

СТАТЬЯ

УДК 552.14:551.242.22

**ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ПРИРОДА
НИЖНЕМЕЛОВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ СЕВЕРНОГО СИХОТЭ-АЛИНЯ
ПО СОСТАВУ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД**

Малиновский А.И.

*ФГБУ «Дальневосточный геологический институт» ДВО РАН, Владивосток,
e-mail: malinovskiy@fegi.ru*

Характерной чертой геологического строения хребта Сихотэ-Алинь является широкое развитие нижнемеловых отложений, занимающих более половины его территории. С раннемеловой эпохой связаны самые разнообразные геологические события, во многом определившие процесс становления и развития современного облика восточной окраины Евразии. С этим же временным отрезком геологической истории связано и формирование многочисленных рудных и угольных месторождений. Несмотря на многочисленные геолого-съемочные и тематические работы, проводившиеся в разные годы на территории Северного Сихотэ-Алиня, литологическая изученность нижнемеловых отложений остается крайне слабой. Целью проведенных исследований было всестороннее изучение и анализ минералого-геохимических параметров песчаных пород и, на основании их интерпретации, реконструкция палеогеодинамической природы бассейна осадконакопления. Берриас-аптские породы изучались на двух участках: в районе п. Высокогорный и в бассейне р. Бута. Исследования показали, что минералого-геохимические параметры песчаников позволяют характеризовать их как граувакки и лишь частично – как лититовые аргилиты. Отложения образовались за счет физического выветривания исходных пород областей сноса. Породы обладают низким уровнем зрелости кластики, прошедшей один цикл переотложения, и являются петрогенными. Палеогеодинамический анализ данных свидетельствуют, что отложения накапливались в седиментационном бассейне, пространственно и генетически связанном с крупным разломом (трансформным сдвигом), разделявшим континентальную и океаническую плиты. Область размыва была гетерогенной. Главным источником вещества были сиалическая суша, сложенная древними гранитно-метаморфическими и осадочными комплексами, а второстепенным – зрелая, глубоко расчлененная окраинно-континентальная магматическая дуга, поставлявшая как основную и среднюю вулканокластическую, так и продукты разрушения гранитно-метаморфических пород ее основания.

Ключевые слова: ранний мел, источники питания, геодинамические обстановки, Сихотэ-Алинь

**GEODYNAMIC NATURE OF THE LOWER CRETACEOUS DEPOSITS
OF THE NORTHERN SIKHOTE-ALIN BY THE COMPOSITION
OF TERRIGENOUS ROCKS**

Malinovskiy A.I.

*Far Eastern Geological Institute FEBRAS, Vladivostok,
e-mail: malinovskiy@fegi.ru*

A characteristic feature of the geological structure of the Sikhote-Alin ridge is the extensive development of Lower Cretaceous deposits, which occupy more than half of its territory. A variety of geological events are associated with the Early Cretaceous epoch, which largely determined the process of formation and development of the modern appearance of the eastern edge of Eurasia. The formation of numerous ore and coal deposits is also associated with this time period of geological history. Despite numerous geological surveys and case studies conducted in different years on the territory of the Northern Sikhote-Alin, the lithological study of the Lower Cretaceous deposits remains extremely weak. The purpose of the research was a comprehensive study and analysis of the mineralogical and geochemical parameters of sandy rocks and, based on their interpretation, reconstruction of the paleogeodynamic nature of the sedimentation basin. Berriasian-Aptian rocks were studied at two sites: in the area of the village of Vysokogorny and in the basin of the Buta river. Studies have shown that the mineralogical and geochemical parameters of sandstones make it possible to characterize them as graywackes and only partially as lithic arenites. The deposits were formed due to the physical weathering of the initial rocks of the sources areas. Rocks have a low level of maturity of the clastic, which has passed one reburial cycle, and are petrogenic. Paleogeodynamic analysis of the data indicates that deposits accumulated in a sedimentation basin spatially and genetically associated with a major fault (transform shift) separating the continental and oceanic plates. The area of erosion was heterogeneous. The main source of the substance was the sialic land, composed of ancient granite-metamorphic and sedimentary complexes, and the secondary one was a mature, deeply dissected marginal-continent magmatic arc, which supplied both the basic and medium volcanoclastic and the products of destruction of granite-metamorphic rocks of its base.

