1–DF2 [13] (см. рис. 9i), которая используется для интерпретации пород с высоким содержанием кремнекислоты ($SiO_2 > 63\%$), точки попадают как в поле островодужных, так и рифтогенных обстановок, при этом последние также включают и обстановки связанные со сдвиговыми (трансформными) границами плит [4, 41].

Обращает на себя внимание положение точек геохимического состава пород на приведенных выше генетических диаграммах. На всех диаграммах точки соответствуют самым разнообразным источникам питания либо геодинамическим обстановкам. Это, вероятно, объясняется тем, что диаграммы разрабатывались достаточно давно (70–90-е годы прошлого

столетия), когда геодинамические обстановки, связанные с режимом крупномасштабного трансформного скольжения литосферных плит, а также поля им соответствующие, еще не выделялись. В целом же, такое «промежуточное» положение точек вероятно и является самым характерным и надежным признаком осадконакопления в бассейнах, трассирующихся вдоль крупных разломов (трансформных сдвигов), разделяющих континентальные и океанические плиты, при этом в область размыва попадают окраины континентов, континентальные дуги и фрагменты аккреционных призм [18].

Заключение

Для выяснения геодинамической обстановки накопления нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня и определения тектонических типов и состава исходных пород вероятных источников питания, были изучены геохимические особенности песчаных и, как дополнительный источник информации, глинисто-алевритовых пород.

По своим геохимическим параметрам породы наиболее соответствуют грауваккам и лишь частично – лититовым аренидам. Песчаники относятся петрогенным или «first cycle» породами лишь одного цикла переотложения. Им свойственен низкий уровень "зрелости" кластики, образовывавшейся в основном за счет механического разрушения пород областей сноса, слабая литодинамической переработка и сортировка материала, а также относительно высокая скорость его захоронения.

Палеогеодинамический анализ полученных геохимических данных позволяет достаточно уверенно предполагать, что в раннемеловое время осадконакопление происходило в обстановке, соответствующей бассейну, пространственно и генетически связанному с крупным сдвигом (трансформным разломом), разделяющим континентальную (Евразийский континент) и океаническую (Изанаги) плиты. Подобным обстановкам соответствуют бассейны Калифорнийской окраины Америки [42].

Область питания, поставившая в этот бассейн кластику, вероятно была гетерогенной. Основным ее источником была континентальная суша, сложенная гранитно-метаморфическими и древними осадочными комплексами. Результаты U–Pb исследований возраста детритовых цирконов из нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня свидетельствуют, что источники сиалической кластики, либо большая их часть, располагались в пределах Северо-Китайского кратона [25]. Следующим по значению источником вещества была зрелая, глубоко расчлененная окраинно-континентальная магматическая дуга, которая

