

**ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ, ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ И ОБСТАНОВКИ  
ФОРМИРОВАНИЯ НИЖНЕМЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ***А.И. Малиновский<sup>1</sup>, В.В. Голозубов<sup>1</sup>, С.А. Медведева<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159, г. Владивосток, 690022; e-mail: malinovsky@fegi.ru

<sup>2</sup>ФГБУН Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, Ким Ю Чена 65, г. Хабаровск, 680000  
Поступила в редакцию 9 июня 2022 г.

Рассматриваются строение, вещественный состав, источники питания и геодинамические обстановки формирования нижнемеловых терригенных отложений Северного Сихотэ-Алиня. В результате проведенных исследований было установлено, что по минералого-геохимическим параметрам изученные песчаники соответствуют грауваккам, являясь петрогенными или породами первого цикла переотложения, образовавшимися за счет механического разрушения пород источников сноса. Они характеризуются низкой степенью зрелости, слабой литодинамической переработкой материнских пород и высокой скоростью захоронения. Палеогеодинамическая интерпретация полученных результатов свидетельствует, что в раннемеловое время осадконакопление происходило вдоль границы континент–океан в бассейне, связанном с крупномасштабными сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам. Область питания объединяла сиалическую сушу, сложенную гранитно-метаморфическими и осадочными породами, зрелую, глубоко эродированную окраинно-континентальную дугу, а также фрагменты юрско-раннемеловых аккреционных призм Сихотэ-Алиня, в строении которых участвовали офиолиты. Все это позволяет рассматривать изученные отложения как образования, принадлежащие раннемеловому Журавлевскому синдвиговому террейну.

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

**ВВЕДЕНИЕ**

Характерной чертой геологического строения хребта Сихотэ-Алинь является широкое развитие нижнемеловых отложений, занимающих более половины его площади и имеющих суммарную мощность около 12 тыс. м [13]. Раннемеловой этап геологического развития восточной окраины Евразии во многом определил современный облик структур этого региона. Этому же времени соответствует формирование террейнов самого различного типа: океанических, островодужных, связанных с режимом трансформного скольжения литосферных плит [1, 2, 6, 13 и др.]. Помимо этого, в нижнемеловых отложениях локализованы рудные, угольные и другие месторождения полезных ископаемых. Они также перспективны в отношении запасов углеводородов.

В процессе многолетних исследований нижнемеловые отложения Сихотэ-Алиня неплохо изучены стратиграфически, но в литологическом отношении

степень их изученности крайне неравномерна. Наиболее детально исследован состав раннемеловых террейнов Южного и Западного Сихотэ-Алиня – Кемского, Журавлевского, Таухинского, Наданьхада-Бикинского [6, 8, 10, 21]. В этих террейнах, на основании всестороннего изучения вещественного состава слагающих их терригенных отложений, удалось реконструировать палеогеодинамические обстановки формирования бассейнов седиментации, а также установить тектонические типы и породный состав областей питания, поставлявших обломочный материал в эти бассейны.

На Северном Сихотэ-Алине исследования подобного плана пока малочисленны. Известны лишь работы по изучению вещественного состава отложений Киселевско-Маноминского террейна (район оз. Удыль) [12] и Комсомольского (Пиванского) разреза – северного фрагмента Журавлевского (Журавлевско-Амурского) террейна [16]. Очевидно, что литоло-

гическая изученность нижнемеловых отложений такой громадной территории крайне недостаточна, что не позволяет с достаточной уверенностью говорить об их геодинамической природе и, соответственно, о принадлежности к тому или иному типу террейнов. Для восполнения этого пробела и получения новых данных о вещественном составе осадочных отложений Северного Сихотэ-Алиня, нами были изучены два участка их распространения: берриас-барремских (район п. Высокогорный) и готерив-аптских (бассейн р. Бута) (рис. 1). В статье приведены результаты детальных литологических исследований нижнемеловых отложений этих участков. Рассмотрены строение отложений, петрографический и геохимический состав пород, содержание и соотношения в них породообразующих компонентов и тяжелых обломочных минералов. Интерпретация полученных данных позволила определить тип и состав пород областей питания бассейна седиментации, а также выяснить геодинамическую обстановку его формирования.

#### ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ

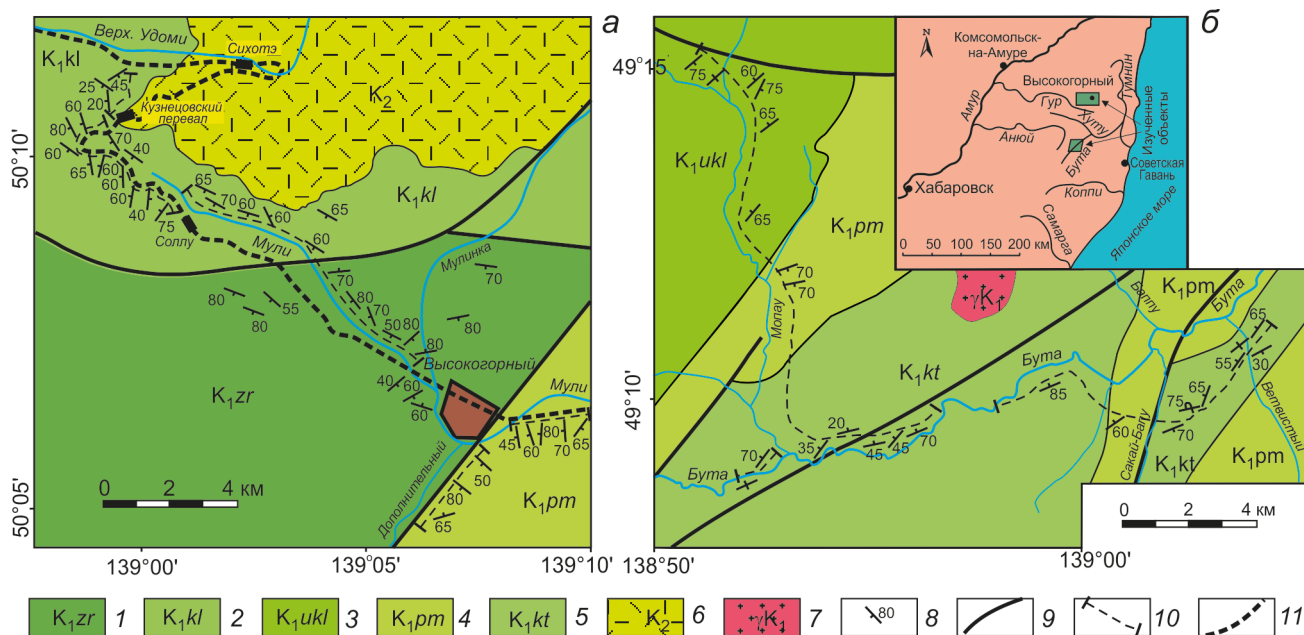
На карте террейнов Сихотэ-Алиня рассматриваемые участки развития нижнемеловых отложений приурочены к зоне сопряжения разновозрастных (раннемеловых) террейнов – синсдвигового турбидитового Журавлевского и островодужного Кемского [1, 2, 23]. Попытки распознать принадлежность отложений к тому или другому террейну предпринимались неоднократно [4, 18, 23], но только по геологическим данным это было сделать затруднительно, поскольку породы террейнов здесь имеют близкий литологический состав (алевролиты, алевроаргиллиты, реже песчаники, пачки ритмичного переслаивания), а также схожие стили дислокаций.

Изученные объекты нижнемеловых отложений расположены в Северном Сихотэ-Алине (рис. 1). Первый участок находится в районе п. Высокогорный, занимая территорию в междуречье Мули и Удоми, а второй – в бассейне реки Бута и ее левого притока руч. Мопай. Берриас-аптские отложения этих участков, общей мощностью свыше 6500 м, представлены морскими терригенными породами – песчаниками, алевролитами, аргиллитами, многочисленными пачками их ритмичного переслаивания, реже горизонтами и линзами конгломератов, гравелитов и микститов. Особенностью строения разрезов является практически полное отсутствие продуктов синседиментационной вулканической деятельности. Породы интенсивно дислоцированы, нарушены многочисленными зонами разломов, расланцевания и будинажа [23].

На Государственной геологической карте листа М-54 масштаба 1:1 000 000 (третье поколение) [3] нижнемеловые отложения изученных участков расчленяются на 5 свит, согласно перекрывающих друг друга: журавлевскую, ключевскую, усть-колумбинскую, приманкинскую и каталевскую. Их строение и состав следующие.

В районе п. Высокогорный (рис. 2, а) залегающая в основании видимого разреза журавлевская свита (берриас–валанжин), мощностью более 1000 м, сложена в основном алевролитами и аргиллитами, содержащими прослойки мелкозернистых песчаников, а также пачки ритмичного переслаивания песчаников и алевролитов. Пачки имеют различные мощность элементарных ритмов (от 1–10 см до 20–30 см) и соотношения в них песчаников и алевролитов (п/а). В ритмах преобладают алевролиты, мощность которых достигают 30 см. Соотношение п/а – от 1/2 до 1/5. Пачки с равным либо обратным соотношением пород более редки. Вышележащая валанжинская ключевская свита, имеющая мощность более 1600 м, сложена в основном пачками ритмичного переслаивания песчаников и алевролитов. Достаточно монотонная толща переслаивания иногда прерывается горизонтами алевролитов и песчаников. Пачки ритмичного переслаивания имеют различные мощность ритмов и соотношения слагающих их пород. В пачках с ритмами мощностью от 1–6 см до 10–15 см песчаники и алевролиты находятся обычно в равном соотношении. В пачках, в которых ритмы имеют мощность 20–50 см, в основном преобладают песчаники, мощность которых в отдельных случаях достигают 40 см. Соотношение п/а здесь 2/1–5/1. В составе готерив-барремской приманкинской свиты преобладают массивные и слоистые алевролиты и аргиллиты. Кроме того, отмечаются горизонты разнозернистых песчаников и маломощные пачки тонкого ритмичного переслаивания мелкозернистых песчаников, алевролитов и аргиллитов с мощностью ритмов от 1–7 см до 10–20 см и различным соотношением компонентов. Мощность отложений свиты в районе п. Высокогорный превышает 1600 м.

В бассейне р. Бута (рис. 2, б) разрез нижнемеловых отложений начинается готеривской усть-колумбинской свитой, мощность которой в изученном районе достигает 800 м. Свита сложена разнозернистыми песчаниками, содержащими горизонты алевролитов, прослойки и линзы мелкогалечных конгломератов, гравелитов и микститов, а также довольно редкие пачки ритмичного переслаивания песчаников и алевролитов. Пачки переслаивания состоят из ритмов различной мощности: от 3–7 см до 25–35 см, но наиболее обычны ритмы в 10–15 см. Отношение песчаник/алевролит от 2/1 до 10/1, иногда соотношение



**Рис. 1.** Схема расположения и геологические карты изученных объектов нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня [3], с изменениями. Район п. Высокогорный (а); бассейн р. Бута (б).

1–5 – свиты: 1 – журавлевская ( $K_{1zr}$ ), 2 – ключевая ( $K_{1kl}$ ), 3 – усть-колумбинская ( $K_{1ukl}$ ), 4 – приманкинская ( $K_{1pm}$ ), 5 – каталевская ( $K_{1kt}$ ); 6 – позднемеловые вулканиты ( $K_2$ ); 7 – раннемеловые граниты ( $\gamma K_1$ ); 8 – элементы залегания пород; 9 – разломы; 10 – линии изученных разрезов; 11 – железная дорога.