Keywords: Early Cretaceous, sources areas, geodynamic settings, Sikhote-Alin

Характерной чертой геологического строения хребта Сихотэ-Алинь является широкое развитие нижнемеловых отложений, занимающих более половины его пло-

щади. Раннемеловое время – важнейший этап в становлении и развитии геологических структур, развитых на восточной окраине Евразии. В это же время происходило

формирование террейнов самого различного типа: океанических, островодужных, трансформных границ плит [1]. Помимо этого, в нижнемеловых отложениях локализованы многочисленные рудные и угольные месторождения, они перспективны и для углеводородов. Нижний мел хр. Сихотэ-Алинь неплохо изучен стратиграфически, а вот данные по литологическому составу терригенных пород крайне малочисленны. В частности, для Северного Сихотэ-Алиня они практически отсутствуют.

Цель исследования – всестороннее изучение и анализ минералого-геохимических параметров терригенных пород Северного Сихотэ-Алиня, направленные на восстановление состава областей питания и выяснение условий осадконакопления.

Материалы и методы исследования

Для получения новых данных о составе осадочных пород Северного Сихотэ-Алиня были изучены два участка их распространения: берриас-барремских (район п. Высокогорный) и готерив-аптских (бассейна р. Бута) (рис. 1). Изучались главным образом песчаники, дополнительно привле-

кались данные по геохимическому составу алевролитов. Исследования петрографического состава пород, определение и подсчет содержаний породообразующих компонентов и тяжелых обломочных минералов, определение содержаний петрогенных, редких и редкоземельных элементов в горных породах и минералах осуществлялись современными, многократно апробированными методами, детали которых приведены в ряде предыдущих публикаций [2, 3 и др.]. Исследования проводились в Аналитическом центре (ЦКП) ДВГИ ДВО РАН (г. Владивосток, аналитики: Д.С. Остапенко, Н.В. Зарубина, Е.А. Ткалина).

Результаты исследования и их обсуждение

Изученные раннемеловые образования Северного Сихотэ-Алиня расчленяются на 5 согласно перекрывающих друг друга свит: берриас-валанжинскую журавлевскую (более 1000 м), валанжинскую ключевскую (более 1600 м), готеривскую усть-колумбинскую (до 800 м), готерив-барремскую приманкинскую (до 1800 м) и аптскую каталевскую (1500 м).

