

УДК 551

ОБЛОМОЧНЫЕ ПОРОДЫ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХ ФУНДАМЕНТ ОСАДОЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ПРОТЕРОЗОЯ. СООБЩЕНИЕ 2. ПЕСЧАНИКИ: ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ЛИТОГЕОХИМИИ

© 2025 г. А. В. Маслов^{a,*}, В. Н. Подковыров^{b,**}, А. К. Худолей^{c,***}, А. В. Купцова^c

^aГеологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Москва, 119017 Россия

^bИнститут геологии и геохронологии докембрия РАН, наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

^cИнститут наук о Земле, СПбГУ, пер. Декабристов, 16, Санкт-Петербург, 199155 Россия

* e-mail: amas2004@mail.ru

** e-mail: vpodk@mail.ru

*** e-mail: akhudoley@gmail.com

Поступила в редакцию 25.11.2024 г.

После доработки 16.01.2025 г.

Принята к публикации 19.02.2025 г.

На основе анализа валового химического состава песчаников, слагающих несогласно перекрывающие фундамент осадочные последовательности протерозоя (айская и прикамская свиты, мукунская и валдайская серии, формация Керур, серии Гвалиор, Атабаска, Либби Крик, Уфошань, Бирим и др.), показано, что содержание основных породообразующих оксидов и редких и рассеянных элементов в них в подавляющем большинстве случаев в существенной степени отличается от химического состава среднего протерозойского кратонного песчаника. Состав песчаников таких толщ отвечает преимущественно литаренитам, сублитаренитам, аркозам и субаркозам по классификациям Ф.Дж. Петтиджона с соавторами и М. Хиррона. Большинство песчаников из проанализированной нами их совокупности принадлежат породам, содержащим значительную или преобладающую долю литогенного компонента. Источниками слагающего песчаники обломочного материала являлись достаточно зрелые субстраты, в которых доля основных магматических и метаморфических (?) пород была невелика. Реконструкция, по валовому химическому составу песчаников, палеогеодинамической природы пород, слагающих эти субстраты, позволяет считать их образовавшимися в результате орогенных/коллизийных и рифтогенных событий. Как и в случае с тонкозернистыми обломочными породами в перекрывающих фундамент осадочных последовательностях протерозоя, очевидно, что не все дискриминантные диаграммы дают возможность получить согласующиеся результаты.

Ключевые слова: песчаники, протерозой, литогеохимия, фундамент

DOI: 10.31857/S0024497X25050038, **EDN:** VNJFAI

Протерозойские внутрикратонные бассейны, осадочные толщи которых несогласно перекрывают кристаллический фундамент, отвечают начальным этапам крупных геотектонических циклов. С выполняющими их осадочными последовательностями в зонах структурно-стратиграфических несогласий между чехлом и фундаментом связаны, как известно [Hoeve, Sibbald, 1978; Needham et al., 1980; Quirt, 2003; Молчанов и др., 2005; Пакульнис, Шумилин, 2005; Прогнозирование ..., 2006; Jefferson et al., 2007; Афанасьев и др., 2014; Шумилин, 2015 и др.; Huston et al., 2016; Будяк и др., 2017; Unconformity-related ...,

2018; Гребенкин и др., 2021; и др.], месторождения урана, золота, свинца, цинка, серебра в ассоциации с платиноидами, ванадием, медью, никелем, мышьяком, селеном и другими экономически важными компонентами, что привлекает к ним внимание многих специалистов.

Настоящая работа дополняет первое сообщение [Маслов и др., 2025] в части анализа основных особенностей литогеохимии песчаников, которые входят в состав осадочных последовательностей протерозоя, несогласно перекрывающих кристаллический фундамент, и анализа положения фигуративных точек песчаников различных

объектов на дискриминантных диаграммах. Ряд вводных положений этого исследования, в том числе описание объектов, приведены в первом сообщении. В работе использованы, в первую очередь, наши собственные аналитические данные для песчаников различных по возрасту объектов. Помимо них и в первом, и в настоящем сообщении использован значительный объем аналитических данных по зарубежным объектам, расположенным как на территории Евразии и в Африке, так и в Австралии и Северной Америке (рис. 1). Для характеристики возраста их были применены термины Международной хроностратиграфической шкалы [Geologic ..., 2020].

Рифей, временные рамки которого в настоящее время в России считаются отвечающими интервалу 1.75–0.6 млрд лет [Семихатов и др., 2015; Стратиграфический ..., 2019], таким образом, может быть соотнесен с верхами палеопротерозоя, мезопротерозоем и большей частью неопротерозоя.

К числу рассматриваемых объектов относятся песчаники: верхнепалеопротерозойской айской свиты Южного Урала (объект 1); такого же возраста прикамской свиты (*s. lato*) Камско-Бельского авлакогена (объект 2); верхнепалеопротерозойской? мукунской серии и усть-ильинской свиты Анабарского массива (объект 4) и неопротерозойской валдайской серии (старорусская

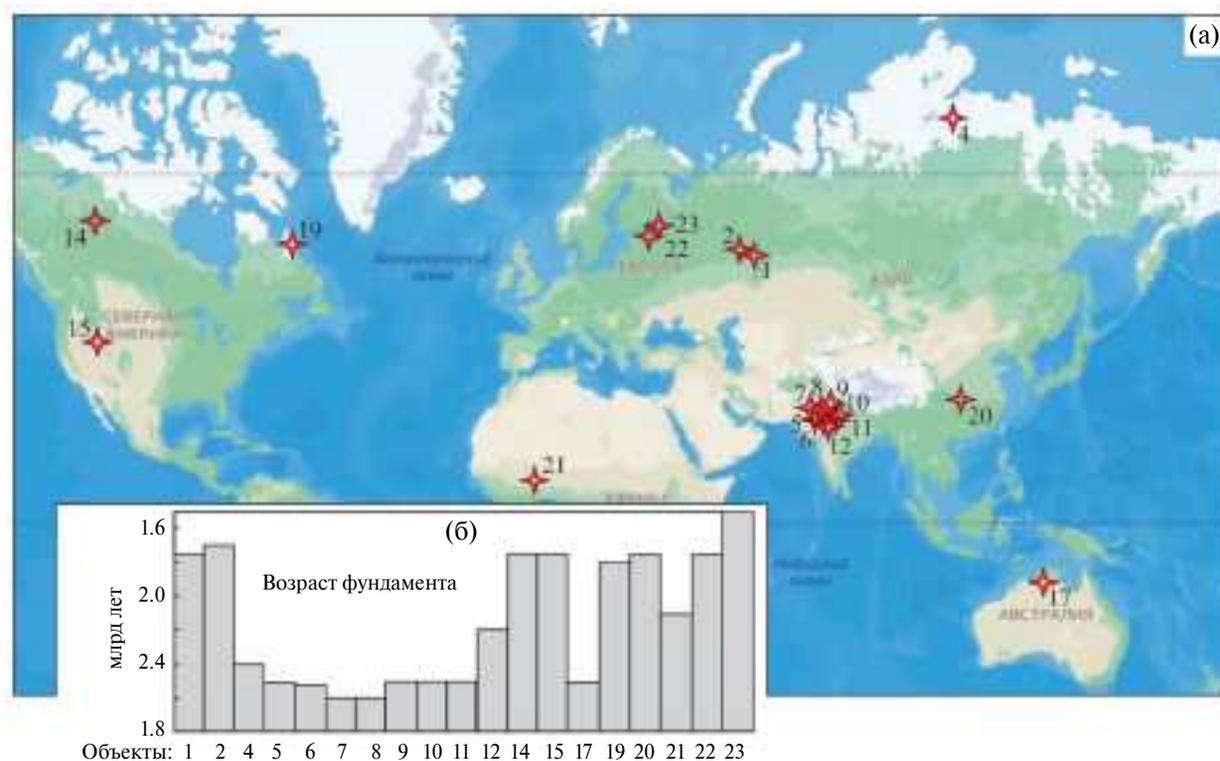


Рис. 1. Положение рассматриваемых в данной работе объектов (а) и возраст фундамента, перекрываемого осадочными последовательностями протерозоя (б).

Объекты (цифры у звездочек соответствуют номерам объектов, описание которых дано в работе [Маслов и др., 2025]): 1 – айская свита, верхи палеопротерозоя, Южный Урал; 2 – прикамская свита, верхи палеопротерозоя, Камско-Бельский авлакоген; 4 – мукунская свита/серия и усть-ильинская свита, верхи палеопротерозоя, Анабарский массив; 5 – нижний виндий, низы мезопротерозоя, бассейн Виндхьян, север Индийского щита; 6 – надсерия Куддапа, палео-мезопротерозой, юго-восток Индии; 7 – формация Керур, неопротерозой, юго-запад Индии; 8 – серия Соманпалли, мезо-неопротерозой, центральная часть Индии; 9 – серия Гвалиор, нижний протерозой, северо-западная окраина кратона Бунделькханд; 10 – серия Биджавар, палеопротерозой, центральная часть Индии; 11 – надсерия Дели, ранний протерозой, бассейн Баяна, северо-западная окраина Индийского щита; 12 – серии Сонахан и Махакошал, поздний архей-палеопротерозой и поздний палеопротерозой, центральная часть Индийского щита; 14 – серия Атабаска, палеопротерозой, Канада; 15 – серия Либби Крик, палеопротерозой, кратон Вайоминг, Канада; 17 – “геосинклиналь Пайн-Крик”, палеопротерозой, север Австралии; 19 – серия Рама, палеопротерозой, северо-восток Лабрадора, Канада; 20 – серия Уфошань, мезо?-неопротерозой, юг Северо-Китайского кратона; 21 – надсерия Бирим, палеопротерозой, щит Лео Ман, Западная Африка; 22 – приозерская и салминская свиты, ранний мезопротерозой, юг Балтийского щита; 23 – валдайская серия, неопротерозой, северо-восток Балтийской моноклинали. Объекты 3, 13, 16 и 18 из нашего банка данных аналитическими материалами для песчаников не располагают.