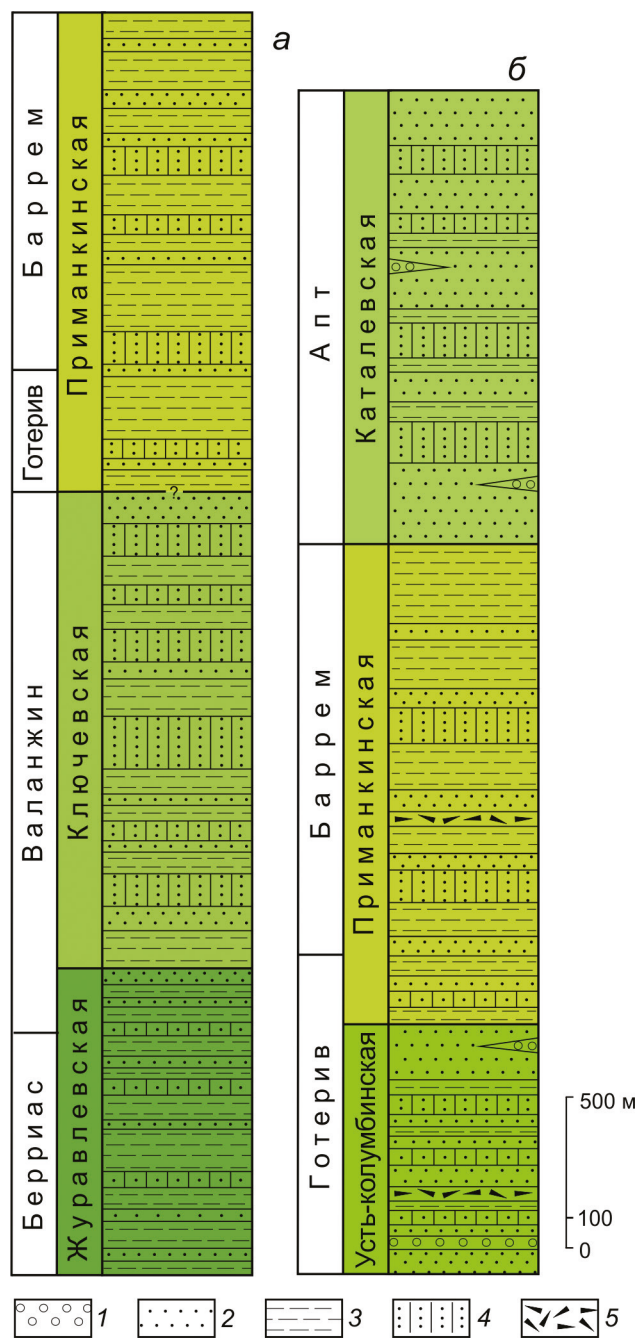
равное. Вышележащая готерив-барремская приманкинская свита имеет схожий литологический состав с ее отложениями в районе п. Высокогорный. Она сложена, главным образом, алевролитами и аргиллитами, содержащими пачки ритмичного переслаивания песчаников и алевролитов с различной мощностью ритмов, а также редкие маломощные пласты песчаников и микститов. Мощности элементарных ритмов в пачках переслаивания от 7–15 см до 30–50 см. Песчаники обычно резко преобладают: отношение песчаник/алевролит достигает 10/1–20/1. Мощность свиты оценивается в 1600 м. Облик каталевской свиты (апт) определяется чередованием мощных пластов песчаников (до 300 м) и пачек (20–150 м) ритмичного переслаивания песчаников и алевролитов. Значительно реже встречаются пласты алевролитов и линзы гравелитов. Мощности ритмов в пачках переслаивания обычно 5–10 см, иногда до 40–50 см. Песчаников и алевролитов в них примерно поровну, и лишь иногда преобладают тот или иной компонент. Мощность свиты в бассейне р. Бута определена в 1500 м. Таким образом, особенностью строения и состава берриасптских отложений района п. Высокогорный и бассейна р. Бута (Северный Сихотэ-Алинь) является: 1) формирование разреза отложений исключительно терригенными породами без какого-либо заметного влияния синхронных вулканических процессов;

2) присутствие в разрезе большого количества пачек ритмичного переслаивания песчаников и алевролитов; 3) значительная (до 6500 м) мощность.

#### ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектами исследования были, главным образом, песчаные породы из нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня. Как дополнительные привлекались данные по геохимическому составу алевролитов. Образцы и пробы пород отобраны в береговых обнажениях рек Бута, Мули, Мулинка, ручьев Мопая, Дополнительный, Сакай-Бапу, Ветвистый, а также в карьерах и выемках вдоль железной и автомобильных дорог.

Для аналитических исследований использовались образцы пород, наименее затронутые вторичными преобразованиями, что контролировалось изучением шлифов. Всего различными методами изучено и проанализировано около 250 образцов и проб терригенных пород, в 88 шлифах из которых подсчитаны породообразующие компоненты, в 85 изучены ассоциации тяжелых обломочных минералов, из них 178 зерен различных минералов исследованы на микрозонде, в 85 пробах были определены содержания петрогенных элементов, а в 77 установлены концентрации редких и редкоземельных элементов.



**Рис. 2.** Литолого-стратиграфические колонки нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня: район п. Высокогорный (а); бассейн р. Бута (б).

1 – конгломераты и гравелиты; 2 – песчаники; 3 – алевролиты и аргиллиты; 4 – ритмичное переслаивание песчаников и алевролитов; 5 – микститы. Рисунки в цвете см. на сайте журнала <http://itig.as.khb.ru/POG>.

Изучение петрографического состава пород, определение и подсчет содержаний основных породообразующих компонентов и тяжелых обломочных минералов в песчаниках осуществлялось традиционны-

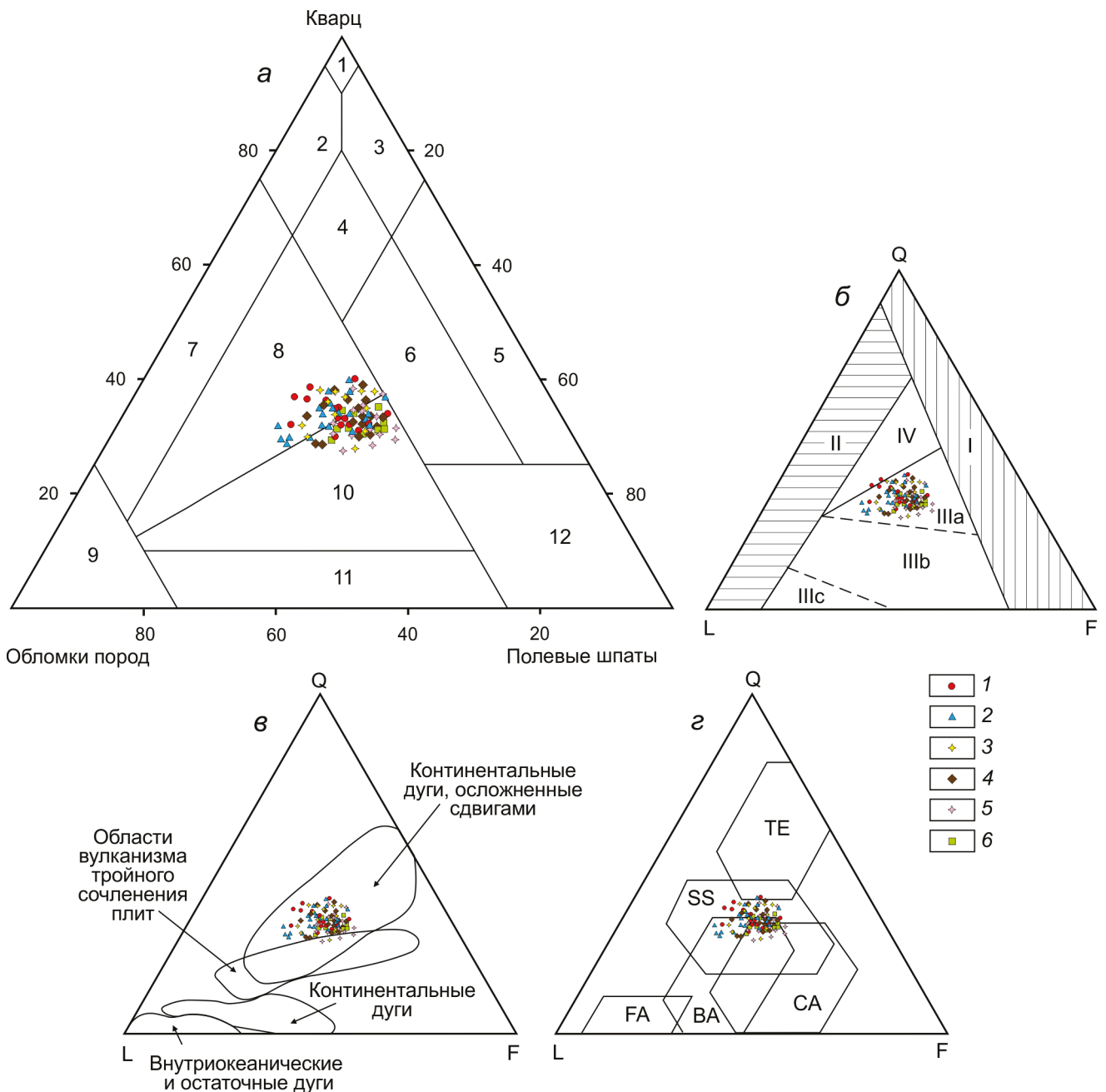
ми, многократно апробированными методами, детали которых приведены в целом ряде публикаций [6–89, 11 и др.]. Химический состав тяжелых минералов изучался на рентгеноспектральном микроанализаторе JXA-8100 (аналитик Н.И. Екимова). Содержания петрогенных элементов определялись методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой на спектрометрах iCAP 6500 Duo, CPM-25 и VRA-30 в лабораториях аналитической химии и рентгеновских методов Аналитического центра (ЦКП) ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток) и лаборатории рентгеноспектрального анализа СВКНИИ ДВО РАН (г. Магадан). Концентрации редких и редкоземельных элементов устанавливались методом плазменной спектроскопии (ICP-MS) на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500c Аналитического центра (ЦКП) ДВГИ ДВО РАН и Elan DRC II PerkinElmer в Хабаровском инновационно-аналитическом центре ИТиГ ДВО РАН. Аналитики Д.В. Авдеев, Л.С. Бокоренко, Т.Д. Борходоева, Е.В. Волкова, Г.А. Горбач, Е.В. Еловский, В.Е. Зазулина, В.Н. Каминская, В.И. Мануилова, Е.А. Ткалина, Н.В. Хуркало.

#### ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД

Поскольку песчаные породы несут наиболее объективную информацию о типе и составе материнских пород областей питания, а также позволяют судить о геодинамических обстановках формирования бассейнов седиментации, подробно остановимся на их вещественном составе.

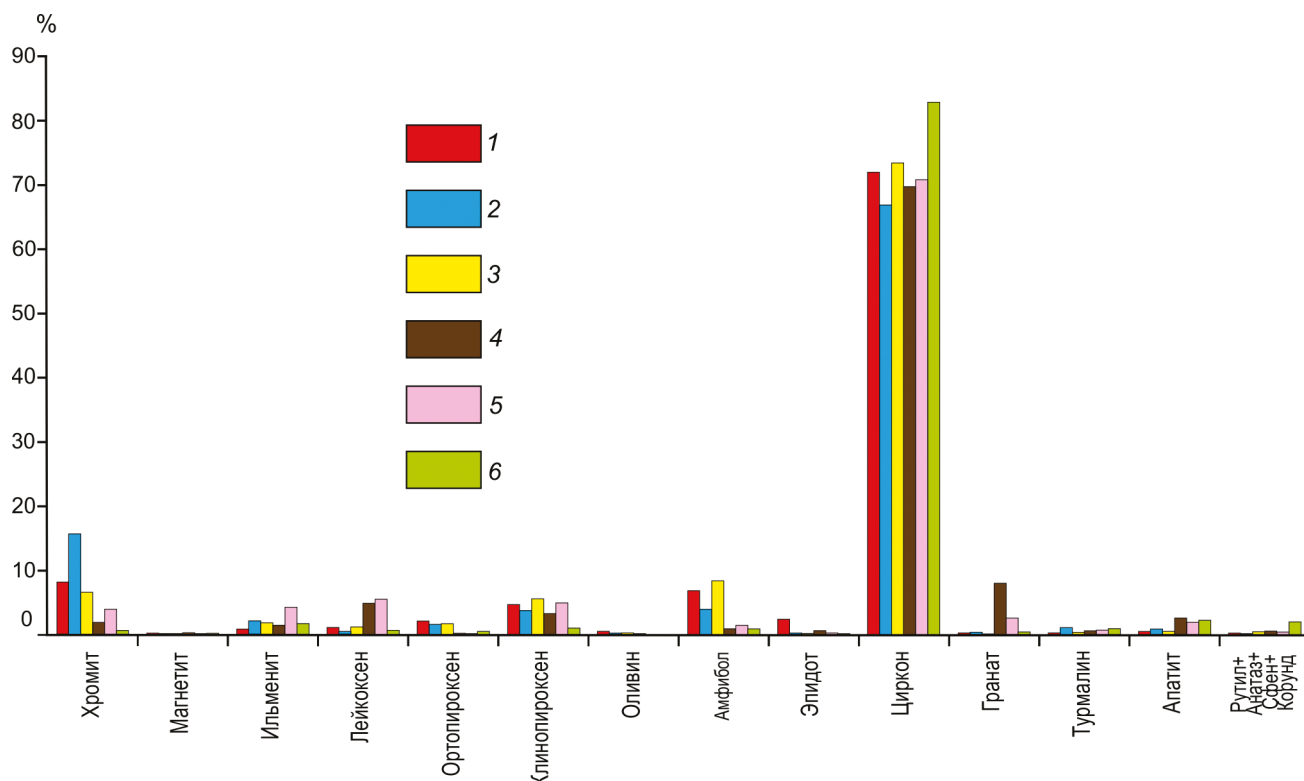
Песчаники обоих изученных участков, как правило, мелко- и среднезернистые, редко крупнозернистые. Сортировка средняя и хорошая, но в крупнозернистых разновидностях она ухудшается, кроме того, в них часто присутствуют рассеянные по всему объему породы мелкие (до 2 см) остроугольные обломки алевролитов и аргиллитов. Песчаные зерна обычно угловато-окатанные и полуокатанные, реже угловатые и окатанные, изометричные и удлиненные.