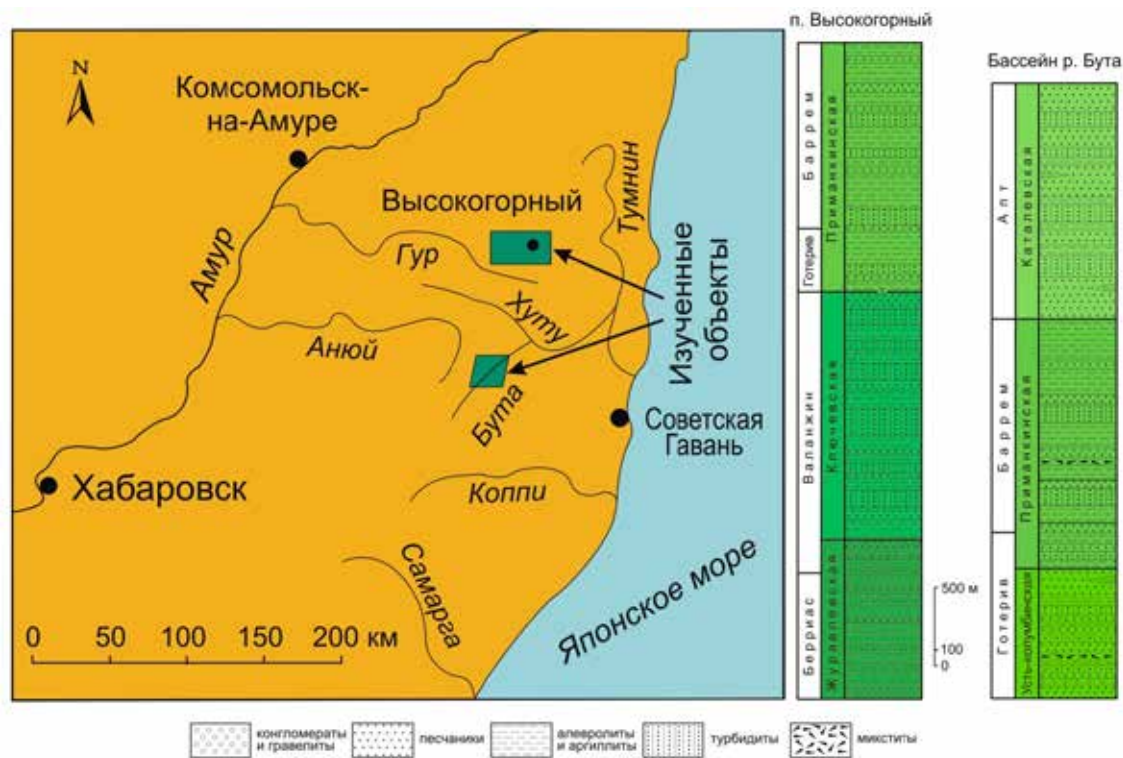


Рис. 1. Схема расположения и стратиграфические колонки изученных участков распространения нижнемеловых отложений Северного Сихотэ-Алиня

Берриас-аптские отложения этих свит, общей мощностью свыше 6500 м, представлены морскими терригенными породами: песчаниками, алевролитами, аргиллитами, а также горизонтами и линзами конгломератов, гравелитов и микститов. Особенностью строения разрезов свит является присутствие большого количества пачек ритмичного переслаивания песчаников, алевролитов и аргиллитов, которые по своим текстурно-структурным особенностям соответствуют типичным турбидитам. Пачки имеют различную мощность элементарных ритмов (от 1–10 см до 40–50 см) и соотношение песчаник/алевролит (от 10/1–20/1 до 1/2–1/5). Помимо этого, следует отметить практически полное отсутствие в строении разрезов продуктов синхронной осадконакоплению вулканической активности. Породы свит интенсивно дислоцированы, нарушены многочислен-

ными зонами разломов, рассланцевания и будинажа.

Проведенное комплексное, всестороннее изучение вещественного состава песчано-алевролитовых пород позволило получить объективную информацию о породных ассоциациях, слагавших размывавшиеся источники обломочного материала, их вещественном составе, а также о геодинамической природе бассейна осадконакопления. Результаты, полученные в ходе исследований, демонстрируются на диаграммах (рис. 2), ссылки на которые приведены в статьях прежних лет [2, 3]. В этих же статьях, а также в работах многих отечественных и зарубежных авторов присутствуют ссылки и на публикации, в которых приведены широко известные, ставшие классическими диаграммы, используемые ниже для палеогеологических интерпретаций вещественного состава терригенных пород [4–6].