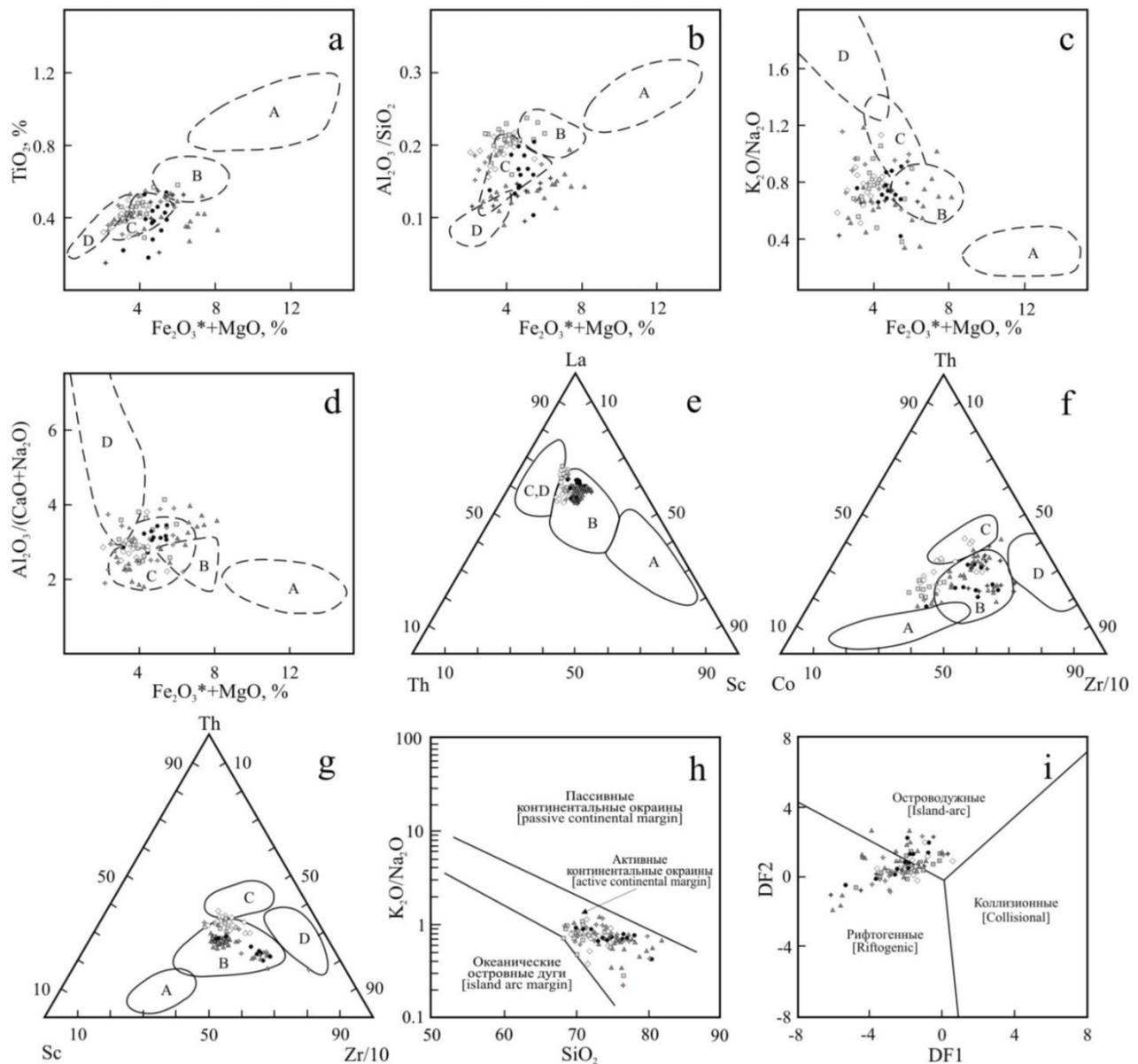


Рис. 9. Палеогеодинамические обстановки формирования изученных терригенных отложений: *a-g* – типы седиментационных бассейнов [5, 6]. Поля значений геохимических параметров древних песчаников из бассейнов, сопряженных: *A* – с океаническими, *B* – с континентальными островными дугами, *C* – с активными, *D* – с пассивными континентальными окраинами. $Fe_2O_3^*$ – общее железо; *h* – бассейновые обстановки для песчано-алевритовых пород [11]; *i* – возможные типы геодинамических обстановок для высококремнистых пород [13]. Условные обозначения см. на рис. 3.

[Fig. 9.] Paleogeodynamic conditions of the formation of the studied terrigenous deposits: (*a-g*) – types of sedimentation basins [5, 6]. Fields of values of geochemical parameters for old sandstones from basins conjugated with: (*A*) – oceanic, (*B*) – continental island arcs, (*C*) – active, (*D*) – passive continental margins. ($Fe_2O_3^*$) total iron; (*h*) – basin environments for sandy-aleuritic rocks [11]; (*i*) – possible types of geodynamic environments for high-silica rocks [13]. Legend see in Fig. 3.]