По соотношению породообразующих компонентов все изученные раннемеловые песчаники 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. На классификационной диаграмме В.Д. Шутова [24] (рис. 3, а) песчаники обоих участков образуют единое поле, попадая в область кварцево-полевошпатовых и полевошпатово-кварцевых граувакк. Содержание кварца в песчаниках колеблется от 28 до 41 %. Кварц в основном монокристаллический, остроугольный, изометричный либо слабо удлиненный, часто с волнистым погасанием.



**Рис. 3.** Породообразующие компоненты песчаников из нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня и их палеогеодинамическая интерпретация.

*а* – классификационная диаграмма типов пород [24]. Поля типов пород: 1–4 – кварцевые песчаники: 1 – мономиктовые кварцевые, 2 – кремнекласитито-кварцевые, 3 – полевошпатово-кварцевые, 4 – мезомиктовые кварцевые; 5–6 – аркозовые песчаники: 5 – собственно аркозы, 6 – граувакковые аркозы; 7–11 – граувакковые песчаники: 7 – кварцевые граувакки, 8 – полевошпатово-кварцевые граувакки, 9 – собственно граувакки, 10 – кварцево-полевошпатовые граувакки, 11 – полевошпатовые граувакки; 12 – кристаллотуфы; *б, в* – возможные типы источников питания: *б* – [34], *в* – [38]. I – устойчивые кратоны и поднятые блоки основания, II – ремобилизованные орогены, III – магматические дуги (IIIa – расчлененные, глубоко эродированные, IIIb – переходные, IIIc – нерасчлененные, слабо эродированные), IV – смешанные источники питания. *г* – возможные типы бассейновых обстановок [39]. Бассейны: пассивных континентальных окраин (TE); активных континентальных окраин, осложненных сдвигами дислокациями по трансформным разломам (SS); сопряженные: с окраинно-континентальной магматической дугой (CA), с океанической вулканической дугой (FA – преддуговые и ВА – задуговые бассейны). L – обломки пород, Q – кварц, F – полевые шпаты. Свиты: 1–3 – район п. Высокогорный: 1 – журавлевская, 2 – ключевская, 3 – приманкинская; 4–6 – бассейн р. Бута: 4 – усть-колумбинская, 5 – приманкинская, 6 – каталевская.



**Рис. 4.** Характер распределения тяжелых обломочных минералов в песчаных породах из нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня (средние содержания).

Свиты: 1–3 – район п. Высокогорный: 1 – журавлевская, 2 – ключевская, 3 – приманкинская; 4–6 – бассейн р. Бута: 4 – усть-колумбинская, 5 – приманкинская, 6 – каталевская.

Поликристаллический кварц редок. Среди полевых шпатов, содержание которых колеблется в пределах 24–43 %, преобладают (до 90 % всех полевых шпатов) удлиненные, таблитчатые, реже изометричные зерна кислых плагиоклазов – альбита и олигоклаза. Содержание калиевых полевых шпатов, представленных изометричными зернами пелитизированного ортоклаза и, реже, решетчатого микроклина, в основном составляет 3–8 % и лишь иногда достигает 10–13 %. Основные и средние плагиоклазы редки. Обломки пород, составляющие в сумме от 25 до 45 % всех зерен, представлены в основном кремнистыми (до 25 % общего количества зерен), терригенными (до 23 %) и вулканическими (до 16 %) породами. Обломки кварцитов и кварц-серицитовых сланцев редки.

Таким образом, петрографический состав песчаных пород позволяет предполагать, что область питания была сложена комплексом кремнистых, терригенных, гранитно-метаморфических и вулканических пород. Достаточно высокие содержания в песчаниках кварца и плагиоклазов свидетельствуют о заметном участии в процессе седиментации продуктов размыва кислых интрузивных пород. Присутствие значитель-

ного количества обломков кремнистых и терригенных пород позволяет предполагать, что их источником были фрагменты юрской аккреционной призмы Самаркинского террейна, в современной структуре находящегося в непосредственной близости от исследованных участков Северного Сихотэ-Алиня.

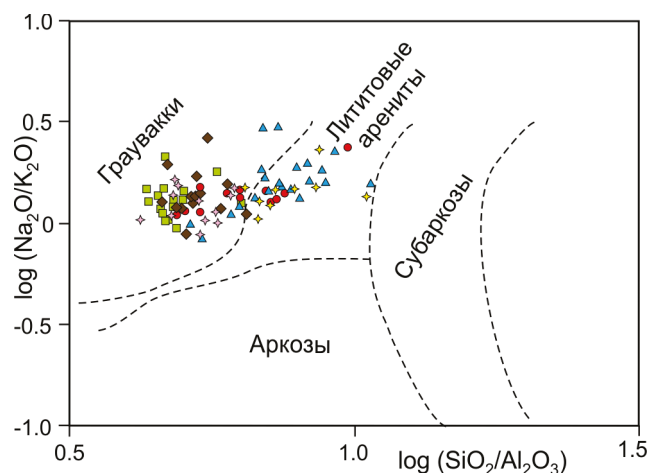
В песчаниках изучен состав, содержание и соотношение между отдельными тяжелыми обломочными минералами и их ассоциациями. Тяжелые минералы составляют 0.01–0.7 % всего объема породы, крайне редко достигая 2 %. На рис. 4 показаны их средние содержания и характер распределения в различных свитах изученных участков. В песчаниках установлены две ассоциации тяжелых минералов. Наиболее распространена сиалическая ассоциация минералов, связанная с разрушением кислых изверженных и метаморфических пород: циркон, гранат, турмалин, сфен, рутил, апатит, анатаз, корунд, а также ильменит и лейкоксен, которые, свою очередь, могут встречаться и в основных вулканиках. Сумма содержаний этих минералов составляет в среднем по свитам от 75 % до 96 % всей тяжелой фракции, а в отдельных пробах достигает 100 %. Среди минералов этой ассоциации

**Таблица 1.** Средние содержания петрогенных (мас. %) элементов в нижнемеловых песчаных породах Северного Сихотэ-Алиня.

Компонент	Район п. Высокогорный			Бассейн р. Бута		
	1	2	3	4	5	6
n	12	21	9	14	13	16
SiO <sub>2</sub>	74.77	75.63	76.43	72.38	72.65	70.34
TiO <sub>2</sub>	0.39	0.41	0.40	0.41	0.43	0.46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.74	10.51	9.95	13.70	13.66	14.64
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.63	3.11	1.60	1.72	1.25	2.27
FeO	2.00	0.81	1.84	0.80	1.58	0.75
MnO	0.06	0.06	0.06	0.04	0.06	0.08
MgO	1.01	1.15	0.94	1.05	0.69	0.95
CaO	0.90	0.83	0.83	1.02	1.00	1.14
Na <sub>2</sub> O	2.85	3.03	3.13	3.86	3.50	3.83
K <sub>2</sub> O	2.11	1.98	2.12	2.81	2.73	2.95
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.20	0.15	0.13	0.13	0.18	0.16
п.п.п.	0.13	0.15	0.12	0.05	0.13	0.21
H <sub>2</sub> O	1.97	1.96	2.04	1.80	1.98	2.04
Сумма	99.77	99.79	99.74	99.77	99.83	99.82
ГМ	0.21	0.20	0.18	0.23	0.23	0.26
ТМ	0.032	0.039	0.040	0.030	0.032	0.031
ФМ	0.06	0.07	0.06	0.05	0.05	0.06
ЖМ	0.30	0.39	0.39	0.18	0.21	0.21
НКМ	0.42	0.45	0.53	0.49	0.46	0.46
СИА	58	55	53	55	56	56

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

доминирует циркон, содержание которого в среднем по свитам составляет от 67 % до 83 % (каталевская свита), при этом в отдельных пробах оно достигает 93–98 %. Других минералов ассоциации заметно меньше: граната в среднем по свитам от 0.5 % до 8 %, турмалина 0.2–3 %, апатита 0.5–5 %, ильменита и связанного с ним лейкоксена в сумме 2–10%. Остальные минералы составляют первые проценты либо находятся в знаковых количествах. Вторую, подчиненную, фемическую ассоциацию минералов образуют хромит, магнетит, орто- и клинопироксен, роговая обманка, эпидот, оливин – минералы, происходящие из основных и ультраосновных магматических пород. Суммарное содержание этих минералов невелико, изменяясь в среднем по свитам от 4–11 % в бассейне р. Бута, до 22–25 % в районе п. Высокогорный. Основной минерал этой ассоциации – хромит, среднее содержание которого наибольшее в нижней части разреза – в журавлевской и ключевской свитах (8 и 16 %), снижаясь до 4 % и 0.7 % в приманкинской и каталевской. Еще меньше содержания клинопироксена (в среднем по свитам от 1 % до 6 %) и амфибола (от 2 % до 8 %), остальные минералы редки.



**Рис. 5.** Классификационная диаграмма  $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$ – $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$  для песчаных пород из нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня [17].

Условные обозначения см. на рис. 3.

По химическому составу песчаники изученных объектов достаточно близки (табл. 1). Выделяются лишь несколько повышенные содержания кремнекислоты в породах района п. Высокогорный, варьирующие в среднем по свитам от 74.71 % до 76.43 %. В песчаниках бассейна р. Бута содержание SiO<sub>2</sub> ниже и изменяется в среднем от 70.34 % до 72.65 %. Кроме того, в породах района п. Высокогорный несколько ниже содержания TiO<sub>2</sub> (0.38–0.40 % и 0.41–0.46 %, соответственно), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (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 FeO + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3.44–4.15 % и 2.53–3.02 %). Несмотря на некоторые незначительные различия, вероятно объясняющиеся влиянием местных источников сноса, всем изученным песчаникам свойственно характерное для граувакк преобладание Na<sub>2</sub>O (2.85–3.13 % и 3.50–3.86 %) над K<sub>2</sub>O (1.81–2.12 % и 2.73–2.95 %). На классификационной диаграмме соотношения логарифмов величин Na<sub>2</sub>O/K<sub>2</sub>O и SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [17] (рис. 5) фигуративные точки составов изученных песчаников группируются преимущественно в поле граувакк, и лишь незначительная их часть (главным образом, породы ключевской и приманкинской свит района п. Высокогорный) попадает в поле лититовых арений – разновидностей промежуточных между граувакками и аркозами.