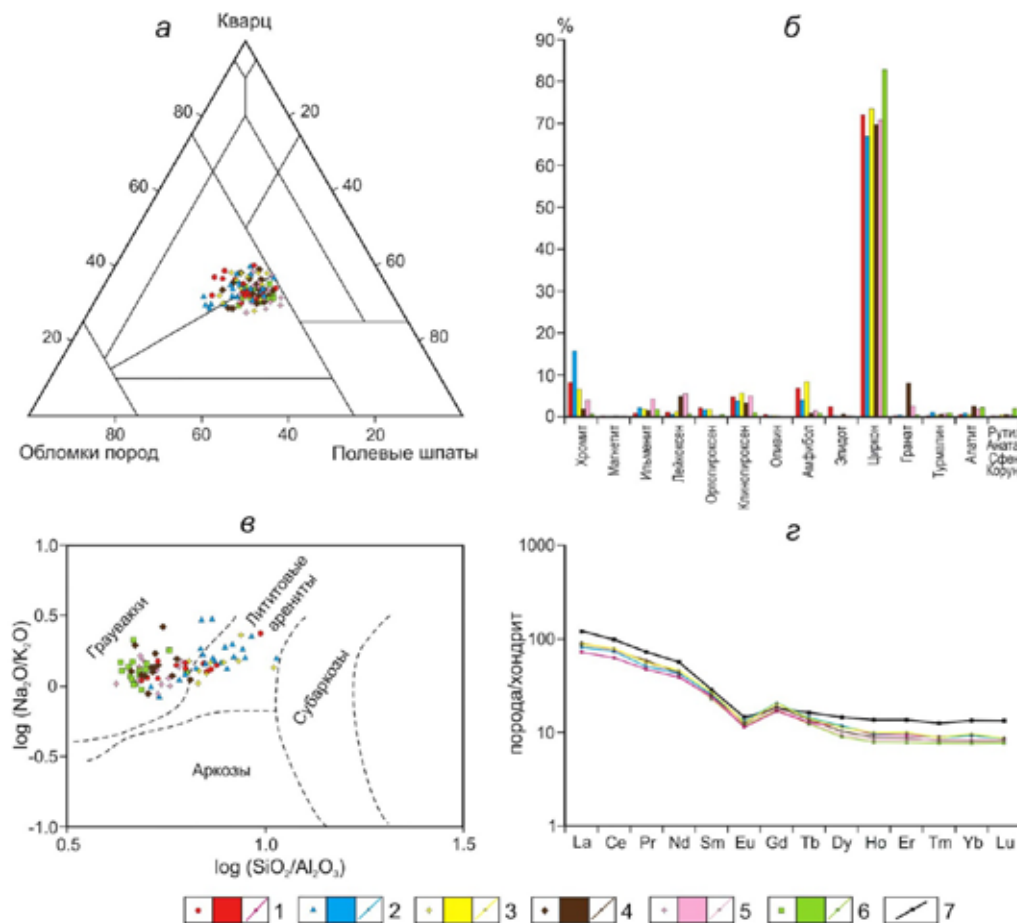


Рис. 2. Диаграммы минерального и геохимического состава песчаников раннего мела Северного Сихотэ-Алиня [2, 3 и др.]: а – петрографический состав; б – тяжелые обломочные минералы; в – химический состав; г – распределение РЗЭ и их сопоставление с PAAS [7]. Свиты: 1–3 – район п. Высокогорный: 1 – журавлевская, 2 – ключевская, 3 – приманкинская; 4–6 – бассейн р. Бута: 4 – усть-колумбинская, 5 – приманкинская, 6 – каталевская; 7 – PAAS

Петрографические исследования показали, что песчаные породы обладают преимущественно мелко-среднепсаммитовой структурой, средней либо хорошей сортированностью и окатанностью зерен. В обломочной части пород, занимающей 70–90% объема, доминируют зерна кварца, количество которых колеблется от 28 до 41%, и полевые шпаты, составляющие 24–40%. Среди литокластов, сумма которых колеблется от 25 до 45%, преобладают кремнистые, терригенные и кислые вулканические породы. Все это позволяет относить изученные породы к кварцево-полевошпатовым и полевошпатово-кварцевым грауваккам (рис. 2, а). Петрографические особенности пород свидетельствуют, что область питания была сложена комплексом осадочных, гранитно-метаморфических и вулканических пород, источником которых была преимущественно сиалическая суша, а также фрагменты зрелой, глубоко расчлененной окраинно-континентальной магматической дуги.