и василеостровская свиты) северо-востока Балтийской моноклинали (Ленобласть и Эстония) (объект 23). Все они охарактеризованы оригинальными авторскими аналитическими данными.

Аналогичные сведения (т.е. данные о содержании породообразующих оксидов, редких и рассеянных элементов) для песчаников нижнего виндия (верхи палеопротерозоя?—низы мезопротерозоя?) бассейна Виндхьян на севере Индийского щита (объект 5), песчаников мезопротерозойской серии Читравати мобильного пояса Восточный Гат юго-восточной Индии (объект 6) и обломочных пород неопротерозойской формации Керур бассейна Каладги-Бадами Южной Индии (объект 7) заимствованы из литературных источников.

Кроме того, привлечены сведения о валовом химическом составе песчаников мезопротерозойской серии Соманпалли восточного пояса долины Пранхита-Годавари центральной Индии (объект 8), палеопротерозойской серии Гвалиор северо-запада кратона Бунделькханд (объект 9), такого же возраста серии Биджавар бассейна Сонрай, центральной Индии (объект 10), палеопротерозойской надсерии Дели бассейна Баяна на северо-западе Индийского щита (объект 11) и позднеархейско?-палеопротерозойских серий Сонахан и Махакошал центральной части Индийского щита (объект 12, см. пояснения в работе [Маслов и др., 2025]).

Для песчаников позднепалеопротерозойской серии Атабаска, Канада (объект 14) использованы и авторские данные, и сведения из литературы. Кроме того, в нашем банке данных есть информация о валовом химическом составе песчаников палеопротерозойской серии Либби Крик кратона Вайоминг, Канада (объект 15), палеопротерозойской “геосинклинали Пайн-Крик” севера Австралии (объект 17), палеопротерозойской серии Рама северо-востока Лабрадора, Канада (объект 19), мезо?-неопротерозойской серии Уфошань южной части Северо-Китайского кратона (объект 20), палеопротерозойской надсерии Бирим щита Лео Ман Западной Африки (объект 21) и раннемезопротерозойских образований приозерской и салминской свит Пашско-Ладожского бассейна южной периферии Балтийского щита (объект 22).

В настоящей работе так же, как и при анализе литогеохимических характеристик тонкозернистых обломочных/глинистых пород, входящих в состав перекрывающих кристаллический фундамент осадочных толщ протерозоя [Маслов и др., 2025], рассматриваются особенности распределения индивидуальных и усредненных

точек составов песчаников на широко используемых в осадочной петрологии классификационных и дискриминантных диаграммах. Последние позволяют судить, собственно, о составе песчаников, составе комплексов пород-источников, слагающей их алюмосиликокластики и, в какой-то мере, о палеогеодинамической природе таких комплексов.

В качестве референтных объектов для сравнения использованы средний протерозойский кратонный песчаник, средний архейский гранит, средний позднеархейский базальт и средний состав пород архейской тоналит-трондьемит-гранодиоритовой ассоциации (все по [Condie, 1993]). Привлечены также сведения о среднем составе верхней континентальной коры (УСС [Rudnick, Gao, 2014]). Всего наш банк данных включает материалы о содержании основных породообразующих оксидов для более 410 индивидуальных образцов песчаников. Размер выборок варьирует от 3 (объект 10) до 53 (объект 17) анализов. Содержание редких и рассеянных элементов (в том числе и весьма неполные по набору элементов выборки) имеется для более 270 образцов.

Следует оговориться, что степень метаморфизма исследуемых песчаников варьирует в весьма широких пределах — от метагенеза до амфиболитовой фации. Как и ранее [Маслов и др., 1999, 2008], считаем, что дометаморфические процессы и процессы регионального метаморфизма могли тем или иным образом изменить первичный минеральный состав и структурно-текстурные особенности песчаников, однако в целом они не ведут к существенной трансформации их валового химического состава [Добрецов и др., 1970; Япаскерт, 1999; Перчук и др., 2015].

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБСУЖДЕНИЕ

Среднее содержание SiO_2 в песчаниках различных объектов нашего банка данных варьирует от 59.20 ± 6.00 (объект 19) до 94.39 ± 3.97 мас. % (объект 15). Минимальное среднее содержание TiO_2 составляет 0.052 ± 0.050 (объект 6), а максимальное достигает 1.23 ± 0.38 мас. % (объект 19). Также весьма заметно различие между минимальным и максимальным средним содержанием Al_2O_3 в песчаниках (соответственно 2.42 ± 3.58 , объект 4, и 18.73 ± 4.35 мас. %, объект 19). Минимальное рассчитанное нами среднее содержание FeO^* присуще песчаникам объекта 15 (0.324 ± 0.328 мас. %), тогда как максимальная величина FeO^* среднее достигает 6.34 ± 2.24 мас. % (объект 19). Средняя минималь-

ная величина MgO (0.17 ± 0.15 мас. %) характерна для песчаников объекта 9. Максимальное среднее содержание оксида магния (3.41 ± 2.72 мас. %) присуще песчаникам объекта 21. Последний объект обладает и максимальными средними содержаниями CaO (2.16 ± 1.67 мас. %) и Na_2O (2.36 ± 1.26 мас. %), тогда как минимальные средние концентрации названных оксидов типичны соответственно для объектов 7 (0.021 ± 0.015 мас. %) и 4 (0.03 ± 0.01 мас. %). Наконец, максимальное среднее содержание K_2O свойственно песчаникам объекта 1 (5.87 ± 0.66 мас. %), а минимальное (0.63 ± 1.32 мас. %) — песчаникам объекта 14. Нормирование средних содержаний основных породообразующих оксидов в песчаниках нашего банка данных на их содержание в среднем протерозойском кратонном песчанике [Condie, 1993] демонстрирует, за исключением SiO_2 , практически полное отсутствие сопоставимых распределений (рис. 2), предполагая тем самым, что валовый химический состав песчаников в основном контролировался составом пород на палеоводосборах. Среднее содержание ряда редких и рассеянных элементов в песчаниках различных объектов нашего банка данных также заметно варьирует относительно их содержания в среднем протерозойском кратонном песчанике (рис. 3).

На классификационной диаграмме $lg(SiO_2/Al_2O_3) - lg(Na_2O/K_2O)$ [Pettijohn et al., 1972] индивидуальные точки песчаников сосредоточены в основном в полях аркозов, лититов и близких к ним по составу пород. Заметно меньше их в полях кварцаренитов и граувакк (рис. 4а). В последнем поле сосредоточены преимущественно фигуративные точки песчаных пород объекта 21, а в первом — песчаники объектов 4, 17 и некоторых других. Наиболее ясно это видно по распределению на данной диаграмме усредненных точек состава псаммитов различных объектов (см. рис. 4б).

На классификационной диаграмме $lg(SiO_2/Al_2O_3) - lg(Fe_2O_3^*/K_2O)$ [Herron, 1988] основная масса индивидуальных точек песчаников расположена в полях вакк, аркозов и субаркозов, литаренитов и сублитаренитов (рис. 5а). Несколько меньше их в полях кварцаренитов, тогда как в полях Fe-песчаников и сланцев (сюда попадают в основном породы объектов 19 и 21) — существенно меньше. При обращении к анализу особенностей локализации на данной диаграмме усредненных для разных объектов точек хорошо видно, что только четыре из них (точки объектов 19, 21, 4 и 12) не принадлежат аркозам и субаркозам, литаренитам и сублитаренитам

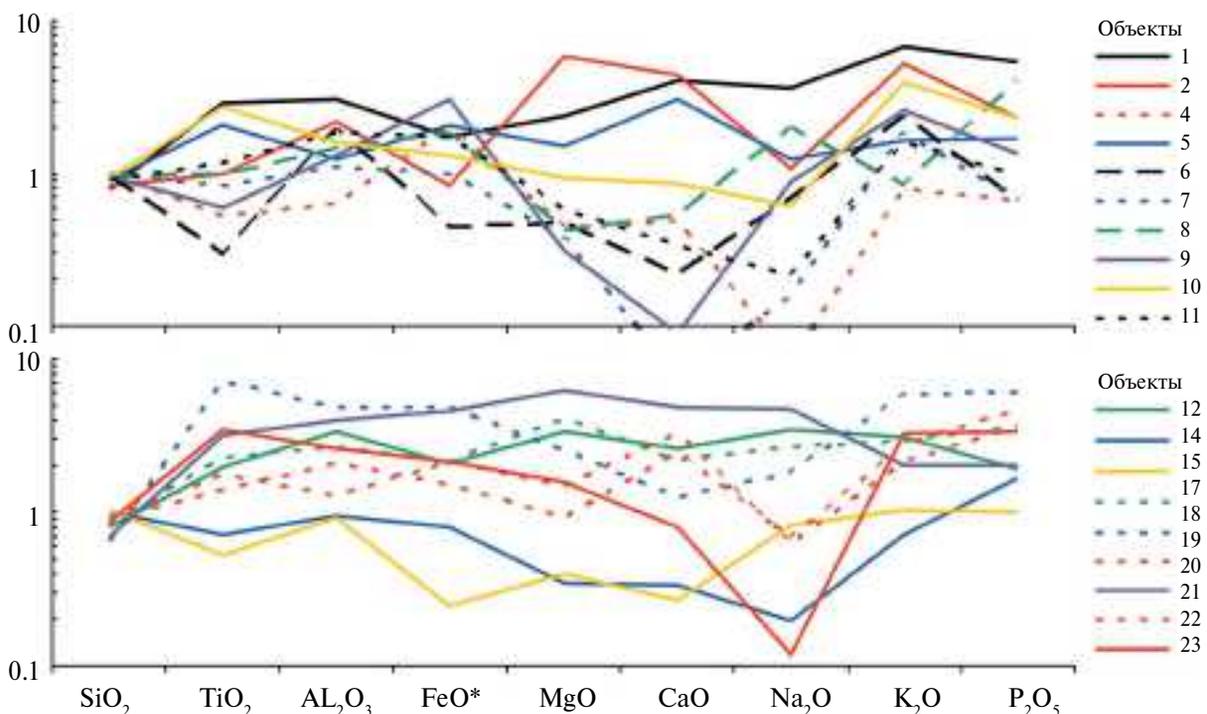


Рис. 2. Среднее содержание основных породообразующих оксидов в песчаниках разных объектов, нормированное на их содержание в среднем протерозойском кратонном песчанике, по [Condie, 1993]. Номера кривых соответствуют номерам объектов, описание которых дано в работе [Маслов и др., 2025].