По литохимическим модулям (табл. 1), используемым для получения объективной информации о составе исходных пород областей питания, степени их зрелости, литогенной либо петрогенной природе осадков, а также для корректных палеорекострукций обстановок осадконакопления [5, 8, 9, 14, 16, 26,

27, 44 и др.], изученные песчаники достаточно близки. Для песчаников характерны значения гидрозатного модуля ( $GM = (Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2$ ), изменяющиеся в среднем по свитам от 0.18 до 0.26, что свидетельствует о невысоком уровне их «зрелости» и, соответственно, образовании за счет механического разрушения материнских пород при подчиненной роли химического выветривания. По величине ГМ песчаники очень близки породам раннемелового Журавлевского террейна (0.14–0.26) [8]. Невысокая степень выветривания исходных пород подтверждается и низкими значениями индекса химического изменения ( $CIA = [Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)] \times 100$ ) [44], варьирующего в среднем от 53 до 58. По величине фемического модуля ( $FM = (Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO)/SiO_2$ ), позволяющего распознавать граувакки и аркозы [27], песчаники в основном соответствуют грауваккам, либо занимают промежуточное положение между ними и аркозами (0.05–0.07). Такие значения ФМ хорошо согласуются с низким содержанием в них обломков основных вулканитов и высоким – кварца, кремнистых и других кварцсодержащих пород. По ФМ песчаники близки песчаникам как Журавлевского (0.03–0.06), так и островодужного Кемского (0.04–0.07) террейнов Сихотэ-Алиня [6, 8]. Значения титанового модуля ( $TM = TiO_2/Al_2O_3$ ), позволяющего судить о составе материнских пород областей питания, в рассматриваемых песчаниках невысоки (от 0.030 до 0.040), что связано с преобладанием в областях сноса кислых изверженных пород, характеризующихся, в свою очередь, низкими значениями ТМ. По этому показателю песчаники близки к песчаникам как Кемского (0.031–0.035), так и Журавлевского (0.017–0.030) террейнов. Модуль нормированной щелочности ( $NKM = (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$ ) позволяет распознавать в осадочных породах примесь вулканического материала и, соответственно, помогает различать аркозы и граувакки [26, 27]. Относительно высокие значения НКМ (от 0.42 до 0.53) в целом соответствуют породам, занимающим промежуточное положение между граувакками и аркозами, и объясняются обилием в них слюд, полевых шпатов, и обломков кислых изверженных пород. По величине НКМ песчаники вполне сопоставимы с песчаниками Журавлевского (0.33–0.53) террейна [8]. Состав материнских пород источников питания помогает распознать еще один литохимический показатель – железный модуль ( $JM = (Fe_2O_3 + FeO + MnO)/(TiO_2 + Al_2O_3)$ ) [27]. Относительно невысокие его значения в изученных песчаниках (0.18–0.39) свидетельствуют о преимущественном влиянии на их формирование продуктов размыва кислых изверженных пород. Близкие значения ЖМ имеют песчаные породы как

Журавлевского (0.21–0.40), так и Кемского (0.27–0.37) террейнов [6, 8].

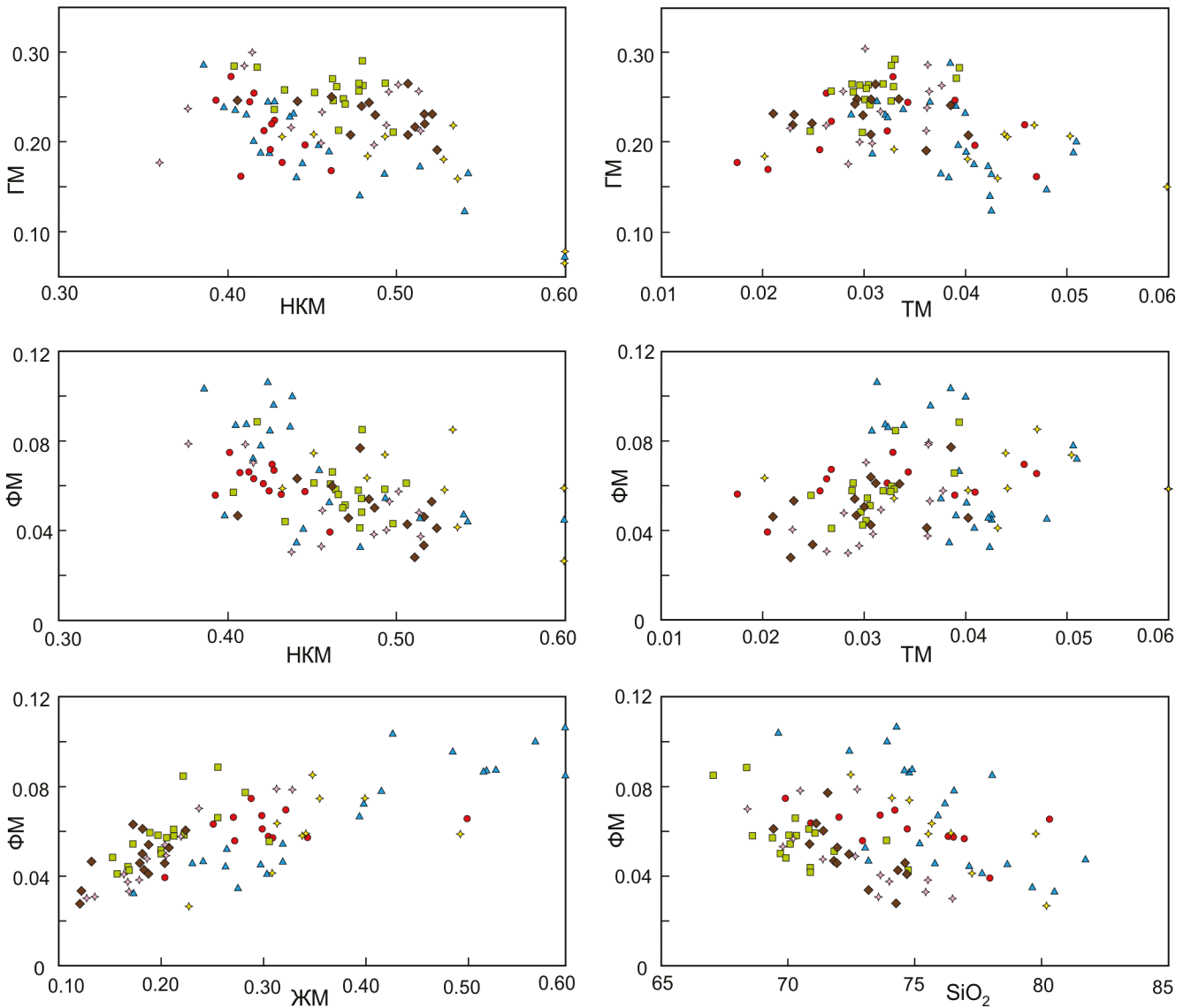
Величины и соотношения между литохимическими модулями, а также положение их фигуративных точек на ряде модульных диаграмм (положительная корреляция между парами модулей ФМ–ТМ, ФМ–ЖМ и отрицательная либо ее отсутствие между другими парами) (рис. 6) [26, 27], свидетельствуют о принадлежности изученных пород к петрогенным, прошедшим один цикл седиментации и формировавшимся без какой-либо существенной литодинамической сортировки обломочного материала.

В песчаных породах Северного Сихотэ-Алиня были изучены содержания и характер распределения редких и редкоземельных (РЗЭ) элементов. В качестве дополнительной информации были привлечены данные по их содержанию в алевролитах. В целом суммарные концентрации РЗЭ в породах относительно невелики и варьируют в среднем по свитам от 123 г/т до 149 г/т в районе п. Высокогорный и от 137 до 145 г/т – в бассейне р. Бута (табл. 2). Спектры распределения РЗЭ, нормализованных к составу хондрита [30], для всех изученных свит однотипны и характеризуются нормальными трендами распределения с умеренной степенью фракционирования и сравнительно невысоким отношением легких лантаноидов к тяжелым ( $La_N/Yb_N$  от 7.70 до 9.14) в районе п. Высокогорный и несколько повышенным ( $La_N/Yb_N$  от 9.12 до 12.03) – в басс. р. Бута (рис. 7). Помимо этого, спектры характеризуются отчетливо выраженной отрицательной европиевой аномалией ( $Eu/Eu^*$  0.54–0.58 и 0.57–0.60, соответственно). По сравнению с постархейским австралийским средним глинистым сланцем (РААС), принятым за средний состав верхней континентальной коры [19], все изученные терригенные породы в среднем незначительно обеднены как легкими, так и тяжелыми элементами (в 1.1–2.1 раза), и лишь Gd иногда находится в равных либо незначительно превышающих количествах.

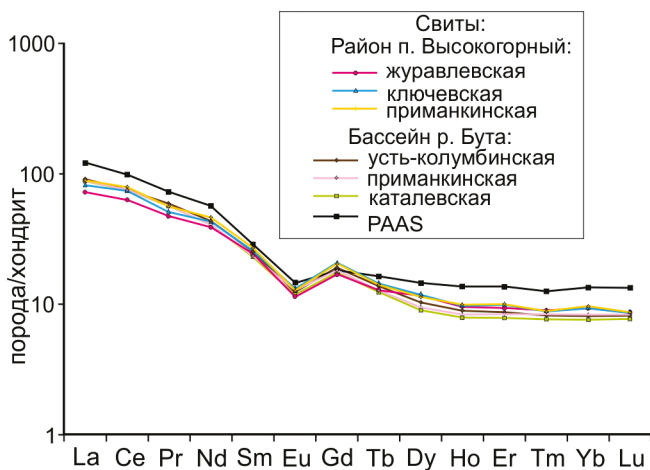
#### ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ И ПАЛЕОГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты изучения вещественного состава песчаников Северного Сихотэ-Алиня позволяют относить их к петрогенным грауваккам и, лишь частично, лититовым ареникам, характеризующимся невысокой степенью зрелости кластического материала и формировавшимся из практически не претерпевших химического выветривания материнских пород областей сноса. Положение фигуративных точек песчаников на диаграмме Q–F–L [34] (рис. 3, б), предназначенной для реконструкции тектонических





**Рис. 6.** Модульные диаграммы для песчаных пород из нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня [26, 27].  
Условные обозначения см. на рис. 3.



типов источников питания по составу породообразующих компонентов песчаников, свидетельствует, что помимо основного, континентального источника вещества, сложенного гранитно-метаморфическими и осадочными породами, в состав питающей провинции входила и расчлененная, практически разрушенная окраинно-континентальная магматическая дуга, в которой эрозия вскрыла гранитоидные интрузии корневой части этой дуги. Вследствии этого, в sedi-

**Рис. 7.** Спектры распределения РЗЭ, нормированных к хондриту [30], в терригенных породах изученных свит и сопоставление их с PAAS [19].