поставляла как основную-среднюю вулканокластику, так и продукты размыва вскрытых эрозией гранитно-метаморфических комплексов ее фундамента. Еще одним, второстепенным, источником, вероятно, были юрско-раннемеловые аккреционные призмьы Сихотэ-Алиня, в строении которых участвовали пластины океанических кремней, о чем свидетельствует петрографический состав песчаников. Следовательно, для нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня характерно сочетание нескольких, существенно раз-

личающихся источников питания: континентальной суши, фрагментов островной дуги и участков океанической коры. Подобный смешанный состав кластики, вероятно, является основным признаком седиментации в бассейнах, формирование которых связано с режимом крупномасштабного трансформного скольжения литосферных плит. Полученный вывод позволяет отнести нижнемеловые терригенные отложения Северного Сихотэ-Алиня к образованиям раннемелового Журавлевского синдвигового террейна.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дмитриева Н.В., Туркина О.М., Ножкин А.Д. Петрогеохимические особенности метатерригенных пород Канского блока Восточного Саяна: реконструкция источников сноса и условий осадкообразования // *Литология и полезные ископаемые*. 2008. № 2. С. 186–201.
2. 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.
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
4. Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гареев Э.З., Ножкин А.Д. Синрифтовые песчаники и глинистые породы: валовый химический состав и положение на ряде дискриминантных палеогеодинамических диаграмм // *Литология и полезные ископаемые*. 2019. № 5. С. 439–465. DOI: 10.31857/S0024-497X20195439-465
5. Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical compositions of sandstones // *J. Geol.* 1983. Vol. 91. P. 611–627. DOI: 10.1134/S0024490219050055
6. 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. DOI: 10.1007/BF00375292
7. 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. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00133-X
8. 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. Vol. 144. P. 531–542. DOI: 10.1144/gsjgs.144.4.0531
9. Kiminami K., Kumon F., Nishimura T., Shiki T. Chemical composition of sandstones derived from magmatic arcs. Composition and origin of clastic rocks from mobile belts (examples from the Japanese Islands) // *Memoirs Geol. Soc. Japan*. 1992. Vol. 38. P. 361–372.
10. McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics // *Geological Society of America*. 1993. Vol. 284. P. 21–40. DOI: 10.1130/SPE284-p21
11. 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. No. 5. P. 635–650.
12. Taylor S.R., McLennan S.M. Planetary crusts: Their composition, origin and evolution. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 378 p. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2009.tb00744
13. Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins // *Chem. Geol.* 2013. Vol. 355. P. 117–133. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.07.014
14. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России. Под ред. А.И. Ханчук. Кн. 1. Владивосток: Дальнаука, 2006. 572 с.
15. Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.
16. Малиновский А.И., Голозубов В.В., Симаненко В.П. Кемский островодужный террейн (Восточный Сихотэ-Алинь): обстановки формирования и геодинамика // *Доклады АН*. 2006. Т. 410. № 2. С. 229–233.
17. Маркевич П.В., Коновалов В.П., Малиновский А.И., Филиппов А.Н. Нижнемеловые отложения Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 2000. 200 с.
18. Малиновский А.И., Голозубов В.В. Строение, состав и обстановки формирования нижнемеловых отложений Журавлевского террейна (Центральный Сихотэ-Алинь) // *Литология и полезные ископаемые*. 2012. № 4. С. 399–424.
19. Маркевич П.В. Геосинклинальное терригенное осадконакопление на востоке Азии в фанерозое. На примере Сихотэ-Алиня и Камчатки. М.: Наука, 1985. 118 с.
20. Филиппов А.Н. Формационный анализ мезозойских отложений Западного Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 1990. 144 с.
21. Маркевич П.В., Филиппов А.Н., Малиновский А.И., Зябрев С.В., Нечаев В.П., Высоцкий С.В. Меловые вулканогенно-осадочные образования Нижнего Приамурья. Владивосток: Дальнаука, 1997. 300 с.
22. Медведева С.А. Возможность применения литохимии для сопоставления и корреляции отложений на примере Комсомольского разреза Северного Сихотэ-Алиня (Дальний Восток России) // *Тихоокеанская геология*. 2019. Т. 38. № 4. С. 74–89. DOI: 10.30911/0207-4028-2019-38-4-74-89
23. Maynard J.B., Valloni R., Yu H.S. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins // *Trench-Forearc Geology. Sedimentation and tectonics of modern and ancient plate margins*. Ed. J.K. Leggett. Oxford: Blackwell, 1982. P. 551–561.
24. Ханчук А.И., Голозубов В.В., Симаненко В.П., Малиновский А.И. Гигантские складки с крутопадающими шарнирами в структурах орогенных поясов (на примере Сихотэ-Алиня) // *Доклады АН*. 2004. Т. 394. № 6. С. 791–795.
25. Диденко А.Н., Ото Ш., Кудымов А.В., Песков А.Ю., Архипов М.В., Мияке Ю., Нагата М. Возраст цирконов из осадочных пород Хабаровского, Самаркинского и Журавлевско-Амурского террейнов северной части Сихотэ-Алинского орогенного пояса: тектонические следствия // *Тихоокеанская геология*. 2020. Т. 39. № 1. С. 3–23. DOI: 10.30911/0207-4028-2020-39-1-3-23
26. Симаненко В.П. Нижнемеловая базальт-андезитовая ассоциация Северного Сихотэ-Алиня // *Тихоокеанская геология*. 1990. № 6. С. 86–95.
27. Шутов В.Д. Классификация песчаников // *Литология и полезные ископаемые*. 1967. № 5. С. 86–102.
28. Петтиджон Ф.Дж. Осадочные породы. М.: Недра, 1981. 752 с.
29. Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. Sand and sandstones. 2nd edn. Heidelberg: Springer-Verlag, 1987. 553 p.
30. Moor B.R., Dennen W.H. A geochemical trend in silicon-aluminum-iron ratios and the classification of clastic sediments // *Journal of Sedimentary Research*. 1970. Vol. 40. No. 4. P. 1147–1152. DOI: 10.1306/74D72153-2B21-11D7-8648000102C1865D
31. Маслов А.В., Мизенс Г.А., Подковыров В.Н., Гареев Э.З., Сорокин А.А., Смирнова Ю.Н., Сокур Т.М. Синорогенные псаммиты: основные черты литохимии // *Литология и полезные ископаемые*. 2013. № 1. С. 70–96. DOI: 10.7868/S0024497X12050047
32. Маслов А.В. Литогеохимический облик отложений