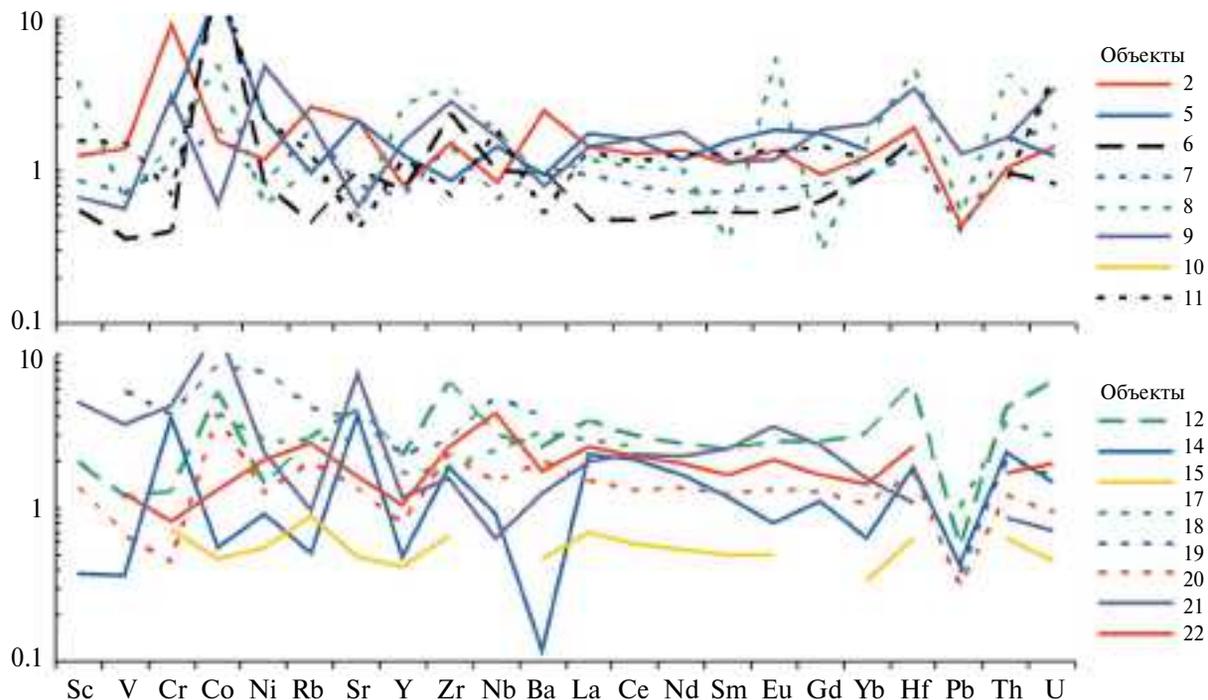


Рис. 3. Среднее содержание ряда редких и рассеянных элементов в песчаниках разных объектов, нормированное на их содержание в среднем протерозойском кратонном песчанике, по [Condie, 1993]. Номера кривых соответствуют номерам объектов, описание которых дано в работе [Маслов и др., 2025].

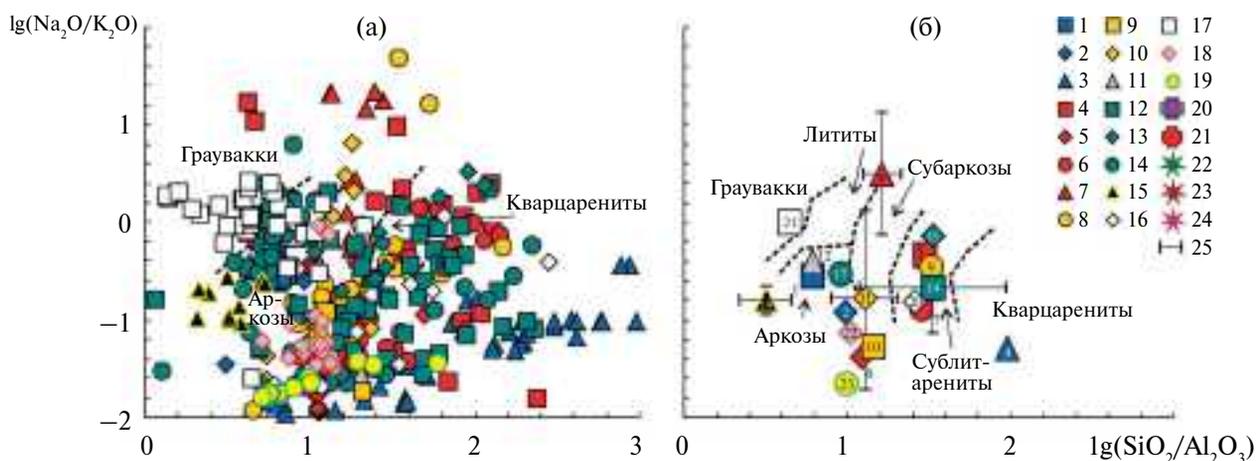


Рис. 4. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек песчаников различных объектов на диаграмме $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$.

1 – объект 1; 2 – объект 2; 3 – объект 4; 4 – объект 5; 5 – объект 6; 6 – объект 7; 7 – объект 8; 8 – объект 9; 9 – объект 10; 10 – объект 11; 11 – объект 12; 12 – объект 14; 13 – объект 15; 14 – объект 17; 15 – объект 19; 16 – объект 20; 17 – объект 21; 18 – объект 22; 19 – объект 23; 20 – средний протерозойский кратонный песчаник; 21 – UCC; 22 – средний позднеархейский базальт; 23 – средний архейский гранит; 24 – средний состав архейской ТТГ-ассоциации; 25 – стандартное отклонение ($\pm 1\sigma$, наличие стрелки предполагает, что значение выходит за рамки диаграммы). Числа у значков условных обозначений или внутри них на части “б” отвечают номерам объектов.

(см. рис. 5б). Как и в случае сопоставления валового химического состава песчаников нашего банка данных со средним протерозойским кратонным песчаником, это позволяет пред-

полагать, что химический состав исследуемых песчаников должен в основном отвечать составу размывавшихся на палеоводосборах комплексов пород.

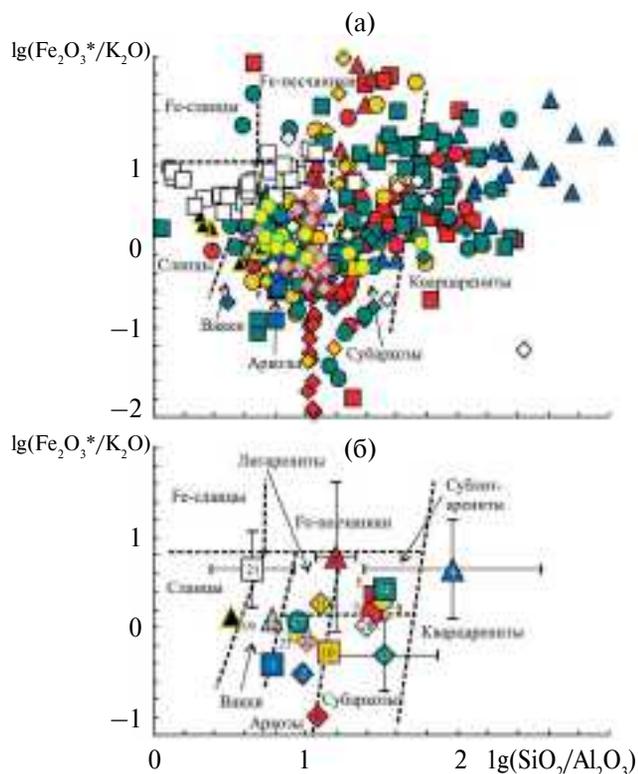


Рис. 5. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек песчаников различных объектов на диаграмме $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$. Числа у значков условных обозначений или внутри них на части "б" отвечают номерам объектов. Условные обозначения см. рис. 4.

На диаграмме $\text{Zr}/\text{Sc} - \text{Th}/\text{Sc}$ [McLennan et al., 1993], дающей возможность получить представление о характере (петрогенный? литогенный?) слагающего песчаники обломочного материала, индивидуальные точки состава песчаников распределены в областях значений $1 < \text{Zr}/\text{Sc} < 500$ и $0.1 < \text{Th}/\text{Sc} < 80$ при общей близкой к линейной их ориентировке (рис. 6а). Кроме того, хорошо видно, что, например, между областями точек объектов 14 и 21 или 5 и 12 перекрытие отсутствует. При обращении к анализу положения на указанном графике усредненных точек (см. рис. 6б) обнаруживается приуроченность точек объектов 2?, 4, 5, 10? и 21 к линии тренда, определяемой составом пород на водосборах. Следовательно, песчаники названных объектов сложены в основном обломочным материалом первого седиментационного цикла. При этом песчаники объекта 21 можно рассматривать как сложенные в большей степени продуктами разрушения основных магматических образований, тогда как песчаники объектов 4 и 12 содержат преимущественно

материал, поступавший в область седиментации при эрозии кислых магматических и метаморфических пород. Усредненные точки остальных объектов нашего банка данных тяготеют к тренду рециклинга. Это предполагает наличие в их составе существенной или доминирующей доли неоднократно переотложенного материала.