**Таблица 2. Средние содержания редких и редкоземельных элементов (г/т) в нижнемеловых терригенных породах Северного Сихотэ-Алиня.**

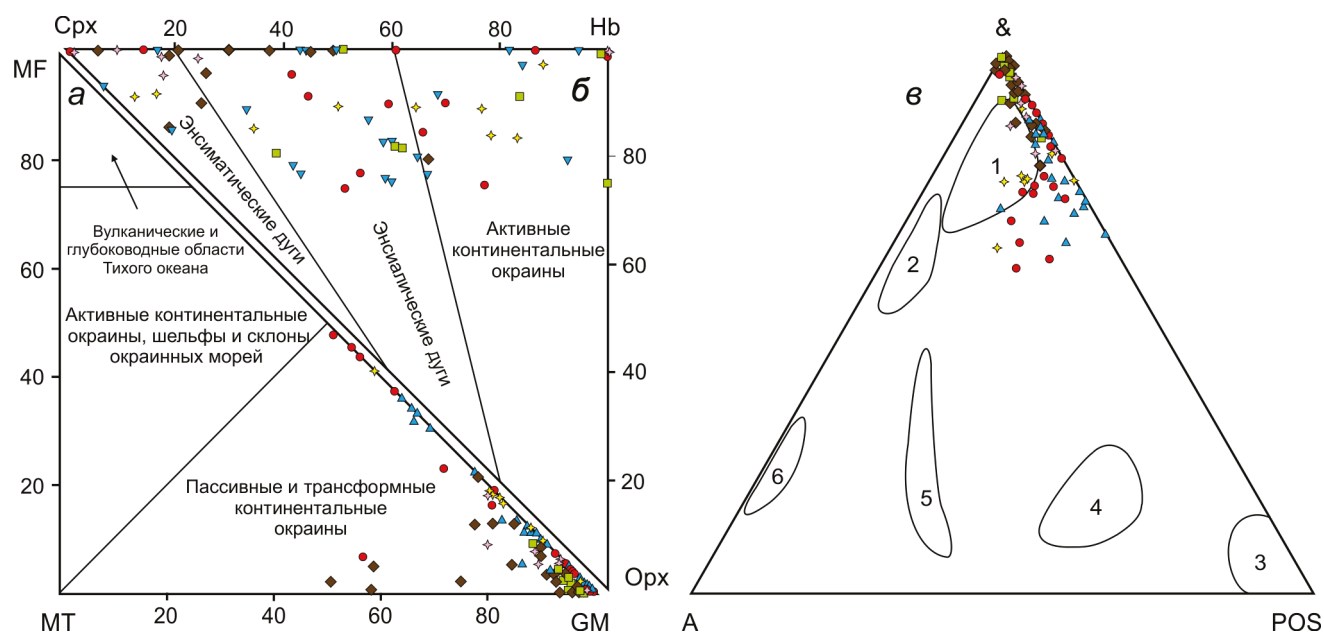
Компонент	Район п. Высокогорный			Бассейн р. Бута		
	1	2	3	4	5	6
n	10	30	13	14	2	8
Li	13.96	32.48	33.38	33.41	40.02	54.54
Be	1.26	1.44	1.36	-	-	-
Sc	7.78	10.02	10.40	7.47	7.33	7.78
V	61.30	70.93	66.02	55.83	54.67	63.65
Cr	53.84	67.86	53.58	52.49	54.83	55.25
Co	9.81	9.45	6.44	10.40	16.81	17.15
Ni	24.83	19.46	18.12	19.45	14.37	18.82
Cu	22.15	25.05	20.31	19.89	85.55	21.89
Zn	69.05	139.52	89.89	86.42	73.55	71.40
Ga	14.54	15.93	15.80	16.43	17.79	17.65
Rb	76.16	116.22	106.48	103.11	106.32	99.35
Sr	124.93	130.15	116.71	159.20	191.50	170.77
Y	16.21	17.36	16.60	15.71	13.38	13.32
Zr	165.24	114.44	156.46	77.55	82.84	68.16
Nb	9.10	9.69	9.48	9.54	8.92	9.11
Mo	0.94	0.74	0.59	1.14	0.69	0.67
Sn	2.85	5.92	2.69	-	-	-
Cs	5.25	14.74	6.21	12.86	11.37	14.60
Ba	430.30	519.68	455.14	424.19	634.16	514.04
La	22.85	25.73	28.21	27.71	27.72	28.10
Ce	51.65	60.57	64.85	58.95	61.42	61.06
Pr	5.79	6.22	6.87	6.88	6.97	7.00
Nd	23.55	25.67	27.83	24.96	24.48	24.34
Sm	4.73	4.95	5.25	4.68	4.56	4.45
Eu	0.85	0.96	0.95	0.89	0.96	0.88
Gd	4.42	5.35	5.32	4.70	4.72	4.57
Tb	0.61	0.67	0.67	0.62	0.60	0.59
Dy	3.76	3.82	3.70	3.15	3.04	2.91
Ho	0.69	0.70	0.71	0.61	0.60	0.57
Er	1.97	2.09	2.10	1.73	1.77	1.66
Tm	0.29	0.28	0.29	0.25	0.27	0.25
Yb	1.96	1.95	2.03	1.62	1.74	1.60
Lu	0.28	0.28	0.28	0.25	0.27	0.25
Hf	2.47	3.70	3.70	-	-	-
Ta	0.47	0.66	0.63	-	-	-
W	1.37	1.76	1.53	-	-	-
Pb	21.88	18.78	15.37	28.07	17.48	17.22
Th	7.64	9.48	10.36	10.54	10.68	9.99
U	1.86	1.77	1.98	2.15	2.23	2.06
Eu/Eu*	0.56	0.58	0.54	0.57	0.60	0.58
La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	7.70	8.65	9.14	11.76	9.12	12.03

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

ментационный бассейн поступали в основном именно продукты размыва сиалического фундамента дуги, а оставшиеся не эродированными основные-средние вулканы играли второстепенную роль. На диаграмме, построенной по результатам изучения песков и песчаников, вскрытых глубоководным бурением в обрамлении Тихого океана и окраинных морей [38] (рис. 3, в), песчаники соответствуют породам, питающей провинцией которых являются континентальные дуги, находящиеся под воздействием трансформных разломов (сдвигов). Современными примерами подобных областей сноса являются участки конвергентной окраины Северной Америки: Каскадия, Мексика, Гватемала и др.

Надежным индикатором тектонического типа области питания, а также состава слагающих ее материнских пород, является состав, содержание и определенные соотношения в песчаниках тяжелых обломочных минералов [7, 11, 20, 36, 41, 43 и др.]. Содержания и соотношения отдельных тяжелых минералов и их ассоциаций в изученных песчаниках, а также расположение фигуративных точек на диаграммах MF–MT–GM, Орх–Нв–Срх и А–&–POS [36, 42, 43] (рис. 4, 8) позволяют говорить, что область питания сочетала в себе два контрастных источника обломочного вещества. Основным источником, формировавшим сиалическую ассоциацию минералов, были гранитно-метаморфические породы, слагавшие блоки зрелой континентальной коры (кратоны и краевые части рифтов), участвовавшие в строении восточной окраины Евразии [1], а также фундамент окраинно-континентальной магматической дуги. Вторым, подчиненным, источником кластики, поставившим минералы фемической ассоциации, были продукты размыва основных и средних вулканических дуги, а также ультраосновные магматиты офиолитов, участвовавших в строении широко распространенных на Сихотэ-Алине юрских аккреционных призм.

Химический состав некоторых тяжелых обломочных минералов позволяет выяснить геологическую природу и петрографический состав пород областей питания [7, 10, 41–43, 45 и др.]. Результаты изучения состава некоторых из них (клинопироксенов, роговых обманок, гранатов и хромитов) приведены в табл. 3. Клинопироксены по составу соответствуют, в основном, диопсиду и авгиту, реже салиту. На дискриминантной диаграмме F<sub>1</sub>–F<sub>2</sub> [45] (рис. 9, а), позволяющей установить их магматический источник, большинство клинопироксенов соответствуют, в основном, базальтам океанического дна и, в меньшей мере, внутриплитным и островодужным базальтам. Положение точек состава обломочных амфиболов на диаграмме Fe–Al–10Ti [42] (рис. 9, б), благода-



**Рис. 8.** Возможные типы областей питания для песчаных пород раннего мела Северного Сихотэ-Алиня по тяжелым обломочным минералам.

*a* – MF–MT–GM и *б* – Орх–Hb–Срх [42, 43]. Суммы содержаний: MF – оливина, пироксенов, зеленой роговой обманки; MT – эпидота, граната, сине-зеленых амфиболов; GM – циркона, турмалина, ставролита, дистена, силлиманита и андалузита. Орх – ортопироксен, Hb – амфибол, Срх – клинопироксен; *в* – &–A–POS [36]. A – амфиболы и эпидоты, POS – клинопироксены, ортопироксены, оливины и хромиты, & – другие прозрачные минералы. Типы питающих провинций: 1 – континентальные блоки (кратоны и краевые части рифтов); 2 – коллизионные орогены; 3–6 – магматические дуги: 3 – не эродированные, 4 – переходные слабо эродированные, 5 – переходные эродированные, 6 – сильно эродированные. Условные обозначения см. на рис. 3.

ря низким суммарным содержаниям хрома и титана, подтверждает предположение об участии в составе областей питания островодужных вулканитов, а также свидетельствует о присутствии в этих областях метаморфических и ультраосновных интрузивных пород офиолитов, входивших в состав как основания дуги, так и юрско-раннемеловых аккреционных комплексов Сихотэ-Алиня. На участие в составе области питания ультраосновных и основных интрузивных и вулканических пород указывает и присутствие в тяжелой фракции песчаников достаточно заметного количества хромитов. Все хромиты разделяются на два типа [25] (рис. 9, в): с низким (менее 1.5 %) содержанием  $TiO_2$ , происходящие из основных и ультраосновных магматических пород офиолитов, и с высоким (более 1.5 %) – из щелочных базальтов внутриплитных поднятий. Большинство гранатов изученных песчаников относятся к группе альмандина ( $Al_2O_3$  – 17.66–23.33 %,  $FeO + Fe_2O_3$  – 16.13–34.51 %), и лишь иногда в них присутствует гроссуляровый либо спессартитовый компонент. Расположение фигуративных точек состава гранатов на диаграмме Mg–Mn–Ca [50] (рис. 9, г) свидетельствует, что их источниками, очевидно, были гранитоиды и метаморфические породы

различной степени метаморфизма, участвовавшие в строении зрелой континентальной земной коры, а также, вероятно, фундамента энсиалической дуги.

Геохимические особенности изученных пород, характерные для них умеренные значения литохимических модулей ФМ, ЖМ, НКМ и ТМ, относительно невысокие концентрации РЗЭ, при незначительной обогащенности легкими элементами по сравнению с тяжелыми, а также отчетливо выраженная отрицательная Eu аномалия позволяют предполагать участие в строении области питания как кислых изверженных, так и, в значительно меньшей мере, основных и средних вулканических пород. Геодинамическая интерпретация геохимического состава пород, осуществленная при помощи ряда дискриминантных диаграмм, позволила получить дополнительную информацию о тектоническом типе и составе материнских пород областей питания. На диаграмме, предназначенной для разграничения питающих провинций различных типов и стадий развития островных дуг [37] (рис. 10, а), подавляющее большинство точек изученных песчаников ложится в поле пород, формировавшихся за счет разрушения окраинно-континентальной либо значительно эродированной островной дуги, в которой раз-