- ашинской серии венда западного склона Южного Урала // *Литосфера*. 2014. № 1. С. 13–32.
33. Юдович Я.Э. Региональная геохимия осадочных толщ. Л.: Наука, 1981. 276 с.
34. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
35. 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. DOI:10.1038/299715a0
36. Parker A. An index of weathering for silicate rocks // *Geol. Magazine*. 1970. Vol. 107. No. 6. P. 501–504. DOI: 10.1017/S0016756800058581
37. Bahlburg H., Dobrzinski N.A. Review of the chemical index of alteration (CIA) and its application to the study of Neoproterozoic glacial deposits and climate transitions // *Geol. Society of London*. 2011. Vol. 36. P. 81–92. DOI: 10.1144/M36.6
38. Boynton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // *Rare Earth element geochemistry*. Ed. P. Henderson. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 63–114. DOI: 10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3
39. 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. DOI: 10.1016/0009-2541(88)90010-1
40. Condie K.C., Wronkiewicz D.A. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution // *Earth and Planetary Science Letters*. 1990. Vol. 97. No. 3–4. P. 256–267. DOI: 10.1016/0012-821X(90)90046-Z
41. Sengör A.M.C., Natal'in B.A. Rifts of the world // *Mantle plumes: their Identification through time*. Ed. R.E. Ernst, K.L. Buchan. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 2001. Vol. 352. P. 389–482. DOI: 10.1130/0-8137-2352-3.389
42. Christie-Blick N., Biddle K.T. Deformation and basin formation along strike-slip faults // *Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation: The society of economic paleontologists and mineralogists. Special publication*. Ed. K.T. Biddle, N. Christie-Blick. 1985. Vol. 37. P. 1–34. DOI:10.2110/pec.85.37.0001