Обломочные минералы тяжелой фракции песчаников представлены двумя ассоциациями (рис. 2, б). Доминирует сиалическая ассоциация, образованная за счет размыта метаморфических и кислых изверженных пород (циркон – гранат – турмалин – сфен – рутил – апатит – анатаз – корунд – ильменит – лейкоксен). Сумма этих минералов составляет 75–96%, при этом основным минералом является циркон: в отдельных пробах его до 93–98%. Содержание других минералов заметно меньше – в среднем не более 10%. Вторую, значительно менее распространенную ассоциацию (в сумме 4–25%) образуют фемические минералы, источником которых были базальты и ультрабазиты (хромит – магнетит – клинопироксен – ортопироксен – амфибол – эпидот – оливин). Главным минералом этой ассоциации является хромит, среднее содержание которого не превышает 16%.

Химический состав песчаников не отличается заметным разнообразием. Содержания петрогенных оксидов изменяются незначительно: SiO_2 (70,34–76,43%), TiO_2 (0,38–0,46%), Al_2O_3 (9,95–14,64%), $\text{FeO}+\text{Fe}_2\text{O}_3$ (2,53–4,15%), MgO (0,69–1,05%), CaO (0,83–1,14%). Помимо этого, во всех песчаниках Na_2O преобладает над K_2O (2,85–3,86% и 1,81–2,95% соответственно), что приближает их к грауваккам. По химическому составу песчаники классифи-

цируются как граувакки и лишь их часть – как лититовые арениты (рис. 2, в).

Ряд геохимических показателей (модулей) [2, 4] позволяют получить объективную информацию о составе исходных пород областей размыва, их литогенной либо петрогенной природе, роли физического и химического выветривания, а также помогают установить тектоническую природу бассейнов осадконакопления. По этим показателям песчаники Северного Сихотэ-Алиня однотипны. Они обладают невысокими значениями гидролизатного модуля $\text{GM} = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO}) / \text{SiO}_2$ (0,18–0,26) и индекса химического изменения $\text{CIA} = [\text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O})] \times 100$ (53–58), что позволяет говорить о слабой выветрелости исходных пород областей сноса, при преобладающей роли физического выветривания. Уровень фемичности пород $\text{ФМ} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$ (0,05–0,07) свидетельствуют об их соответствии в основном грауваккам. Невысокая железистость $\text{ЖМ} = (\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO}) / (\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ (0,18–0,39) и титанистость $\text{ТМ} = \text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ (0,030–0,040), но повышенная нормативная щелочность $\text{НКМ} = \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} / \text{Al}_2\text{O}_3$ (0,42–0,53) песчаников связаны с преобладанием в областях сноса кислых изверженных пород. Таким образом, литохимические параметры песчаников позволяют относить их к петрогенным породам, материал которых формировался за счет разрушения магматических пород и прошел лишь один цикл переотложения.

В песчаных породах были изучены концентрации и особенности распределения редких и редкоземельных (РЗЭ) элементов. Дополнительно были привлечены данные по алевролитам. В среднем по свитам суммарные содержания РЗЭ составляют от 123 г/т до 140 г/т, что меньше среднего значения для верхней континентальной коры (146,4 г/т) [7]. Графики распределения РЗЭ, нормализованных к составу хондрита [8], для всех свит однотипны, обладают умеренной степенью фракционирования при сравнительно невысоком соотношении легких и тяжелых лантаноидов ($\text{La}_N / \text{Yb}_N = 7,70–12,03$) (рис. 2, г). Отчетливо проявленная отрицательная европиевая аномалия ($\text{Eu} / \text{Eu}^* = 0,54–0,60$) также является характерной особенностью всех графиков. На диаграмму спектров распределения РЗЭ для сравнения нанесен РААС (средний постархейский сланец Австралии) [7].