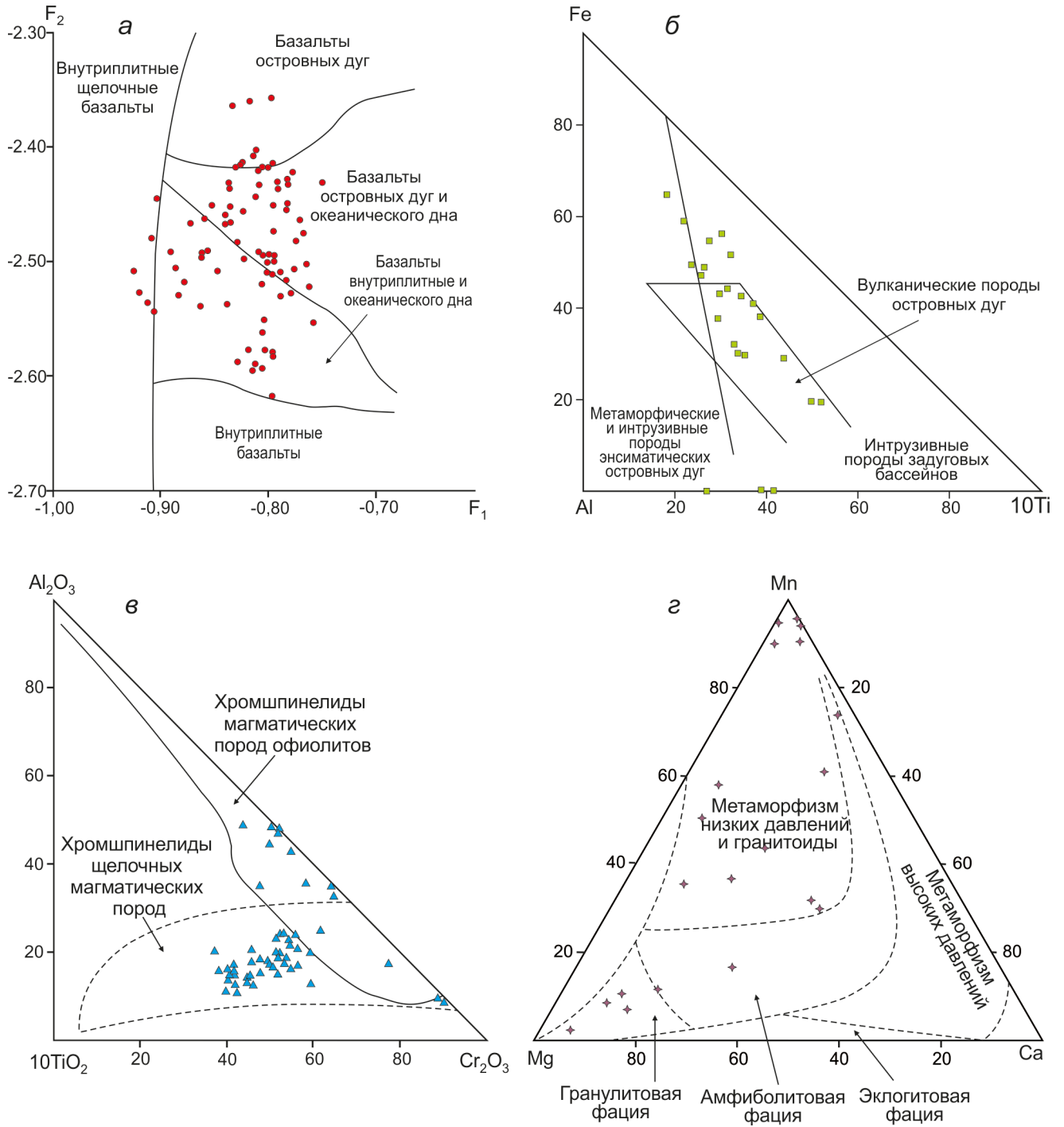




Таблица 3. (Окончание).

Номер пробы	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма
МП-7/3	-	3.16	8.93	46.31	30.34	0.34	11.54	-	-	-	100.64
МП-14/1	-	0.45	22.48	37.55	29.61	0.27	9.40	-	-	-	99.78
МП-14/2	-	2.02	11.57	47.34	25.54	0.23	12.05	-	-	-	98.76
ВК-118	-	2.47	11.06	43.69	30.39	0.28	11.47	-	-	-	99.38
ВК-114/1	-	4.00	8.87	41.64	34.32	0.39	11.36	-	-	-	100.49
ВК-114/2	-	4.70	8.36	41.23	34.61	0.37	10.86	-	-	-	100.13
ВК-113	-	4.10	9.44	43.86	29.48	0.38	12.44	-	-	-	99.70
ВК-105/1	-	4.22	9.29	38.54	37.25	0.50	10.81	-	-	-	100.62
ВК-105/2	-	2.05	13.35	43.29	29.67	0.59	12.11	-	-	-	101.06
ВК-113	-	3.49	9.22	43.18	31.47	0.56	11.86	-	-	-	99.79
ВК-27/1	-	2.16	12.29	46.59	29.43	0.33	10.37	-	-	-	101.18
ВК-27/2	-	0.08	17.57	48.20	22.72	0.47	9.68	-	-	-	98.75
ВК-118/1	-	1.77	13.33	46.58	26.54	0.20	12.48	-	-	-	100.91
ВК-118/2	-	4.21	11.14	40.32	36.05	0.40	10.78	-	-	-	99.91
ВК-115/1	-	0.20	16.06	47.58	27.23	0.55	7.62	-	-	-	99.26
ВК-115/2	-	1.96	12.48	44.25	28.42	0.55	10.97	-	-	-	98.65
ВК-120/1	-	2.47	8.74	44.27	28.31	0.39	11.84	-	-	-	96.03
ВК-120/2	-	4.59	10.06	36.13	38.63	0.45	10.46	-	-	-	100.33
ВК-116/1	-	4.62	9.92	40.37	34.41	0.42	10.85	-	-	-	100.59
ВК-116/2	-	0.08	4.12	64.38	19.25	0.39	11.87	-	-	-	100.10
ВК-8/1	-	2.72	11.07	45.63	29.29	0.41	9.95	-	-	-	99.06
ВК-8/2	-	2.66	11.88	45.66	28.18	0.37	11.52	-	-	-	100.29
ВК-8/3	-	3.24	10.73	47.11	27.93	0.40	11.00	-	-	-	100.42
ВК-8/4	-	0.12	25.56	39.68	23.36	0.42	10.21	-	-	-	99.36
ВК-34/1	-	4.92	9.23	40.90	33.78	0.42	10.78	-	-	-	100.06
ВК-34/2	-	2.60	11.26	48.29	25.18	0.41	11.89	-	-	-	99.64
ВК-34/3	-	3.12	11.15	45.35	27.96	0.37	11.59	-	-	-	99.55
ВК-75/1	-	2.97	9.59	43.27	33.74	0.29	11.51	-	-	-	101.37
ВК-75/2	-	2.26	13.15	43.72	27.98	0.32	12.31	-	-	-	99.76
ВК-75/3	-	3.04	10.46	40.66	34.76	0.34	10.85	-	-	-	100.14
ВК-104/1	-	1.11	13.25	48.75	22.78	0.43	13.42	-	-	-	98.88
ВК-104/2	-	3.90	7.64	41.35	36.43	0.40	9.26	-	-	-	98.98
ВК-100	-	3.51	10.99	41.80	33.24	0.45	10.84	-	-	-	100.84
ВК-96/1	-	4.40	6.54	38.01	43.86	0.39	8.26	-	-	-	101.48
ВК-96/2	-	0.17	21.09	40.19	30.36	0.40	8.89	-	-	-	101.12
ВК-95/1	-	2.40	9.94	48.30	30.58	0.33	13.01	-	-	-	100.57
ВК-95/2	-	4.18	8.46	42.30	35.72	0.38	10.46	-	-	-	101.52
ВК-95/3	-	4.18	9.54	38.33	39.37	0.38	9.70	-	-	-	101.50
Гранаты											
МП-19	38.62	0.05	21.34	0.04	34.27	3.16	2.67	0.84	0.04	-	101.03
МП-24/1	38.04	0.08	20.34	0.07	34.51	1.36	2.47	2.01	-	-	98.90
МП-24/2	38.00	0.05	20.96	0.04	31.11	7.44	2.52	0.76	-	-	100.89
МП-75/1	37.85	0.06	20.81	0.08	22.90	17.94	0.25	1.13	0.06	0.03	101.11
МП-75/2	37.82	0.06	19.81	0.12	29.49	7.93	0.19	1.95	0.04	0.03	97.44
МП-69/1	39.48	0.07	23.33	0.26	26.23	0.51	10.96	0.98	-	-	100.83
МП-69/2	36.06	0.12	21.35	0.16	32.28	5.71	2.70	0.72	0.02	-	99.15
МП-69/3	37.27	0.05	20.51	0.12	27.77	14.72	0.03	0.65	0.03	-	101.15
МП-69/4	38.99	0.03	20.88	0.27	30.00	1.09	6.91	1.84	0.02	-	100.01
МП-69/5	38.17	0.06	21.34	0.10	32.87	1.29	4.41	1.65	-	-	99.89
МП-7	38.42	0.10	21.07	0.07	34.51	0.83	4.58	0.80	0.08	0.01	100.47
МП-62/1	38.51	0.05	20.67	0.06	33.98	1.13	4.61	1.01	0.02	0.01	100.07
МП-62/2	37.47	0.15	18.36	0.01	18.60	23.06	1.11	0.50	0.09	-	99.35
МП-62/3	37.06	0.05	17.66	0.01	22.94	13.44	1.54	4.61	0.05	-	97.35
МП-62/4	36.89	0.11	19.56	0.05	24.18	17.71	0.05	0.59	0.13	0.01	99.28
МП-19	38.62	0.05	21.34	0.04	34.27	3.16	2.67	0.84	0.04	-	101.03
ВК-96/1	38.71	0.40	20.39	0.07	31.49	3.64	2.00	4.03	0.02	0.02	100.77
ВК-96/2	36.96	0.41	21.13	0.12	31.71	4.29	2.25	4.18	0.03	0.01	101.08
ВК-85/1	37.25	0.18	20.90	0.03	16.13	25.72	0.70	0.20	0.01	0.02	101.16
ВК-85/2	37.23	0.06	21.51	0.02	29.38	6.05	2.60	2.64	0.02	-	99.53

Примечание. FeO\* – общее железо. Прочерк – не обнаружено.

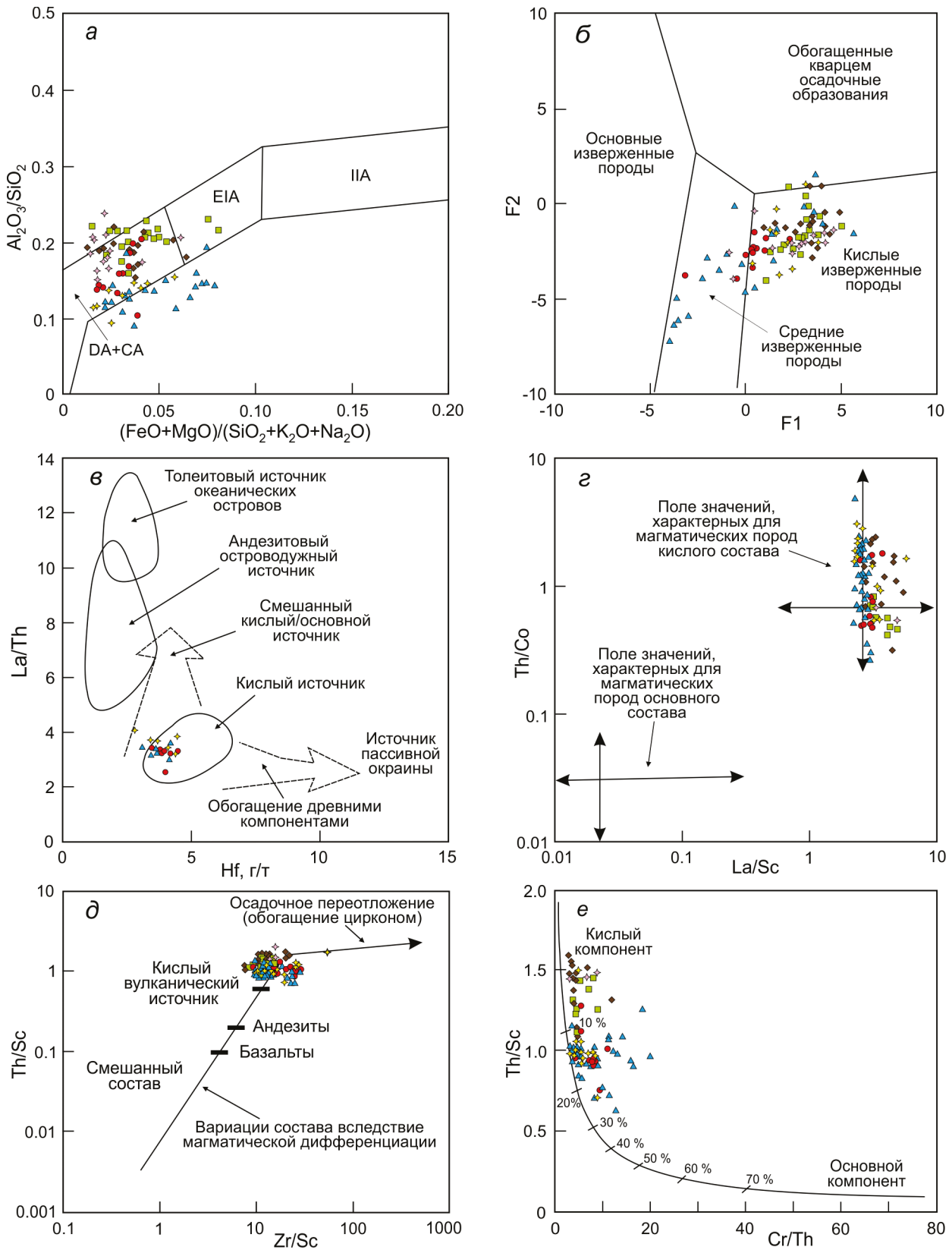


**Рис. 9.** Диаграммы составов тяжелых обломочных минералов из песчаников раннего мела Северного Сихотэ-Алиня и их вероятные вулканические источники.