UDC [552.5:550.4] (235.47)

ISSN 1609-0691

DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2022/4/53-68>

Received: 28.10.2022

Accepted: 01.12.2022

Published online: 29.12.2022

Geochemistry of Lower Cretaceous terrigenous deposits of the Northern Sikhote-Alin and their paleogeodynamic nature

©2022 A. I. Malinovsky✉

Far East Geological Institute, Far East Branch of the Russian Academy of Sciences, 159100-letiya Vladivostoka pr., Vladivostok, 690022, Russian Federation

Abstract

Introduction: The study and interpretation of the geochemical features of terrigenous rocks provides objective information about the nature of the processes of weathering, transfer, and burial of the material, as well as about the provenance areas and the paleogeodynamic nature of sedimentation basins. The Early Cretaceous is the most important stage in the development of the geological structures of the eastern part of the Eurasian continent. Early Cretaceous deposits that make up these structures occupy more than a half of the area of the Sikhote-Alin range. Geochemically, the sedimentary rocks in the region have been poorly studied, therefore, it is difficult to make judgements about their geodynamic nature. The purpose of the study is to provide a detailed study and analysis of geochemical features of fragmented rocks in the Northern Sikhote-Alin with the focus on determining the composition of rocks in the provenance areas and restoring sedimentation environments.

Methodology: Two sites were selected for research due to the availability of almost continuous sections of Lower Cretaceous deposits within their territory. The petrographic composition of the rocks was studied in thin rock sections using polarising microscopes. The content of petrogenic elements was determined by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry on the iCAP 6500 Duo, CPM-25, and VRA-30 spectrometers. Concentrations of rare and rare-earth elements were studied by plasma spectrometry (ICP-



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Alexander I. Malinovsky, e-mail: malinovsky@fegi.ru

MS) using the Agilent 7500c quadrupole mass spectrometer.

Results and discussion: Data obtained as a result of geochemical studies indicate that the studied sandstones are greywackes and only some of them are lithic arenites. They were formed mainly due to the physical destruction of provenance area rocks, which explains a low level of their “maturity”, while chemical weathering played a secondary role. Their geochemical features indicate that the rocks belong to petrogenic variations that underwent one cycle of redeposition and were formed without any significant lithodynamic changes and sorting of fragmentary material.

Conclusion: Interpretation of the results showed that sedimentation occurred in a basin which was spatially and genetically associated with a major transform fault that separated the Eurasian continent and the adjacent oceanic plate. The denudation area incorporated continental land composed of granite-metamorphic complexes and a mature, highly eroded marginal-continental arc, which supplied both acidic material for its foundation and the basic-intermediate volcanoclastics. The accretionary wedges of the Sikhote-Alin containing flint plates must have also been eroded. All this allows attributing the studied deposits to the Zhuravlevka terrain.

Keywords: Northern Sikhote-Alin, Early Cretaceous, geochemistry, sandstones, geodynamic environments, provenance areas.

For citation: Malinovsky A. I. Geochemistry of Lower Cretaceous terrigenous deposits of the Northern Sikhote-Alin and their paleogeodynamic nature. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 4, pp. 53–68. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology.2022.4/53-68>