Анализ корреляционных связей между некоторыми литохимическими модулями в песчаниках объектов 6, 7 и 9 (выбраны как охарактеризованные существенным числом анализов) показывает, что для них свойственны как статистически значимые, так и не значимые положительные взаимосвязи титанового ($\text{ТМ} = \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) и железного ($\text{ЖМ} = (\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$) модулей. Между общей нормативной щелочностью ($\text{ОНЩ} = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$) и гидролизатным модулем ($\text{ГМ} = (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO})/\text{SiO}_2$) в песчаниках существуют как положительная, так и отрицательная статистически незначимые корреляции. Гидролизатный и титановый модули в песчаниках названных объектов характеризуются статистически незначимой отрицательной корреляцией. Указанные соотношения в соответствии с представлениями авторов монографии [Юдович, Кетрис, 2000], не позволяют сделать какого-либо определенного вывода о характере (петрогенный? литогенный?) материала, слагающего песчаники объектов 6, 7 и 9. На графике $\text{Zr}/\text{Sc} - \text{Th}/\text{Sc}$ усредненные точки состава названных объектов расположены в области тренда рециклинга (см. рис. 6б), что не противоречит всему сказанному выше.

Распределение индивидуальных точек песчаников различных объектов на диаграмме $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$ [McLennan et al., 1979], позволяющей в достаточно общей форме судить о составе пород-источников слагающего их материала, показывает, что преобладающая часть точек локализована между линиями "3 гранит + 1 базальт" и "Гранит" или, так или иначе, тяготеет к ним (рис. 7а). У линии "Базальт" на данном графике сосредоточены только несколько индивидуальных точек песчаников объектов 5, 8, 14, 17, 19, 21 и др. Среди усредненных точек к указанной линии тяготеют только точки объектов 5 и 10; расположение всех остальных усредненных точек демонстрирует преобладание в составе песчаников продуктов разрушения пород достаточно кислых или собственно кислых ассоциаций (см. рис. 7б). Это наглядно подтверждает распределение на данном графике референтных точек. Так, точка позднеархейских базальтов К. Конди расположена между линиями "3 гранит + 1 базальт"

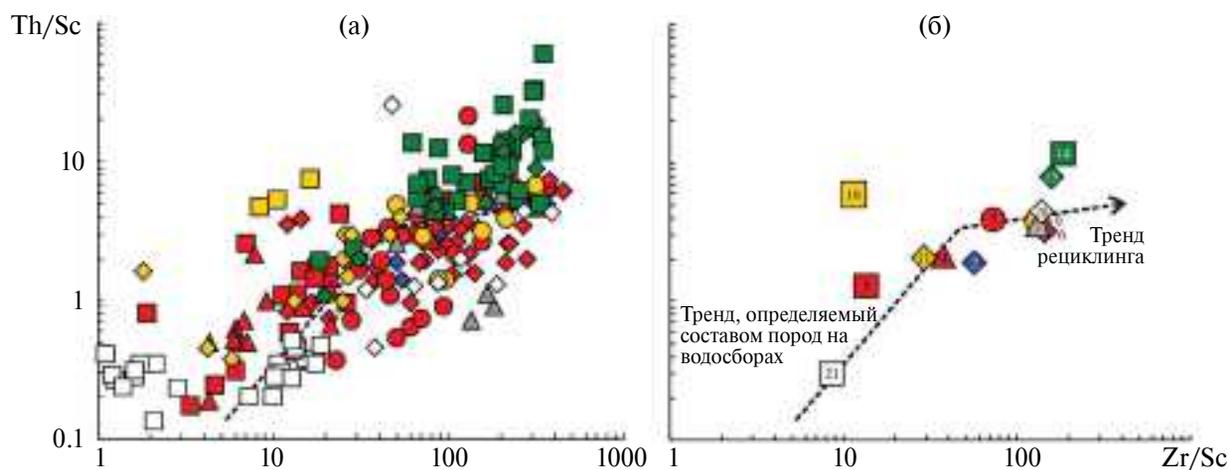


Рис. 6. Распределение индивидуальных (а) и усредненных (б) точек состава песчаников различных объектов на диаграмме Zr/Sc–Th/Sc. Условные обозначения см. рис. 4.

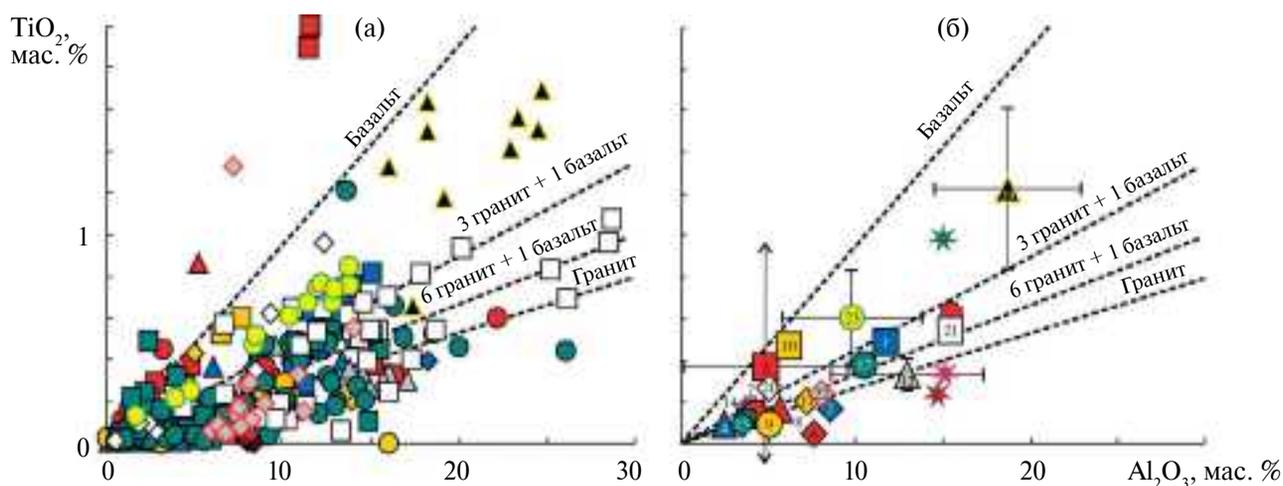


Рис. 7. Распределение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек песчаников различных объектов на диаграмме Al_2O_3 – TiO_2 . Условные обозначения см. рис. 4.

и “Базальт”. Точка USS находится между линиями “3 гранит + 1 базальт” и “6 гранит + 1 базальт”. Примерно такое же положение имеет точка среднего протерозойского кратонного песчаника, но содержания оксида алюминия и оксида титана в нем заметно ниже, чем в USS. Точки средних архейских гранитов и тоналит-трондjemит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации (все по [Condie, 1993]) можно видеть, как и следовало ожидать, у линии “Гранит”.

Весьма значительная доля индивидуальных точек песчаников на диаграмме Zr– TiO_2 [Nayashi et al., 1977] сосредоточена в поле составов, формировавшихся за счет продуктов эрозии

кислых магматических пород (рис. 8а), что не противоречит и выводам, полученным при анализе их положения на графике Al_2O_3 – TiO_2 . Некоторое, очень небольшое, число точек присутствует и в полях продуктов разрушения средних (объект 5 и 19) и основных пород (объект 21). Ассоциирующие с песчаниками объектов 19 и 21 тонкозернистые обломочные породы демонстрируют сходные особенности распределения [Маслов и др., 2025]. Усредненные точки состава песчаников из нашего банка данных образуют на данном графике достаточно компактный кластер, тяготеющий к точкам среднего протерозойского кратонного песчаника, среднего

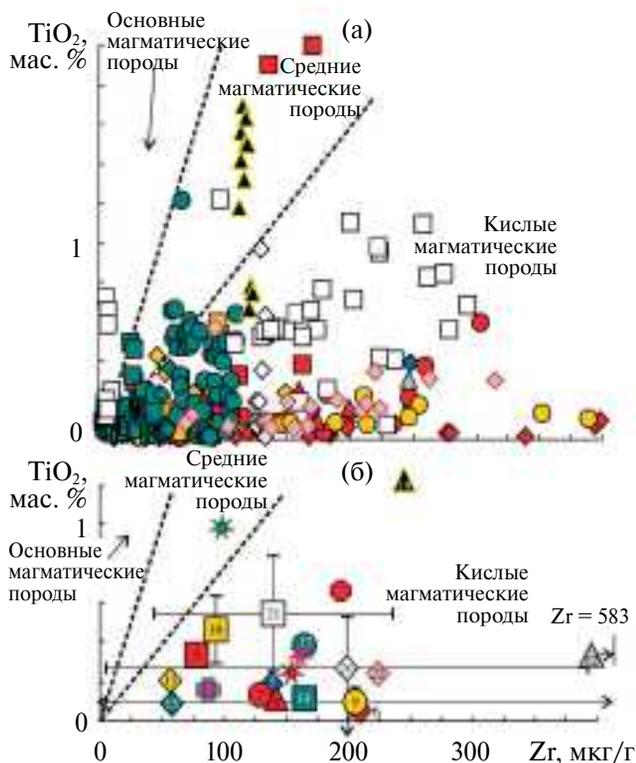


Рис. 8. Локализация индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек песчаников различных объектов на диаграмме Zr–TiO₂. Числа у значков условных обозначений или внутри них соответствуют номерам объектов. Условные обозначения см. рис. 4.

архейского гранита и среднего состава пород ТТГ-ассоциации (см. рис. 8б). Не входят в него только усредненные точки песчаников объектов 19 и 12. Для последнего характерны весьма высокие концентрации Zr, варьирующие в интервале 247–1052 мкг/г, и отражающие либо многократное рециклирование обломочного материала, либо состав размывавшихся пород.