*a* – для клинопироксенов [45]:  $F_1 = -0.012 \times SiO_2 - 0.0807 \times TiO_2 + 0.0026 \times Al_2O_3 - 0.0012 \times FeO - 0.0026 \times MnO + 0.0087 \times MgO - 0.0128 \times CaO - 0.0419 \times Na_2O$ ;  $F_2 = -0.0496 \times SiO_2 - 0.0818 \times TiO_2 - 0.02126 \times Al_2O_3 - 0.0041 \times FeO - 0.1435 \times MnO - 0.0029 \times MgO - 0.0085 \times CaO + 0.0160 \times Na_2O$ ; *б* – для амфиболов [42]; *в* – для хромитов [25]; *г* – для гранатов [50].

**Рис. 10.** Возможные источники питания для терригенных отложений раннего мела Северного Сихотэ-Алиня по геохимическим данным.

*a* – типы питающих провинций магматических дуг [37]. Питающие провинции магматических дуг: ПА – островные океанические незрелые, EIA – слабо эродированные островные, DA – сильно эродированные островные, CA – окраинно-континентальные;



б-д – вероятные составы материнских пород питающих провинций на диаграммах: б – F1-F2 [47].  $F1 = 30.638 \times \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 12.541 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{Al}_2\text{O}_3 + 7.329 \times \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 12.031 \times \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 35.402 \times \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 6.382$ ;  $F2 = 56.5 \times \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 - 10.879 \times \text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{Al}_2\text{O}_3 + 30.875 \times \text{MgO}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 5.404 \times \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 + 11.112 \times \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 - 3.89$ ; в – Hf-La/Th [35]; з – La/Sc-Th/Co [33]; д – Zr/Sc-Th/Sc [40]; е – Cr/Th-Th/Sc [32]. Условные обозначения см. на рис. 3.



мыву подвергались практически только сохранившиеся породы ее основания. Положение фигуративных точек геохимического состава пород на парных диаграммах  $F_1-F_2$ , Hf-La/Th, La/Sc-Th/Co и Zr/Sc-Th/Sc [33, 35, 40, 47] (рис. 10, б-д), предназначенных для распознавания состава материнских пород питающих провинций, свидетельствует, что основным источником вещества были кислые магматические породы, при довольно незначительной доле участия средней и, возможно, основной вулканокластике, а также осадочных пород, обогащенных древними обломочными компонентами. Долю участия компонентов основного-среднего состава можно оценить по положению точек на диаграмме Cr/Th-Th/Sc [32] (рис. 10, е). Эта доля, очевидно, не превышала 20–30 %, составляя в среднем менее 15 %.

Таким образом, область питания сочетала в себе древнюю сиалическую сушу и глубоко расчлененную окраинно-континентальную (энсиалическую) дугу, в которых эрозия вскрыла батолиты гранитоидов, подстилавших вулканиты. Отложения формировались преимущественно за счет разрушения гранитно-метаморфических комплексов суши и фундамента дуги, а сильно редуцированные вулканические образования самой дуги играли второстепенную роль. Кроме того, можно предполагать присутствие в составе области питания фрагментов юрско-раннемеловых аккреционных призм Сихотэ-Алиня, в строении которых участвовали офиолиты.

Проведенные А.Н. Диденко и его соавторами [4] U–Pb изотопные геохронологические исследования детритовых цирконов из нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня, в том числе и изученных нами, позволили установить, что источниками сиалической кластике были гранитоиды нескольких возрастных групп, располагавшиеся в пределах Северо-Китайского кратона.

Палеогеодинамические обстановки формирования нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня по порообразующим компонентам песчаников реконструируются при помощи диаграммы Дж. Мейнарда и его соавторов [39] (рис. 3, з), на которой фигуративные точки изученных пород наиболее соответствуют обстановкам бассейнов активных континентальных окраин, осложненных сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам типа Калифорнийского залива и, частично, бассейнов, сопряженных с окраинно-континентальными магматическими дугами. На накопление отложений в бассейне, связанном с обстановкой трансформного скольжения литосферных плит указывает и характер соотношения ассоциаций тяжелых обломочных минералов в песчаниках, а также расположение их то-

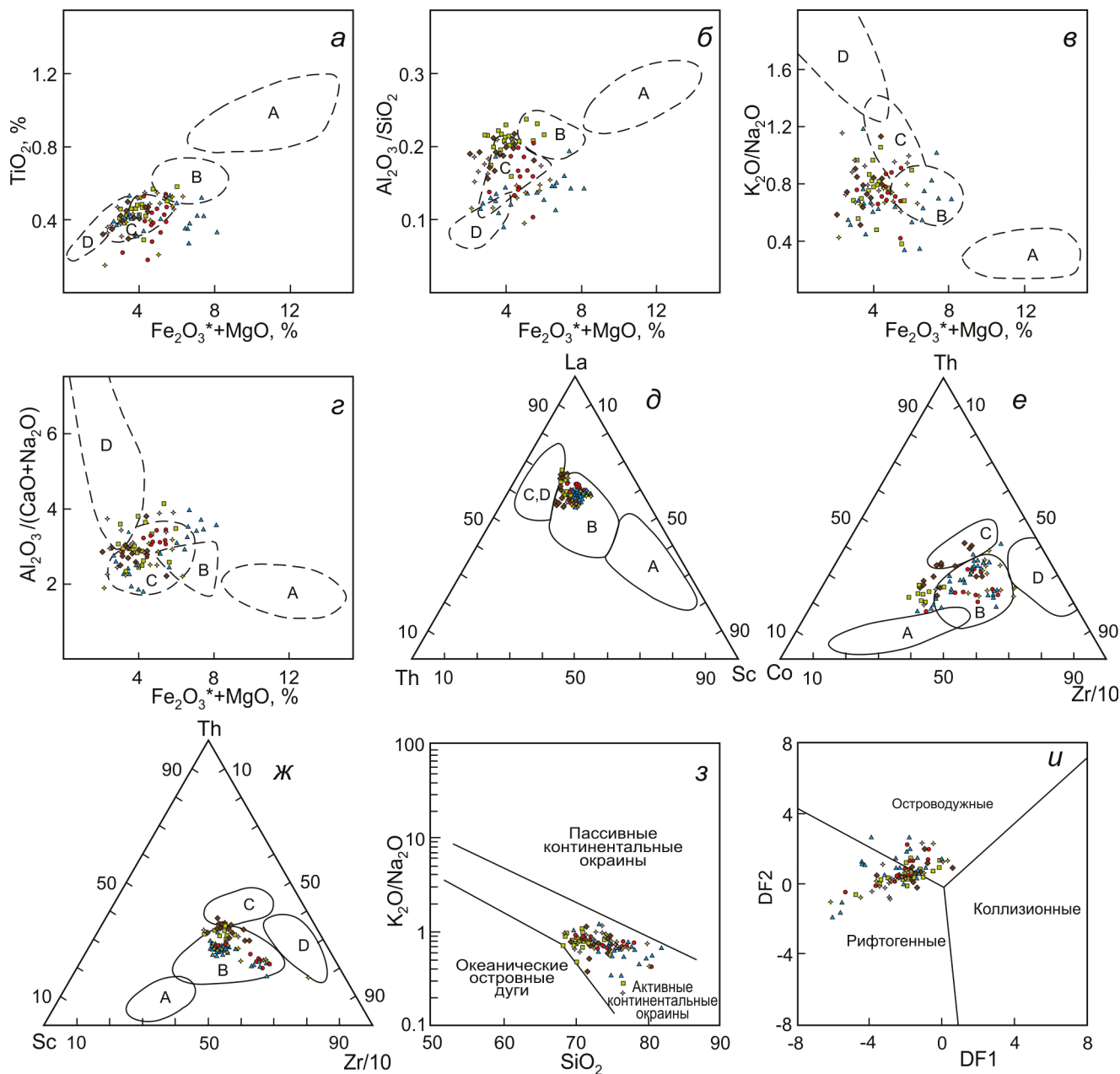
чек на диаграммах MF–MT–GM и Crx–Hb–Orx [42, 43] (рис. 8, а).

Палеогеодинамическая интерпретация геохимического состава пород осуществлена при помощи дискриминантных диаграмм, приведенных на рис. 11. На серии диаграмм М. Бхатия и А. Крука [28, 29] (рис. 11, а–ж), применяющихся для разделения песчаников из бассейнов различных тектонических обстановок, изученные песчаники попадают либо приближаются, главным образом, в поля осадочных бассейнов активных континентальных окраин андийского типа, включающих в себя, в понимании ряда авторов [28, 39, 46], и окраины, осложненные сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам. Значительно реже точки ложатся в поле бассейнов, сопряженных с окраинно-континентальными магматическими дугами. Еще более однозначно обстановки накопления изученных отложений устанавливаются на диаграмме Б. Розера и К. Корша [46] (рис. 11, з), где все точки состава песчаников достаточно компактно группируются в поле седиментационных бассейнов активных континентальных окраин. На дискриминантной диаграмме DF1–DF2 [51] (рис. 11, и), применяющейся для пород с высоким содержанием кремнезема ( $SiO_2$  более 63 %), фигуративные точки меловых песчаников занимают промежуточное положение между полями островодужных и рифтогенных обстановок, последние из которых, в свою очередь, включают и обстановки связанные с трансформными границами плит [15, 48, 49].

В целом, обращает на себя внимание расположение фигуративных точек вещественного состава пород на всех приведенных генетических диаграммах. Поскольку на этих диаграммах, в силу достаточной давности их разработки (80–90-е годы прошлого столетия), еще не выделялись поля, соответствующие обстановкам трансформного скольжения литосферных плит, точки пород попадают в поля, соответствующие нескольким различным геодинамическим обстановкам либо источникам питания. Такое «промежуточное» положение точек на всех диаграммах вероятно и является характерным и достаточно надежным признаком седиментации в обстановке трансформной окраины, когда в область размыва попадают краевые части континентов, окраинно-континентальные дуги и ранее аккрецированные фрагменты активных окраин [8, 9].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для реконструкции геодинамических условий формирования нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня, а также для определения типа и состава пород источников питания были изучены петро-



**Рис. 11.** Палеогеодинамические обстановки формирования терригенных отложений раннего мела Северного Сихотэ-Алия на основании интерпретации геохимических данных.

*a–ж* – типы седиментационных бассейнов [28, 29]. Поля значений геохимических параметров древних песчаников из бассейнов, сопряженных с: А – океаническими, В – континентальными островными дугами, С – активными, D – пассивными континентальными окраинами.  $Fe_2O_3^*$  – общее железо; *з* – бассейновые обстановки для песчано-алевритовых пород [46]; *и* – возможные типы геодинамических обстановок для высококремнистых пород [51].  $DF1 = -0.263 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 0.604 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + 1.725 \times \ln(Fe_2O_3_{общ}/SiO_2)_{adj} + 0.66 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + 2.191 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} + 0.144 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} - 1.304 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} + 0.054 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} - 0.33 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} + 1.588$ ;  $DF2 = -1.196 \times \ln(TiO_2/SiO_2)_{adj} + 1.064 \times \ln(Al_2O_3/SiO_2)_{adj} + 0.303 \times \ln(Fe_2O_3_{общ}/SiO_2)_{adj} + 0.436 \times \ln(MnO/SiO_2)_{adj} + 0.838 \times \ln(MgO/SiO_2)_{adj} + 0.407 \times \ln(CaO/SiO_2)_{adj} + 1.021 \times \ln(Na_2O/SiO_2)_{adj} - 1.706 \times \ln(K_2O/SiO_2)_{adj} - 0.126 \times \ln(P_2O_5/SiO_2)_{adj} - 1.068$ . Условные обозначения см. на рис. 3.

графический состав, тяжелые обломочные минералы (включая химический состав некоторых из них), а также геохимические особенности песчаных пород. Дополнительно были привлечены данные по геохимии алевритов.