Conflict of interests: The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

REFERENCES

1. Dmitrieva N.V., Nozhkin A.D., Turkina O.M. Petrogeohimicheskie osobennosti metaterrigennykh porod Kanskogo bloka Vostochnogo Sayana: rekonstrukciya istochnikov snosa i usloviy osadkoobrazovaniya [Petrogeochemical features of metaterrigenous rocks of the Kan Block of the Eastern Sayan: Reconstructions of provenances and sedimentation conditions]. *Lithol. Mineral Resour.*, 2008, vol. 43, no. 2, pp. 165–179. DOI: 10.1007/s10987-008-2006-2
2. Letnikova E.F., Veshcheva S.V., Proshenkin A.I., Kuznetsov A.B. Neoproterozojskie terrigennye otlozheniya Tuvino-Mongol'skogo massiva: geohimicheskaya korrelyatsiya, istochniki snosa, geodinamicheskaya rekonstrukciya [Neoproterozoic terrigenous deposits of the Tuva–Mongolian massif: geochemical correlation, source-lands, and geodynamic reconstruction]. *Russian Geol. and Geophysics.*, 2011, vol. 52, no. 12, pp. 1662–1671. DOI: 10.1016/j.rgg.2011.11.013
3. 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. Diskriminantnyye paleogeodinamicheskie diagrammy dlya terrigennykh porod: opyt sopostavleniya [Tectonic setting discrimination diagrams for terrigenous rocks: a comparison]. *Geochem. International.*, 2016, vol. 54, no. 7, pp. 569–583. DOI: 10.1134/S0016702916060033
4. Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., Nozhkin A.D. Sinriftovye peschani i glinistye porodny: valovyy himicheskij sostav i polozhenie na ryade diskriminantnykh paleogeodinamicheskikh diagramm [Synrift sandstones and mudstones: bulk chemical composition and position in some discriminant paleogeodynamic diagrams]. *Lithol. Mineral Resour.*, 2019, vol. 54, no. 2, pp. 390–411. DOI: 10.1134/S0024490219050055
5. Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical compositions of sandstones. *J. Geol.*, 1983, vol. 91, pp. 611–627. DOI: 10.1086/628815
6. 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, pp. 181–193. DOI: 10.1007/BF00375292
7. 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, pp. 305–327. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00133-X
8. 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, vol. 144, pp. 531–542. DOI: 10.1144/gsjgs.144.4.0531
9. Kiminami K., Kumon F., Nishimura T., Shiki T. Chemical composition of sandstones derived from magmatic arcs. Composition and origin of clastic rocks from mobile belts (examples from the Japanese Islands). *Memoirs Geol. Soc. Japan.*, 1992, vol. 38, pp. 361–372.
10. McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Geological Society of America*, 1993, vol. 284, pp. 21–40. DOI: 10.1130/SPE284-p21
11. 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, no. 5, pp. 635–650.
12. Taylor S.R., McLennan S.M. Planetary crusts: Their composition, origin and evolution. Cambridge, Cambridge University Press, 2009. 378 p. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2009.tb00744
13. Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chem. Geol.*, 2013, vol. 355, pp. 117–133. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.07.014
14. *Geodinamika, magmatizm i metallogeniya Vostoka Rossii* [Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian East]. In Khanchuk A.I. (eds.). Book 1. Vladivostok, Dal'nauka publ., 2006. 572 p. (In Russ.).
15. Golozubov V.V. *Tektonika yurskih i nizhnemelovykh kompleksov severo-zapadnogo obramleniya Tihogo okeana* [Tectonics of Jurassic and Lower Cretaceous complexes of the Northwestern Pacific margin]. Vladivostok, Dal'nauka publ., 2006. 239 p. (In Russ.).
16. Malinovsky A.I., Golozubov V.V., Simanenko V.P. Kemskiy ostrovoduzhnyj terrejn (Vostochnyy Sikhote-Alin): obstanovki formirovaniya i geodinamika [The Kema Island-Arc Terrane, Eastern Sikhote Alin: Formation Settings and Geodynamics]. *Dokl. Earth Sci.*, 2006, vol. 410, no. 7, pp. 1026–1029. DOI: 10.1134/S1028334X06070051
17. Markevich P.V., Kononov V.P., Malinovsky A.I., Philippov A.N. *Nizhnemelovye otlozheniya Sikhote-Alinya* [Lower Cretaceous deposits of Sikhote-Alin]. Vladivostok, Dal'nauka publ., 2000. 200 p. (In Russ.).