Свойственное песчаникам подавляющей части исследуемых объектов содержание Ni и TiO₂ помещает их индивидуальные фигуративные точки на графике Ni–TiO₂ почти исключительно в область продуктов эрозии кислых магматических и метаморфических пород [Floyd et al., 1989] (рис. 9а). Усредненные точки, за исключением точек объектов 9 и 19, сгруппированы в компактной области (Ni < 30 мкг/г, TiO₂ < 0.60 мас. %), в которой расположены и точки архейских гранитов, и пород ТТГ-ассоциации (см. рис. 9б). Содержание Ni в песчаниках объекта 19 в существенной степени варьирует от образца к образцу (минимум – 12.70, максимум – 245 мкг/г), а содержание TiO₂ меняется от 0.66 до 1.69 мас. %. В песчаниках

объекта 9 разброс концентраций Ni отвечает интервалу ~23–155 мкг/г, а содержание TiO₂ меняется не столь резко, как в песчаниках объекта 19 (минимум – 0.01, максимум – 0.29 мас. %).

На графике Sc–Th [Taylor, McLennan, 1985] большинство фигуративных точек индивидуальных образцов песчаников нашего банка данных сконцентрировано в области значений Sc < 6 мкг/г и Th < 11 мкг/г (рис. 10а), что предполагает, при условии трансляции содержания названных элементов из пород-источников в осадок без существенных трансформаций (первый цикл седиментации), формирование псаммитов за счет продуктов эрозии магматических и метаморфических пород кислого и среднего состава. Однако, как показано выше, значительная часть анализируемых песчаников содержит большую или меньшую долю рециклированного обломочного материала. Большинство усредненных точек песчаников характеризуется значениями Th/Sc > 1 и локализовано на диаграмме Sc–Th рядом с точкой среднего протерозойского кратонного песчаника (см. рис. 10б). Усредненные точки песчаников объектов 10 и 12 находятся в этом же поле, но параметр Th_{среднее} для них значительно выше, чем это присуще

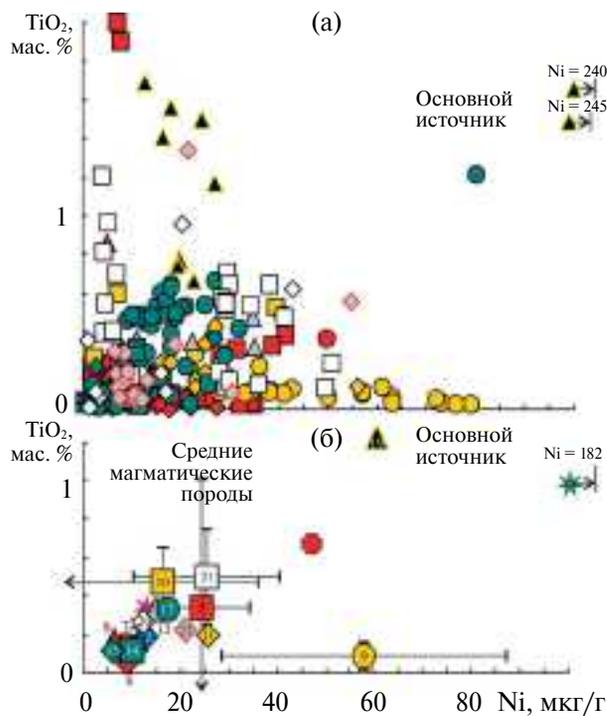


Рис. 9. Распределение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек песчаников различных объектов на диаграмме Ni–TiO₂. Условные обозначения см. рис. 4.

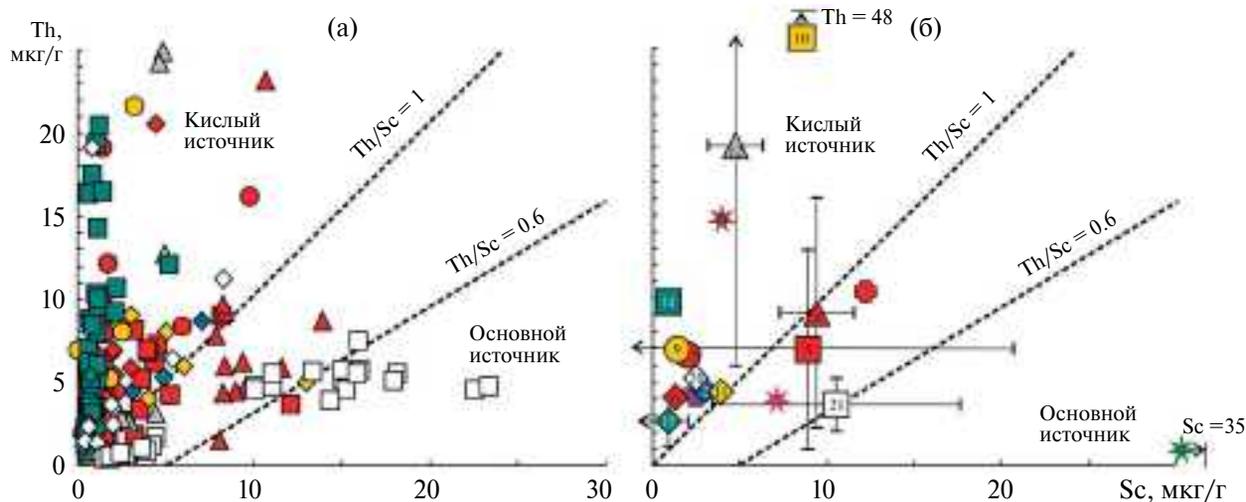


Рис. 10. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) точек состава песчаников различных объектов на диаграмме Sc–Th. Условные обозначения см. рис. 4.

другим точкам данного поля (соответственно 48 и 19 мкг/г). Усредненные точки песчаников объектов 5 и 8, для которых величины отношения Th/Sc находятся между 0.6 и 1.0, попадают в область “промежуточного источника”, где расположены и точки УСС, и пород архейских ТТГ-ассоциаций. Усредненная точка песчаников объекта 21 находится на границе, разделяющей поля источников обломочного материала “промежуточного” и основного состава.

На диаграмме Sc–Th/Sc [Taylor, McLennan, 1985] наблюдается достаточно хорошо выражен-

ная для песчаников ряда объектов дифференциация как индивидуальных, так и усредненных точек состава. Так, точки песчаников объекта 14 расположены вблизи типичной точки состава К-гранитоидов, а точки песчаников объекта 21 тяготеют к точке состава типичной ТТГ-ассоциации (рис. 11а). Распределение усредненных точек состава песчаников демонстрирует описанные выше особенности еще более выпукло. На рис. 11б благодаря сказанному можно наметить несколько кластеров. Кластер 1 образуют усредненные точки состава псаммитов объек-

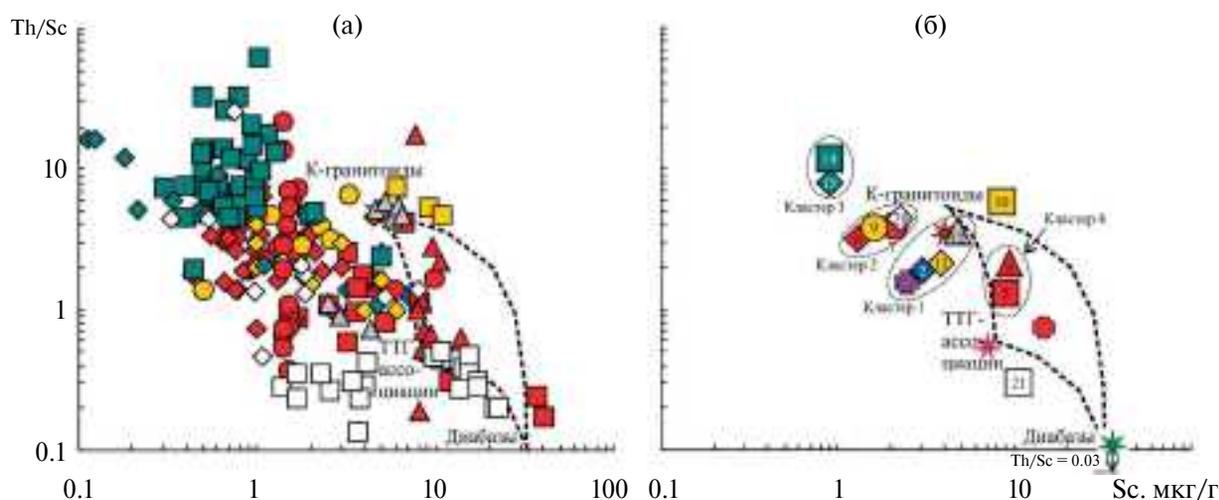


Рис. 11. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек песчаников различных объектов на диаграмме Sc–Th/Sc.

Числа у значков условных обозначений или внутри них соответствуют номерам объектов. Условные обозначения см. рис. 4.

тов 2, 11 и 12. Свойственные им содержание Sc и значения отношения Th/Sc близки тем, что присущи средним архейским гранитоидам и среднему протерозойскому кратонному песчанику. В кластер 2, расположенный рядом с кластером 1, группируются точки состава песчаников объектов 6, 7, 9 и 20. Кластер 3 представлен усредненными точками песчаников объектов 14 и 15. Для них свойственны максимальные величины $Th/Sc_{\text{среднее}}$ и минимальные значения $Sc_{\text{среднее}}$. Кластер 4 (усредненные точки песчаников объектов 5 и 8) расположен между точками UCC и средних архейских гранитов. В целом же, распределение точек состава песчаников на данном графике наглядно свидетельствует о ведущей роли в их формировании продуктов размыва кислых магматических и метаморфических пород, т.е. об эрозии геохимически достаточно зрелых субстратов кристаллического фундамента.

Распределение индивидуальных фигуративных точек песчаников из нашего банка данных на диаграмме La/Sc–Co/Th [Wang et al., 2013 и ссылки там] также демонстрирует определенную их дифференциацию и по параметру La/Sc, и по параметру Co/Th (рис. 12а). Так, например, на ней практически нет перекрытия между точками песчаников объектов 14 и 21. Усредненные фигуративные точки песчаников в основном группируются вокруг точек UCC, среднего протерозойского кратонного песчаника и среднего состава архейских ТТГ-ассоциаций (см. рис. 12б). Средние составы песчаников объектов 14 и 15 по свойственным им величинам La/Sc и Co/Th сопоставимы со средними архейскими гранитами. В целом же распределение фигуративных точек песчаников на данном графике, как и на многих других, рассмотренных нами, предполагает, что состав пород-источников обломочного материала для них был геохимически достаточно зрелым.