Проведенные исследования вещественного состава песчаников показали, что по своим минералого-геохимическим параметрам они соответствуют грауваккам и лишь частично лититовым аренитам, при этом являются петрогенными или «first cycle» породами, образовавшимися преимущественно за счет механического разрушения пород источников питания. Они характеризуются слабой литодинамической переработкой материнских пород, низкой степенью зрелости обломочного материала и относительно высокой скоростью его захоронения.

Палеогеодинамическая интерпретация всей совокупности полученных в процессе исследования данных свидетельствуют, что в раннемеловое время осадконакопление происходило вдоль границы континент–океан в бассейне, связанном с крупномасштабными сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам, примером которого могут служить бассейны Калифорнийской окраины [31].

Область питания, поставившая обломочный материал в этот седиментационный бассейн, вероятно, сочетала в себе несколько источников. Доминирующим источником кластики была сиалическая суша, сложенная гранитно-метаморфическими и древними осадочными комплексами. Об этом свидетельствуют, в частности, достаточно высокие содержания в обломочной части песчаников кварца и кислого плагиоклаза, резкое преобладание среди тяжелых минералов их сиалической ассоциации, состав обломочных гранатов, а также геохимические особенности пород. Результаты U–Pb геохронологических исследований детритовых цирконов [4] свидетельствуют, что эти источники сиалической кластики, либо большинство из них, располагались в пределах Северо-Китайского кратона.

Следующим по значению источником вещества была зрелая, глубоко расчлененная окраинно-континентальная магматическая дуга, вероятно синхронная с юрской аккреционной призмой Самаркинского террейна и его аналогов [22]. Островодужная природа этого источника устанавливается по преимущественно граувакковому составу кластики, присутствию типичной для островодужных вулканитов фемической ассоциации тяжелых минералов, составу обломочных клинопироксенов, амфиболов и части хромитов, имеющих островодужные характеристики, а также ряду геохимических параметров изученных пород. Источ-

ником материала были вулканические образования дуги. Вместе с тем, вскрытые эрозией гранитно-метаморфические комплексы основания дуги служили еще одним, дополнительным, источником сиалического обломочного материала.

Еще одним, второстепенным, источником фемической кластики были фрагменты юрско-раннемеловых аккреционных призм Сихотэ-Алиня, в строении которых участвовали ультраосновные и основные магматические породы офиолитов, о чем свидетельствует присутствие среди тяжелых минералов хромита, магнетита, пироксенов, амфибола и оливина, обладающих внутриплитными характеристиками.

Следовательно, область питания для нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня была гетерогенной. Сочетание в ее пределах таких существенно различающихся источников, как краевые части континентов, фрагменты островных дуг и участки океанической коры, является главным и характерным признаком седиментации в бассейнах, формирование которых связано с обстановками трансформного скольжения литосферных плит, а песчаники с подобным составом кластики являются главным ее признаком.

Таким образом, проведенные исследования показали, что нижнемеловые отложения Северного Сихотэ-Алиня накапливались в седиментационном бассейне, пространственно и генетически связанном с режимом трансформного скольжения литосферных плит, что позволяет рассматривать их как отложения раннемелового Журавлевского синдвигового террейна.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
2. Голозубов В.В. Тектоника юрских и нижнемеловых комплексов северо-западного обрамления Тихого океана. Владивосток: Дальнаука, 2006. 239 с.
3. Государственная геологическая карта Российской Федерации. 1:1 000 000. Лист М-54 (3-е поколение). Серия Дальневосточная / Сост. В.А. Дымович. СПб.: Изд-во СПб. картфабрика ВСЕГЕИ, 2017.
4. 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-Алиньского орогенного пояса: тектонические следствия // Тихоокеан. геология. 2020. Т. 39, № 1. С. 3–23.
5. 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.
6. Малиновский А.И., Голозубов В.В., Симаненко В.П. Мит-

- рохин А.Н. Кемский террейн (Восточный Сихотэ-Алинь) – фрагмент раннемеловой островодужной системы восточной окраины Азии // Тихоокеан. геология. 2005. Т. 24, № 6. С. 38–59.
7. 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.
8. 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.
9. Малиновский А.И. Вещественный состав, источники питания и геодинамические обстановки накопления меловых отложений Западно-Сахалинского террейна // Литология и полез. ископаемые. 2022. № 2. С. 231–251.
10. Маркевич П.В. Геосинклинальное терригенное осадконакопление на востоке Азии в фанерозое: На примере Сихотэ-Алиня и Камчатки. М.: Наука, 1985. 118 с.
11. Маркевич П.В., Филиппов А.Н., Малиновский А.И., Михайлик Е.В., Китаев И.В., Нечаев В.П. Геосинклинальный литогенез на границе континент-океан. М.: Наука, 1987. 177 с.
12. 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.
13. Маркевич П.В., Коновалов В.П., Малиновский А.И., Филиппов А.Н. Нижнемеловые отложения Сихотэ-Алиня. Владивосток: Дальнаука, 2000. 200 с.
14. 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 полез. ископаемые. 2013. № 1. С. 70–96.
15. 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 полез. ископаемые. 2019. № 5. С. 439–465.
16. Медведева С.А. Возможность применения литохимии для сопоставления и корреляции отложений на примере Комсомольского разреза Северного Сихотэ-Алиня (Дальний Восток России) // Тихоокеан. геология. 2019. Т. 38, № 4. С. 74–89.
17. Петтиджен Ф.Дж., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 535 с.
18. Симаненко В.П. Нижнемеловая базальт-андезитовая ассоциация Северного Сихотэ-Алиня. // Тихоокеан. геология. 1990. № 6. С. 86–95.
19. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
20. Тучкова М.И., Маркевич П.В., Крылов К.А., Копорунин В.И., Григорьев В.Н. Минералого-петрографический состав и геодинамические условия накопления меловых отложений Пенжинской губы // Литология и полез. ископаемые. 2003. № 33. С. 197–208.
21. Филиппов А.Н. Формационный анализ мезозойских отложений западного Сихотэ-Алиня. Владивосток: ДВО РАН СССР, 1990. 144 с.
22. Филиппов А.Н. Вещественный состав и питающие провинции мезозойских песчаников Сихотэ-Алиня // Литология и полез. ископаемые. 2012. № 1. С. 78–97.
23. 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) // Докл. АН. 2004. Т. 394, № 6. С. 791–795.
24. Шутов В.Д. Классификация песчаников // Литология и полез. ископаемые. 1967. № 5. С. 86–102.
25. Щека С.А., Вржосек А.А. Ультрасосновой вулканизм Тихоокеанского комплекса и вопросы систематики меймечитов и коматиитов // Вулканология и сейсмология. 1983. № 2. С. 3–16.
26. Юдович Я.Э. Региональная геохимия осадочных толщ. Л.: Наука, 1981. 276 с.
27. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
28. Bhatia M.R. Plate tectonic and geochemical composition of sandstones // J. Geol. 1983. V. 91, N 6. P. 611–627.
29. Bhatia M.R., Crook K.A.W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins // Contrib. Mineral. Petrol. 1986. V. 92. P. 181–193.
30. Boynton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // Rare Earth element geochemistry / Ed. P. Henderson. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 63–114.
31. Christie-Blick N., Biddle K.T. Deformation and basin formation along strike-slip faults // Strike-slip deformation, basin formation, and sedimentation: Society of economic paleontologists and mineralogists special publication / Eds K.T. Biddle, N. Christie-Blick. 1985. V. 37. P. 1–34.
32. Condie K.C., Wronkiewicz D.A. The Cr/Th ratio in Precambrian pelites from the Kaapvaal Craton as an index of craton evolution // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. V. 97, N 3–4. P. 256–267.
33. Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // Chem. Geol. 2002. V. 191. P. 305–327.
34. Dickinson W.R., Suczek C.A. Plate tectonics and sandstone composition // Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull. 1979. V. 63, N 12. P. 2164–2182.
35. Floyd P.A., Leveridge B.E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones // J. Geol. Soc. London. 1987. V. 144. P. 531–542.
36. Garzanti E., Ando S. Plate tectonics and heavy mineral suites of modern sands // Heavy minerals in use. Developments in sedimentology. V. 58 / Eds M.A. Mange, D.T. Wright. Amsterdam: Elsevier, 2007. P. 741–764.
37. 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. N 38. P. 361–372.
38. Marsaglia K.M., Ingersoll R.V. Compositional trends in arc-related, deep-marine sand and sandstone: A reassessment of magmatic-arc provenance // Geol. Soc. Amer. Bull. 1992. V. 104, N 10. P. 1637–1649.
39. 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: Blackwell Sci. Publ., 1982. P. 2. P. 551–61.
40. McLennan S.M., Hemming S.R., Taylor S.R., Eriksson K.A. Early Proterozoic crustal evolution: geochemical and Nd-Pb isotopic evidence from metasedimentary rocks, southwestern North America // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1995. V. 59, N 6. P. 1153–1177.
  41. Morton A.C., Hallsworth C. Identifying provenance-specific features of detrital heavy mineral assemblages in sandstones // *Sed. Geol.* 1994. V. 90, N. 3/4. P. 241–256.
  42. Nechaev V.P. Evolution of the Philippine and Japan Seas from the clastic sediment record // *Mar. Geol.* 1991. V. 97, N 1–2. P. 167–190.
  43. Nechaev V.P., Isphording W.C. Heavy-mineral assemblages of continental margins as indicators of plate tectonic environments // *J. Sed. Petrol.* 1993. V. 63, N 6. P. 1110–1117.
  44. Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*. 1982. V. 299. P. 715–717.
  45. Nisbet E.G., Pearce J.A. Clinopyroxene composition in mafic lavas from different tectonic settings // *Contrib. Mineral. Petrol.* 1977. N 63. P. 149–160.
  46. Roser B.P., Korsch R.J. Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO<sub>2</sub> content and K<sub>2</sub>O/Na<sub>2</sub>O ratio // *J. Geol.* 1986. V. 94, N 5. P. 635–650.
  47. Roser B.P., Korsch R.J. Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data // *Chem. Geol.* 1988. V. 67. P. 119–139.
  48. Sengör A.M.C. Sedimentation and tectonics of fossil rifts // *Tectonics of Sedimentary Basins* / Eds C.J. Busby, R.V. Ingersoll. Oxford: Blackwell, 1995. P. 53–117.
  49. Sengör A.M.C., Natal'in B.A. Rifts of the world // *Mantle plumes: their Identification through time* / Eds R.E. Ernst, K.L. Buchan. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* 2001. V. 352. P. 389–482.
  50. Teraoka Y. Detrital garnets from Paleozoic to Tertiary sandstones in Southwest Japan // *Bull. Geol. Sur. Japan*. 2003. V. 54, N 5–6. P. 171–192.
  51. Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins // *Chem. Geol.* 2013. V. 355. P. 117–133.

*Рекомендована к печати Г.Л. Кирилловой*

после доработки 06.07.2022 г.

принята к печати 19.07.2022 г.

*A.I. Malinovsky, V.V. Golozubov, S.A. Medvedeva*

### **Composition, source areas and depositional environment of Lower Cretaceous sediments in the Northern Sikhote-Alin**

The structure, composition, source areas of Lower Cretaceous terrigenous sediments and geodynamic conditions for their deposition in the Northern Sikhote-Alin are considered. The study established that in terms of mineralogical and geochemical parameters the sandstones, being either petrogenic or first cycle deposits formed by the products of the breakdown of bedrock from the source areas, correspond to graywackes. They are characterized by low maturity, weak lithodynamic reworking of parental rocks, and high rates of deposition. The paleogeodynamic interpretation of the data suggests sedimentation in the Early Cretaceous along the continent-ocean boundary in the basin related to large-scale strike-slip motions along the transform faults. The source area combined sialic land formed by granite-metamorphic and sedimentary rocks, a mature and deeply eroded continental-margin arc, as well as fragments of Jurassic-Early Cretaceous accretion prisms of the Sikhote-Alin with ophiolites incorporated into their structure. All this allows for the studied deposits to be considered as part of the Early Cretaceous Zhuravlevka pull-apart terrane.

**Key words:** Early Cretaceous, sandstones, composition, source areas, geodynamic settings, Northern Sikhote-Alin.