18. Malinovsky A.I., Golozubov V.V. Stroenie, sostav i obstanovki formirovaniya nizhnemelovyh otlozhenij ZHuravlevskogo terrejna (Central'nyj Sihote-Alin') [Structure, composition, and depositional environments of the Lower Cretaceous rocks of the Zhuravlevka terrane, Central Sikhote Alin]. *Lithol. Mineral Resour.*, 2012, vol. 47, no. 4, pp. 355–378. DOI: 10.1134/S0024490212030078
19. Markevich P.V. *Geosinklinal'noe terrigennoe osadkonakoplenie na vostokey Azii v fanerozoey. Na primere Sihote-Alinya i Kamchatki* [Geosynclinal terrigenous sedimentation in East Asia in the Phanerozoic: evidence from Sikhote-Alin and Kamchatka]. Moscow, Nauka publ., 1985. 118 p. (In Russ.).
20. Filippov A.N. *Formacionnyj analiz mezozojskikh otlozhenij Zapadnogo Sihote-Alinya* [Formation analysis of Mesozoic deposits of Western Sikhote-Alin]. Vladivostok, Dal'nauka publ., 1990. 144 p. (In Russ.).
21. Markevich P.V., Filippov A.N., Malinovsky A.I., Zhabrev S.V., Nechaev V.P., Vysotsky S.V. *Melovye vulkanogenno-osadochnye obrazovaniya Nizhnego Priamur'ya* [Cretaceous volcano-sedimentary deposits of the Lower Priamurie]. Vladivostok, Dal'nauka publ., 1997. 300 p. (In Russ.).
22. Medvedeva S.A. *Vozmozhnost' primeneniya litohimii dlya sopostavleniya i korrelyatsii otlozhenij na primere Komsomol'skogo razreza Cevernogo Sihote-Alinya (Dal'nij Vostok Rossii)* [Lithochemistry potential for comparison and correlation of deposits on the example of the Komsomolsk section in Northern Sikhote-Alin, Far East of Russia]. *Russ. J. Pacific Geol.*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 375–389. DOI: 10.1134/S1819714019040055
23. Maynard J.B., Valloni R., Yu H.S. Composition of modern deep-sea sands from arc-related basins. *Trench-Forearc Geology. Sedimentation and tectonics of modern and ancient plate margins*. Ed. J. K. Leggett. Oxford, Blackwell, 1982. pp. 551–561.
24. Khanchuk A.I., Golozubov V.V., Simanenko V.P., Malinovskii A.I. Gigantskie sklady s krutopadayushchimi sharnirami v struktural'nykh orogennykh poyasov (na primere Sihote-Alinya) [Giant folds with steeply dipping hinges in structures of orogenic belts: evidence from Sikhote Alin]. *Dokl. Earth Sci.*, 2004, vol. 395, no. 2, pp. 165–169.
25. Didenko A.N., Otoh S., Kudymov A.V., Peskov A.Y., Arkhipov M.V., Miyake Y., Nagata M. *Vozrast cirkonov iz osadochnykh porod Habarovskogo, Samarkinskogo i ZHuravlevsko-Amurskogo terrejnov severnoy chasti Sihote-Alin'skogo orogennogo poyasa: tektonicheskie sledstviya* [Tectonic implications: zircon age of sedimentary rocks from Khabarovsk, Samarka, and Zhuravlevka–Amur terranes in the northern Sikhote-Alin Orogenic Belt]. *Russ. J. Pacific Geol.*, 2020, vol. 14, no. 1, pp. 1–19. DOI: 10.1134/S1819714020010030
26. Simanenko V.P. *Nizhnemelovaya bazal't-andezitovaya associatsiya Severnogo Sihote-Alinya* [Lower Cretaceous basalt–andesite association of northern Sikhote-Alin]. *Tikhookean. Geol.*, 1990, no. 6, pp. 86–95. (In Russ.).
27. Shutov V.D. *Klassifikatsiya peschanikov* [Classification of sandstones]. *Litol. Poleznye Iskop.*, 1967, no. 5, pp. 86–102. (In Russ.).
28. Pettijohn F.J. *Osadochnye porody* [Sedimentary rocks]. Moscow, Nedra publ., 1981, 752 p. (In Russ.).
29. Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. *Sand and sandstones*. 2nd edn. Heidelberg, Springer-Verlag, 1987, 553 p.