Сказанное подтверждает и распределение точек состава исследуемых нами песчаников на графике Y/Ni–Cr/V [McLennan et al., 1993] (рис. 13). Усредненные фигуративные точки песчаников объектов 6, 7, 8, 10, 12, 19, 20 и 22 тяготеют здесь к области составов, сформированных за счет продуктов разрушения кислых магматических и метаморфических пород. В данной области присутствуют и точки средних гранитов архея, и пород ТТГ-ассоциаций архея. Несколько меньшие значения Y/Ni, при сопоставимых величинах Cr/V, характерны и для точки UCC, рядом с которой можно видеть усредненные точки состава песчаников объектов 11 и 21. Точки

объектов 2 и 14 расположены в области тренда к “офиолитовому источнику”, хотя при такой интерпретации происхождения состава песчаников следует иметь в виду, что распределение Cr/V в этих выборках крайне неравномерное (например, в песчаниках объекта 2 минимальная величина названного параметра равна 0.67, а максимальная составляет ~98). Соответственно и средние значения Cr/V получаются весьма высокими, что “уводит” усредненные точки в область значений, характерных для “офиолитового источника”.

На диаграмме Th/Sc–(La/Yb)_N индивидуальные фигуративные точки песчаников сосредоточены в области значений $0.2 < Th/Sc < 50$ и $2 < (La/Yb)_N < 50$ (рис. 14а). Если исключить из рассмотрения усредненные точки объектов 10 и 14, то окажется, что средние величины параметра (La/Yb)_N варьируют от ~6.8 до ~19.1. Это наглядно показывает участие в составе обломочного материала, слагающего песчаники, продуктов разрушения как основных, так и кислых магматических и метаморфических пород. Так же, как и на других, рассмотренных выше диаграммах, наблюдается заметная дифференциация состава песчаников разных объектов, хорошо отражающаяся в распределении усредненных точек (например, объектов 21 и 10, 14, 15, см. рис. 14б). К точке среднего протерозойского кратонного песчаника тяготеют усредненные точки объектов 2, 5, 8 и 11, образуя кластер 1. Кластер 2 составляют усредненные точки объектов 6, 7, 9, 12 и 20, сосредоточенные у точки среднего архейского гранита.

На графике (Gd/Yb)_N–Eu/Eu* подавляющая часть индивидуальных точек состава песчаников локализована в области, описываемой величинами $0.5 < (Gd/Yb)_N < 4.5$ и $0.25 < Eu/Eu^* < 1.25$ (рис. 15а). Свойственные исследуемым песчаникам значения (Gd/Yb)_N и Eu/Eu*, за исключением объектов 6, 9, 11 и 14, помещают их усредненные точки в треугольник, вершинами которого являются точки средних архейских гранитов, позднеархейских базальтов и архейских ТТГ-ассоциаций. Внутри этого треугольника расположены точки UCC и среднего протерозойского кратонного песчаника (см. рис. 15б).

На диаграмме F1–F2¹ [Roser, Korsch, 1988], при построении которой для расчета значений

¹ $F1 = -1.773 \cdot TiO_2 + 0.607 \cdot Al_2O_3 + 0.76 \cdot Fe_2O_3^* - 1.5 \cdot MgO + 0.616 \cdot CaO + 0.509 \cdot Na_2O - 1.224 \cdot K_2O - 9.09$; $F2 = 0.445 \cdot TiO_2 + 0.07 \cdot Al_2O_3 - 0.25 \cdot Fe_2O_3^* - 1.142 \cdot MgO + 0.438 \cdot CaO + 1.475 \cdot Na_2O + 1.426 \cdot K_2O - 6.861$.

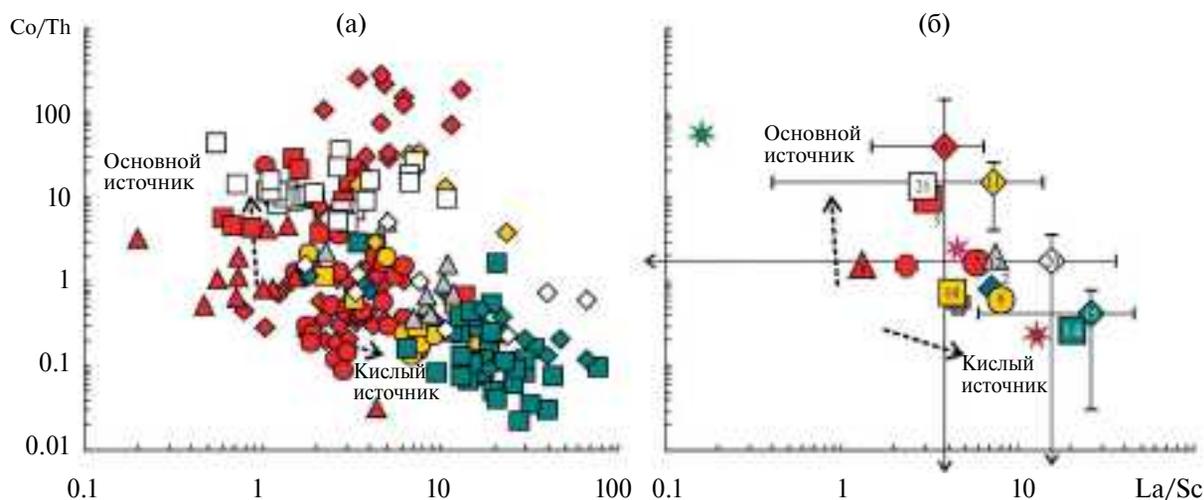


Рис. 12. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек песчаников различных объектов на диаграмме $La/Sc-Co/Th$.
Условные обозначения см. рис. 4.

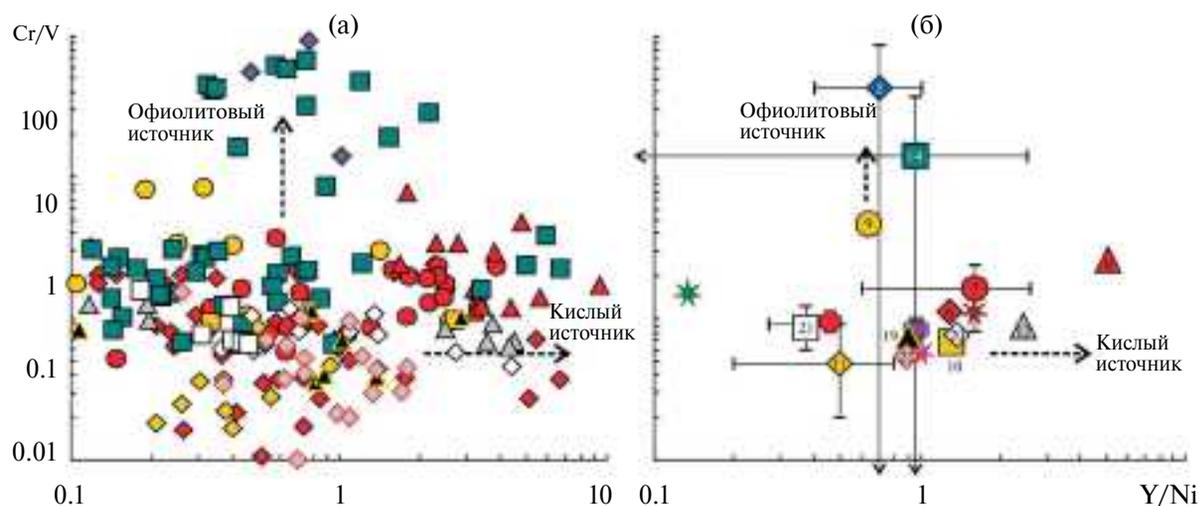


Рис. 13. Локализация индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек песчаников различных объектов на диаграмме $Y/Ni-Cr/V$.
Условные обозначения см. рис. 4.

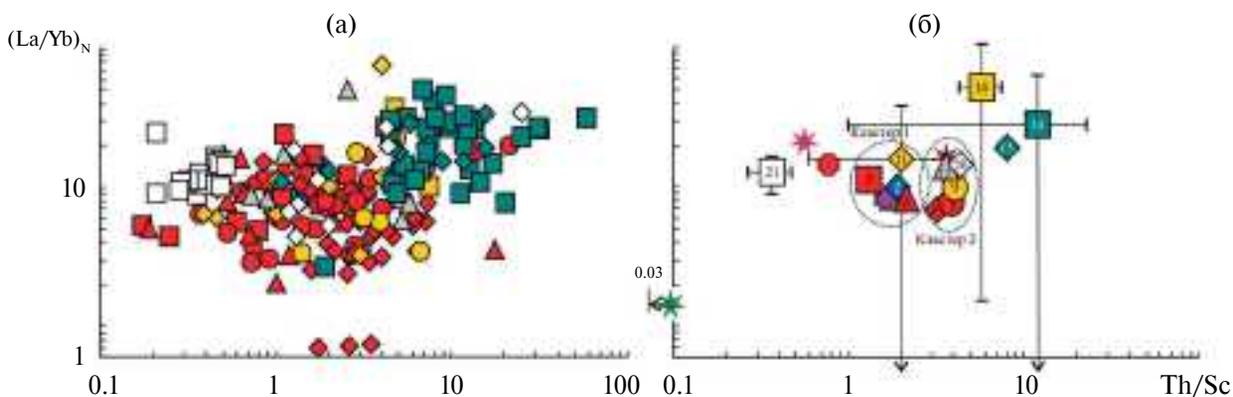


Рис. 14. Локализация индивидуальных (а) и усредненных (б) точек состава точек песчаников различных объектов на диаграмме $Th/Sc-(La/Yb)_N$.
Условные обозначения см. рис. 4.