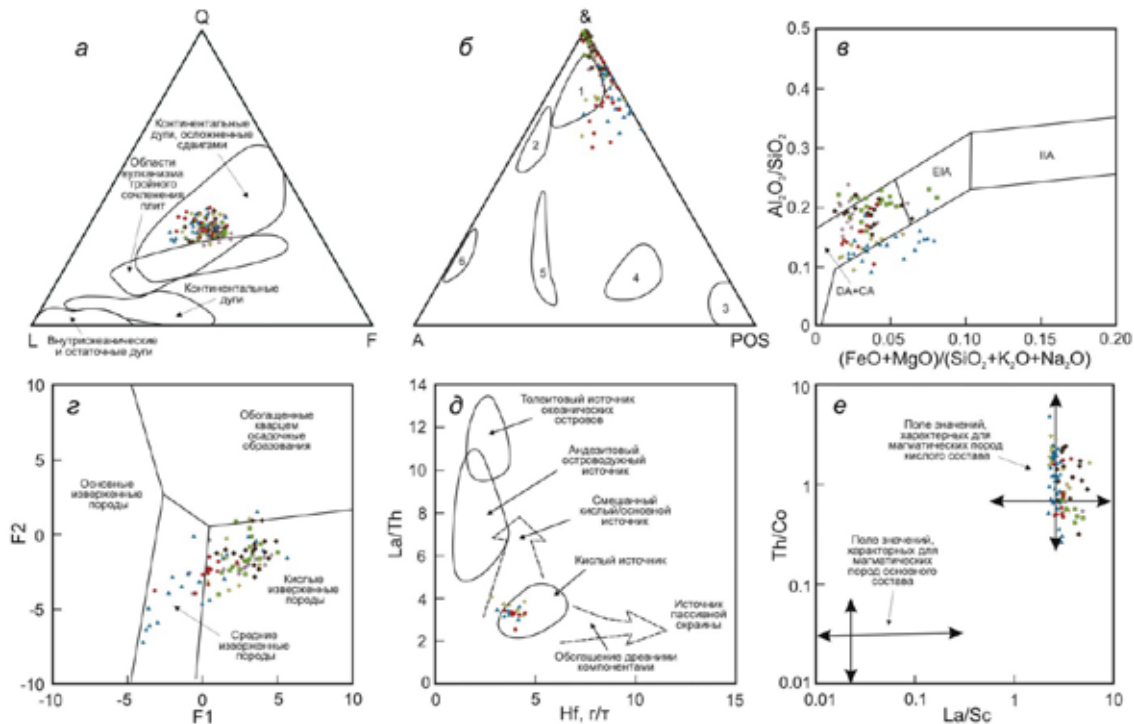


Рис. 3. Положение точек песчаников раннего мела Северного Сихотэ-Алиня на диаграммах для распознавания типов и состава областей питания [4–6]: а – по петрографическому составу; б – по тяжёлым минералам. А – амфиболы; & – клино- и ортопироксены, оливины, хромиты; POS – другие прозрачные минералы. Типы питающих провинций: 1 – континентальные блоки (кратоны и краевые части рифтов); 2 – коллизионные орогены; 3–6 – магматические дуги: 3 – незэродированные, 4 – переходные слабо эродированные, 5 – переходные эродированные, 6 – сильно эродированные; в–е – по геохимическому составу. Условные обозначения см. на рис. 2

Это сравнение показывает, что все породы мела Северного Сихотэ-Алиня обеднены как легкими, так и тяжелыми элементами (в 1,1–2,1 раза), что указывает на отсутствие либо незначительное влияние на их формирование мафического или ультрамафического материала.

Палеогеологическая интерпретация минералого-геохимического состава пород производилась с использованием известных методик, предложенных в публикациях, о которых упоминалось выше. Локализация точек состава песчано-алевритовых пород на диаграммах, разграничивающих тектонические типы областей питания (рис. 3), позволяет говорить, что нижнемеловые отложения Северного Сихотэ-Алиня формировались при размывании двух контрастных источников кластики. Основным источником была сиалическая суша, сложенная блоками кристаллического фундамента, расположенных вдоль рифтовых поясов или трансформных разломов. Вторым по значимости источником была находившаяся под воздействием трансформных разломов (сдвигов) расчлененная,

практически полностью разрушенная окраинно-континентальная (энсиалическая) магматическая дуга, в которой размывались практически уже только сохранившиеся породы ее основания. Вследствие этого в раннемеловое время в седиментационный бассейн Северного Сихотэ-Алиня поступали в основном продукты размыва гранитно-метаморфических и обогащенных кварцем осадочных комплексов суши и фундамента дуги, а оставшиеся нередуцированными основные и средние вулканических образований самой дуги играли незначительную роль. Современными примерами подобных областей сноса являются участки конвергентной окраины Северной Америки: Каскадия, Мексика, Гватемала [1].