30. Moor B.R., Dennen W.H. A geochemical trend in silicon-aluminum-iron ratios and the classification of clastic sediments. *Journal of Sedimentary Research*, 1970, vol. 40, no. 4, pp. 1147–1152. DOI: 10.1306/74D72153-2B21-11D7-8648000102C1865D
31. Maslov A.V., Mizens G.A., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z., Sorokin A.A., Smirnova Y.N., Sokur T.M. *Sinorogennyye psammity: osnovnyye cherty litohimii* [Synorogenic psammites: major lithochemical features]. *Lithol. Mineral Resour.*, 2013, vol. 48, no. 1, pp. 74–98. DOI: 10.1134/S0024490212050045
32. Maslov A.V. *Litogehimicheskij oblik otlozhenij ashinskoy serii v vostochno-zapadnogo sklona YUzhnogo Urala* [Lithochemical image of the Vendian Asha Group deposits of the South Urals]. *Lithosphere*, 2014, no. 1, pp. 13–32. (In Russ.).
33. Yudovich Ya.E. *Regional'naya geohimiya osadochnykh tolshch* [Regional geochemistry of sedimentary sequence]. Saint Petersburg, Nauka publ., 1981, 276 p. (In Russ.).
34. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Osnovy litohimii* [Principles of lithochemistry]. Saint Petersburg, Nauka publ., 2000, 479 p. (In Russ.).
35. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutes. *Nature*, 1982, vol. 299, pp. 715–717. DOI: 10.1038/299715a0
36. Parker A. An index of weathering for silicate rocks. *Geol. Magazine*, 1970, vol. 107, no. 6, pp. 501–504. DOI: 10.1017/S0016756800058581
37. Bahlburg H., Dobrzinski N.A. Review of the chemical index of alteration (CIA) and its application to the study of Neoproterozoic glacial deposits and climate transitions. *Geol. Society of London*, 2011, vol. 36, pp. 81–92. DOI: 10.1144/M36.6
38. Boynton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare earth element geochemistry*. Ed. P. Henderson. Amsterdam, Elsevier, 1984, pp. 63–114. DOI: 10.1016/B978-0-444-42148-7.50008-3
39. 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, pp. 119–139. DOI: 10.1016/0009-2541(88)90010-1
40. Condie K.C., Wronkiewicz D.A. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution. *Earth and Planetary Science Letters*, 1990, vol. 97, no. 3–4, pp. 256–267. DOI: 10.1016/0012-821X(90)90046-Z
41. Sengör A.M.C., Natal'in B.A. Rifts of the world. *Mantle plumes: their identification through time*. Ed. R.E. Ernst, K.L. Buchan. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 2001, vol. 352, pp. 389–482. DOI: 10.1130/0-8137-2352-3.389
42. Christie-Blick N., Biddle K.T. Deformation and basin formation along strike-slip faults. *Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation: The society of economic paleontologists and mineralogists. Special publication*. Ed. K.T. Biddle, N. Christie-Blick. 1985, vol. 37, pp. 1–34. DOI: 10.2110/pec.85.37.0001

Малиновский Александр Иванович – к. г.-м. н., ведущий научный сотрудник, ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация; E-mail: malinovsky@fegi.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1650-2828>

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Malinovsky Alexander I. PhD in Geol-Min., Leading Researcher, Far East Geological Institute, Far East Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation; E-mail: malinovsky@fegi.ru; ORCID <https://orcid.org/0000-0002-1650-2828>

Author have read and approved the final manuscript.