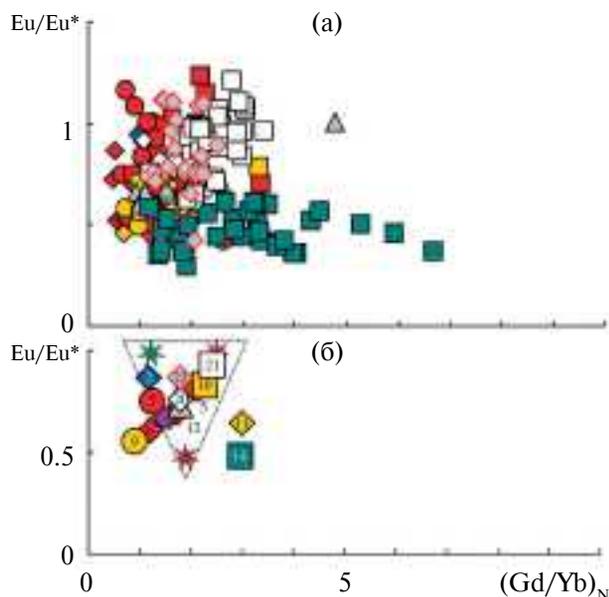


Рис. 15. Распределение индивидуальных (а) и усредненных (б) точек состава песчаников различных объектов на диаграмме $(Gd/Yb)_N - Eu/Eu^*$. Условные обозначения см. рис. 4.

дискриминантных функций использованы только аналитические данные для образцов с содержанием потерь при прокаливании (п.п.п.) < 5 мас. %, подавляющее большинство и индивидуальных, и усредненных точек состава расположено в поле осадочных пород (рис. 16а). Некоторая часть индивидуальных точек находится и в трех других ее полях, однако усредненные точки песчаников (за исключением объектов 6 и 19) сосредоточены в поле, источником обломочного материала для которого являлись осадочные породы (см. рис. 16б). Это в определенной мере удивительно, но не следует забывать, что выше, при анализе присущих песчаникам величин $Zr/Sc_{\text{среднее}}$ и $Th/Sc_{\text{среднее}}$, мы уже отмечали присутствие в их составе той или иной, иногда, по всей видимости, достаточно значительной, доли литогенного обломочного материала.

К сожалению, в использованных при подготовке этой работы литературных источниках почти нет сведений о соотношении в песчаниках разных объектов основных породообразующих компонентов. В случаях же, когда такие данные есть, можно видеть, что на диаграмме Q_mFL_1 [Dickinson, Suczek, 1979] фигуративные точки песчаников, локализованных на диаграмме F1–F2 в области осадочных пород, расположены в основном в полях внутренних частей кратона, переходных континентальных зон, а также областей, сложенных преимущественно

рециклированными кварцевыми образованиями и в переходном от них к лититовым разностям поле (см. рис. 16в). Это принципиально не противоречит выводам, сделанным нами из анализа положения точек состава песчаников на диаграмме F1–F2 (см. выше).

Несколько слов необходимо сказать и о распределении фигуративных точек индивидуальных образцов и усредненных точек песчаников разных объектов из нашего банка данных на высококремнистой ($63 < SiO_2 < 95$ мас. %) диаграмме DF1–DF2² [Verma, Armstrong-Altrin, 2013], используемой для реконструкции палеогеодинамических обстановок формирования осадочных последовательностей широкого возрастного диапазона. При расчете величин дискриминантных функций использованы аналитические данные для образцов с п.п.п. < 5 мас. %. Подавляющее большинство индивидуальных точек песчаников, как и пород глинистых [Маслов и др., 2025], на данном графике сконцентрировано в полях составов, формирующихся в рифтогенных и коллизионных обстановках (рис. 17а). В полях составов островодужной и рифтогенной природы присутствуют только точки песчаников объекта 8. Наиболее наглядно указанные тенденции проявлены в распределении на рассматриваемом графике усредненных точек (см. рис. 17б). Усредненная фигуративная точка песчаников объекта 8 расположена здесь на линии раздела полей островодужных и рифтогенных обстановок. Точки объектов 1, 7, 9, 19 и 21 локализованы в поле составов, типичных для рифтогенных обстановок. Усредненные точки объектов 11, 14, 15 и 17 сконцентрированы у точки схождения границ полей, и в результате судить о палеогеодинамической природе обстановок их формирования затруднительно. В поле коллизионных обстановок сосредоточены точки объектов 2, 4, 5, 6, 12, 20 и 23, тогда как усредненные точки объектов 10 и 22 расположены вблизи линии раздела полей коллизионных и рифтогенных обстановок.

² $DF1 = -0.263 \cdot \ln(TiO_2/SiO_2) + 0.604 \cdot \ln(Al_2O_3/SiO_2) - 1.725 \cdot \ln(Fe_2O_3^*/SiO_2) + 0.66 \cdot \ln(MnO/SiO_2) + 2.191 \cdot \ln(MgO/SiO_2) + 0.144 \cdot \ln(CaO/SiO_2) - 1.304 \cdot \ln(Na_2O/SiO_2) + 0.054 \cdot \ln(K_2O/SiO_2) - 0.33 \cdot \ln(P_2O_5/SiO_2) + 1.588$; $DF2 = -1.196 \cdot \ln(TiO_2/SiO_2) + 1.064 \cdot \ln(Al_2O_3/SiO_2) + 0.303 \cdot \ln(Fe_2O_3^*/SiO_2) + 0.436 \cdot \ln(MnO/SiO_2) + 0.838 \cdot \ln(MgO/SiO_2) - 0.407 \cdot \ln(CaO/SiO_2) + 1.021 \cdot \ln(Na_2O/SiO_2) - 1.706 \cdot \ln(K_2O/SiO_2) - 0.126 \cdot \ln(P_2O_5/SiO_2) - 1.068$. В отличие от авторской версии расчета указанных дискриминантных функций, мы используем не пересчитанные на сухое вещество содержания оксидов. Это ведет лишь к незначительному искажению истинного положения фигуративных точек на данной диаграмме [Маслов и др., 2018].

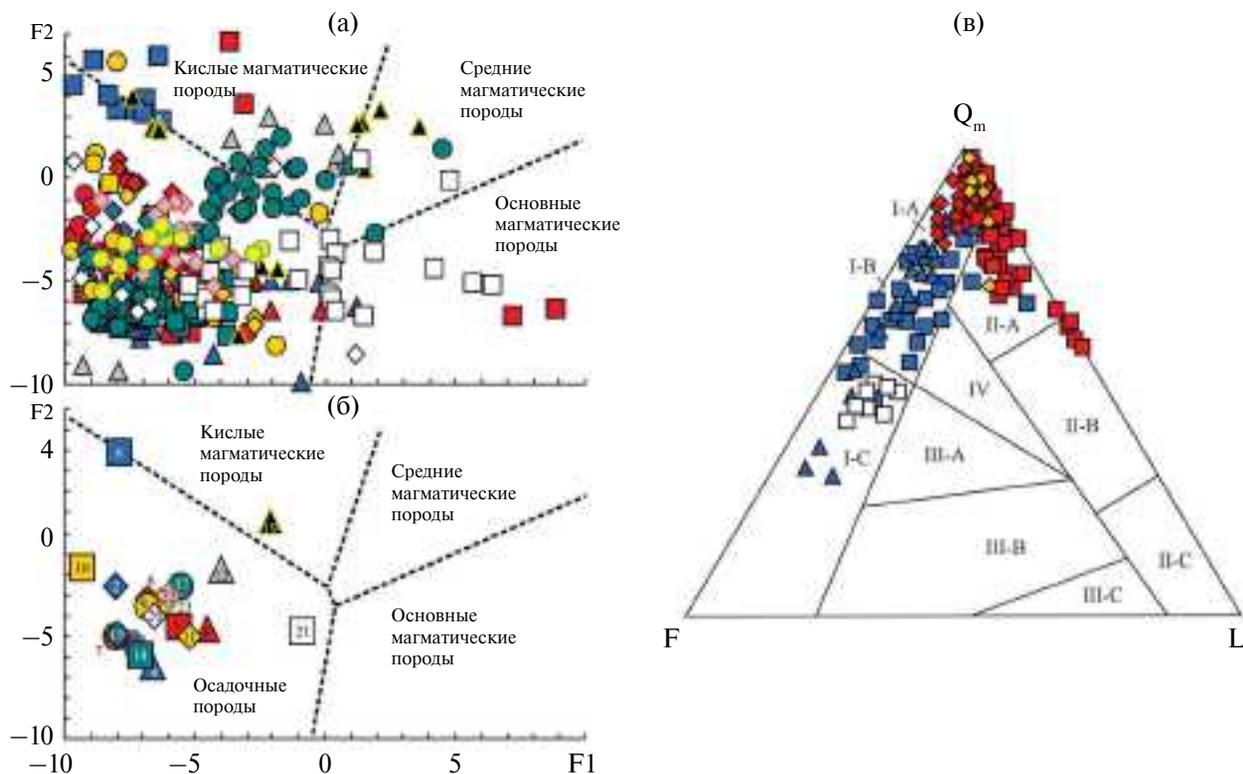


Рис. 16. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек песчаников (валовый химический состав) различных объектов на диаграмме F1–F2 (формулы дискриминантных функций см. в тексте) и распределение точек песчаников (основные породообразующие компоненты) ряда объектов на диаграмме Q_mFL_t (в). (в) – поля песчаников, образованных за счет размыта: I-A – внутренних частей кратона; I-B – переходных континентальных зон; I-C – поднятий фундамента; II-A – областей, сложенных преимущественно рециклированными кварцевыми образованиями; II-B – переходных рециклированных образований; II-C – областей, сложенных в основном рециклированными лититовыми образованиями; III-A – расчлененных островных дуг; III-B – переходных островодужных обстановок; III-C – нерасчлененных островных дуг; IV – смешанных источников. Q_m – монокристаллический кварц; F – полевые шпаты; L – лититовые обломки. При построении данной диаграммы использованы аналитические данные и иллюстрации из работ [Маслов, 1995; Raza et al., 2010, 2011; Купцова и др., 2011; Ahmad et al., 2015; Somasekhar et al., 2018; Agbenyezi et al., 2022]. Условные обозначения см. рис. 4.