Возможные геодинамические обстановки образования отложений Северного Сихотэ-Алиня наглядно демонстрируются на дискриминантных диаграммах, отражающих минералого-петрографический и геохимический состав песчано-алевритовых пород, происходящих из бассейнов различных обстановок (рис. 4) [2, 6, 9].

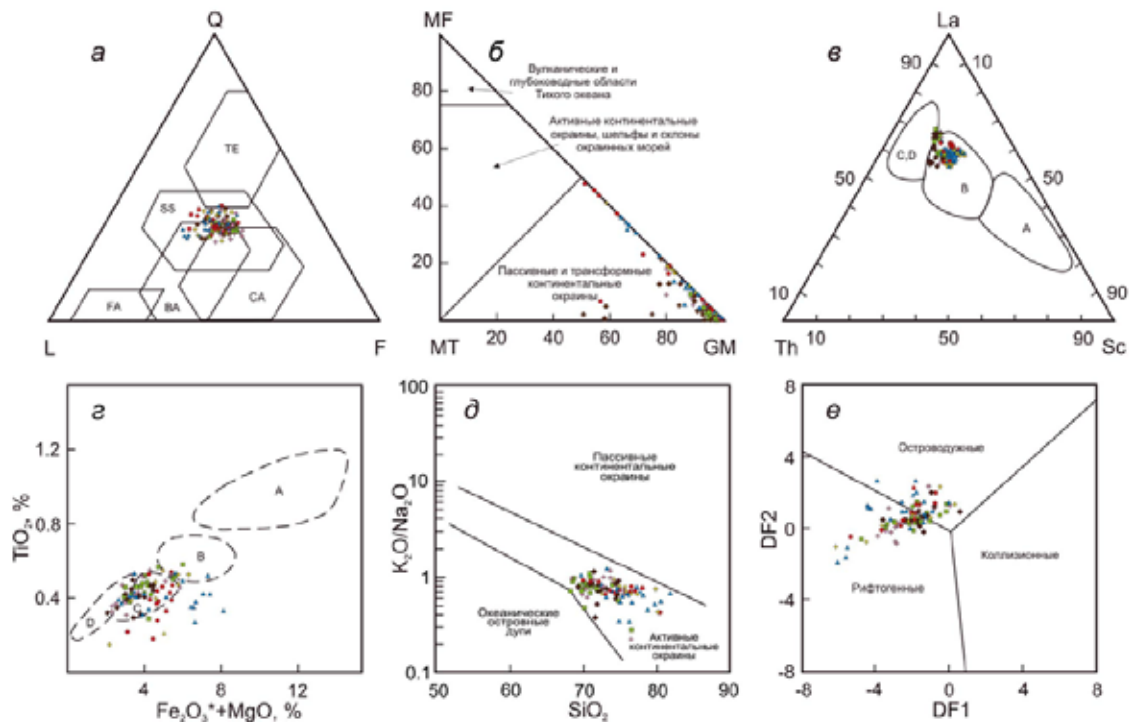


Рис. 4. Положение точек песчаников раннего мела Северного Сихотэ-Алиня на диаграммах для определения тектонических обстановок бассейнов седиментации [2, 6, 9]: а – типы обстановок по петрографическому составу. Бассейны континентальных окраин: пассивных (TE); активных, осложненных сдвигами по трансформным разломам (SS); сопряженные с дугой: окраинно-континентальной (CA), океанической (FA – преддуговые и ВА – задуговые бассейны); б – типы обстановок по тяжелым минералам. Суммы: MF – оливин, пироксен, зеленая роговая обманка; MT – эпидот, гранат, сине-зеленый амфибол; GM – циркон, турмалин, ставролит, дистен, силлиманит, в – типы бассейнов по геохимическому составу. Бассейны, сопряженные с: А – океаническими, В – континентальными островными дугами, С – активными, D – пассивными континентальными окраинами. $Fe_2O_3^*$ – общее железо. Условные обозначения см. на рис. 2

На всех диаграммах точки пород располагаются в полях бассейнов, связанных с самыми разнообразными обстановками: пассивными, трансформными и активными континентальными окраинами, в том числе осложненными сдвиговыми дислокациями по трансформным разломам, а также в различной степени эродированными окраинно-континентальными (энсиалическими) магматическими дугами. Такое неоднозначное положение точек, когда они попадают в поля, соответствующие нескольким, часто контрастным, геодинамическим обстановкам либо источникам питания, объясняется тем, что на этих диаграммах, в силу достаточной давности их разработки (1980–1990-е гг.), еще не выделялись поля, соответствующие обстановкам трансформного скольжения литосферных плит. В целом же такое «промежуточное» положение точек, вероятно, и служит главным признаком седиментации

в бассейнах, располагавшихся вдоль крупных разломов (трансформных сдвигов), разделяющих континентальные и океанические плиты, при этом в область размыва попадают как краевые части континентов, так и ранее аккрецированные к ним фрагменты окраинно-континентальных дуг [10].

Заключение

Детальные петрографические, минералогические и геохимические исследования нижнемеловых терригенных пород Северного Сихотэ-Алиня позволили выявить характерные для этих отложений особенности, реконструировать геодинамические условия осадконакопления, а также установить тип и состав материнских пород источников сноса.

Проведенные исследования показали, что минералого-геохимические параметры песчаников позволяют относить их к грау-

ваккам и лишь частично к лититовым ареникам. Песчаники образовались за счет физического выветривания материнских пород и прошли один цикл переотложения, т.е. являются петрогенными породами с низким уровнем зрелости кластики. Палеогеодинамический анализ всей совокупности данных свидетельствует, что нижнемеловые отложения Северного Сихотэ-Алиня накапливались в седиментационном бассейне, пространственно и генетически связанном с крупным разломом (сдвигом), разделяющим континентальную и океаническую плиты. Область питания для отложений Северного Сихотэ-Алиня была гетерогенной. Главными источниками кластики послужили гранитно-метаморфические и древние осадочные комплексы, слагавшие континентальную сиалическую сушу. Второстепенным источником вещества была зрелая, глубоко расчлененная окраинно-континентальная магматическая дуга, которая составляла как основную-среднюю вулканокластику, так и продукты размыва вскрытых эрозией гранитно-метаморфических комплексов ее основания.

Список литературы

1. Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России / Под ред. А.И. Ханчук. Владивосток: Дальнаука, 2006. Кн. 1. 572 с.
2. Малиновский А.И. Обломочная составляющая песчаных пород мела Западно-Сахалинского террейна: состав

и геодинамическая природа // Успехи современного естествознания. 2021. № 4. С. 64–70. DOI: 10.17513/use.37609.

3. Малиновский А.И., Голозубов В.В., Касаткин С.А. Геохимия, источники питания и геодинамические обстановки накопления нижнесилурийских терригенных отложений Лаоелин-Гродековского террейна (Приморье) // Успехи современного естествознания. 2019. № 11. С. 121–127. DOI: 10.17513/use.37250.

4. 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.

5. Ramos V.A., Chemale F., Naipauer M., Pazos P.J. A provenance study of the Paleozoic Ventania System (Argentina): Transient complex sources from Western and Eastern Gondwana. *Gondwana Research*. 2014. Vol. 26. No. 2. P. 719–740. DOI: 10.1016/j.gr.2013.07.008.

6. 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. DOI: 10.1016/j.chemgeo.2013.07.014.

7. 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.

8. Boynton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. *Rare Earth element geochemistry*. Ed. P. Henderson. Amsterdam: Elsevier, 1984. P. 63–114.

9. 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.

10. 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.