ВЫВОДЫ

Суммируя все сказанное выше относительно валового химического состава песчаников, слагающих перекрывающие фундамент осадочные последовательности протерозоя, можно сделать ряд выводов.

Во-первых, химический состав (содержание основных породообразующих оксидов, редких и рассеянных элементов) рассматриваемых песчаников в подавляющем большинстве случаев существенно отличается от химического состава среднего протерозойского кратонного песчаника (по [Condie, 1993]). Очевидно, что они, за редкими исключениями (например, песчаники серии Атабаска), не являются минералогически и геохимически зрелыми образованиями. Это преимущественно литарениты и сублитаре-

ниты, аркозы и субаркозы по классификациям Ф.Дж. Петтиджона с соавторами [Pettijohn et al., 1972] и М. Хиррона [Herron, 1988]. Какие-либо иные типы песчаников (граувакки или кварцарениты) в составе проанализированных нами осадочных толщ достаточно редки.

Во-вторых, несмотря на сказанное выше, большинство песчаников из нашего банка данных по соотношению таких параметров, как Zr/Sc и Th/Sc, а также исходя из присущих многим из них взаимосвязям ряда литохимических модулей, могут быть отнесены к породам, содержащим значительную долю литогенного компонента. В то же время по соотношению Zr, Sc и Th ассоциирующие с ними тонкозернистые обломочные/глинистые породы в значительном числе случаев являются петрогенными, т.е. сложены материалом первого седиментационного цикла. В какой-то мере это может по-

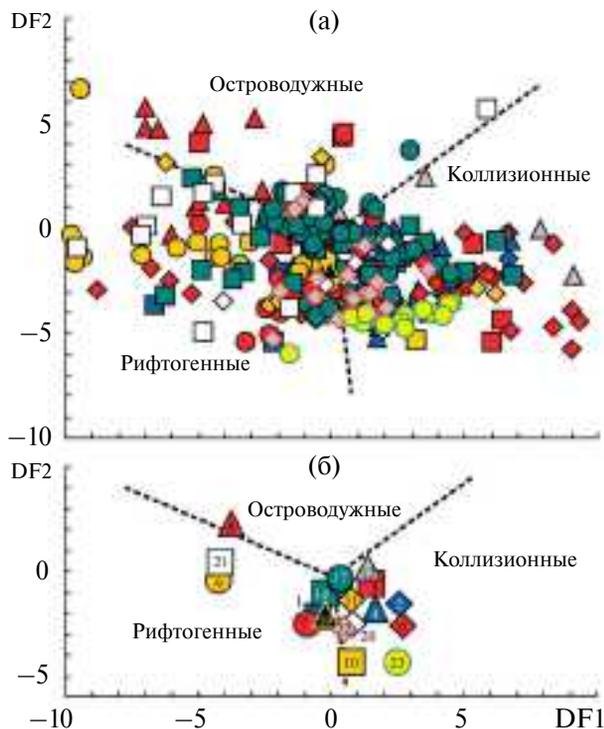


Рис. 17. Распределение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек песчаников различных объектов на диаграмме DF1–DF2 (формулы дискриминантных функций см. в тексте). Числа у значков условных обозначений или внутри них на части “б” отвечают номерам объектов. Условные обозначения см. рис. 4.

казаться странным, следовательно, данный вопрос все еще требует более пристального анализа.

В-третьих, источниками слагающего песчаники обломочного материала, как это следует из распределения их фигуративных точек на диаграммах $Al_2O_3-TiO_2$, $Zr-TiO_2$, $Ni-TiO_2$, $Sc-Th$, $Sc-Th/Sc$ и ряде других, являлись геохимически достаточно зрелые субстраты, в составе которых роль основных магматических и метаморфических пород была, скорее всего, невелика.

В-четвертых, на графике F1–F2, применяемом для реконструкции состава размывавшихся пород, и индивидуальные, и усредненные фигуративные точки песчаников большинства проанализированных нами объектов сконцентрированы в поле продуктов разрушения осадочных пород. Возможно, это следствие наличия в составе песчаников варьирующей, но все же значительной доли литогенного компонента, а также кварца. Нельзя полностью исключить и определенный вклад того или иного типа цемента, но мы не можем учесть это при построении диаграмм. Возможно также, что состав песчаников разных

объектов так или иначе эволюционировал с течением времени, но мы не в состоянии в силу ряда причин установить это (так, например, даже в случае весьма детально опробованных разрезов рифея Южного Урала и Учуро-Майского региона сейчас уже трудно выстроить имеющиеся у нас данные химических анализов снизу вверх по этим разрезам). Для большинства других объектов, материалами по которым мы оперируем, в литературе приводятся 10...15...20 представительных анализов, положение же образцов не отмечено даже на сводных разрезах. Судить в подобных ситуациях об эволюции состава песчаников/глинистых пород невозможно, если, конечно, тот или иной объект/свита/формация/серия/надсерия не состоит из каких-то подчиненных подразделений, так или иначе анализами охарактеризованных. Во всяком случае, данный вопрос требует более подробного рассмотрения. Однако то, что на диаграмме Q_mFL_i фигуративные точки песчаников ряда объектов, валовый химический состав которых предполагает существенный вклад при их формировании продуктов размыва кварц-содержащих осадочных пород, сконцентрированы в полях рециклированных орогенов и внутренних частей кратонов, дает основание думать, что все сказанное действительно повлияло на расположение точек состава песчаников. Как и в ситуации с тонкозернистыми обломочными породами исследованных нами перекрывающих фундамент осадочных последовательностей, очевидно, что и для песчаников не все использованные в данной работе дискриминантные диаграммы позволяют получить согласующиеся результаты, и это следует иметь в виду в будущем.

В-пятых, реконструируемая на основе характера распределения фигуративных точек на диаграмме DF1–DF2 палеогеодинамическая природа источников слагающего песчаники обломочного материала, предполагает, как и в случае пород глинистых [Маслов и др., 2025], образование их за счет продуктов размыва комплексов пород, сформированных в результате различных орогенных/коллизионных и рифтогенных событий (что изначально было ожидаемым).

Наконец, основываясь на анализе всего представленного материала (как данных по индивидуальным образцам, так и усредненных), можно считать, что каких-либо специфических по валовым химическим характеристикам песчаников так же, как и тонкозернистых обломочных/глинистых образований, в составе перекрывающих фундамент осадочных последовательностей протерозоя нет.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне признательны анонимным рецензентам, взявшим на себя труд разобраться во всей приведенной в статье информации. Их советы и замечания во многом способствовали улучшению первого варианта рукописи. Иллюстрации к работе подготовлены Н.С. Глушковой (ИГГ УрО РАН, г. Екатеринбург).

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования проведены в рамках государственного задания ГИН РАН (тема FMMG-2023-0004) и ИГГД РАН (тема FMUW-2021-0003).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Афанасьев Г.В., Миронов Ю.Б., Пинский Э.М. Урановые месторождения и провинции типа несогласия // Региональная геология и металлогения. 2014. № 60. С. 52–59.

Будяк А.Е., Паршин А.В., Спиридонов А.М. и др. Геохимические особенности формирования Au-U месторождений типа “несогласия” (Северное Забайкалье) // Геохимия. 2017. № 2. С. 149–160.

Гребенкин Н.А., Рогожина М.А., Ржевская А.К., Чистякова И.Е. Анализ новых открытий месторождений урана типа “несогласия” впадины Атабаска (провинция Саскачеван, Канада) // Разведка и охрана недр. 2021. № 4. С. 9–18.

Добрецов Н.Л., Ревердатто В.В., Соболев В.С. и др. Фации метаморфизма. М.: Недра, 1970. 432 с.

Кунцова А.В., Худoley А.К., Молчанов А.В. Литогеохимия верхнепротерозойских терригенных отложений южной части Восточно-Анабарского бассейна: эволюция состава источников сноса и вторичные изменения // Вестник СПбГУ. Сер. 7. 20116. Вып. 1. С. 17–31.

Маслов А.В. Типы источников сноса песчаных ассоциаций эталона рифея // Ежегодник-1994. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1995. С. 41–44.

Маслов А.В., Гареев Э.З., Котова Л.Н., Подковыров В.Н. Литохимические особенности песчаников машакской свиты (средний рифей, Южный Урал) // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Материалы научных чтений памяти П.Н. Чирвинского. Вып. 21 / Отв. ред. И.И. Чайковский. Пермь: ПГНИУ, ГИ УрО РАН, 2018. С. 153–161.

Маслов А.В., Гареев Э.З., Крупенин М.Т., Демчук И.Г. Тонкая алюмосиликокластика в верхнедокембрийском разрезе Башкирского мегантиклинория (к реконструкции условий формирования). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1999. 324 с.

Маслов А.В., Ножкин А.Д., Подковыров В.Н. и др. Геохимия тонкозернистых терригенных пород верхнего докембрия Северной Евразии. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 274 с.

Маслов А.В., Подковыров В.Н., Худoley А.К., Кунцова А.В. Обломочные породы перекрывающих фундамент осадочных последовательностей протерозоя. Сообщение 1. Глинистые породы: основные черты литогеохимии // Литология и полез. ископаемые. 2025. № 4. С. 382–406.

Молчанов А.В., Мишенин С.Г., Проскурин В.Ф., Лазарев Ф.Д. Перспективы промышленной ураноносности выступов древнего основания Сибирской платформы и ее ближайшего обрамления (на примере Алданского, Анабарского щитов и Таймыро-Североземельской складчато-надвиговой области) // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. Вып. 148. М.: ВИМС, 2005. С. 71–87.

Пакульнис Г.В., Шумилин М.В. Месторождения урана типа “несогласия” района Атабаска (Канада). Аналитический обзор зарубежных публикаций // Минеральное сырье. Вып. 17. М.: ВИМС, 2005. 102 с.

Перчук А.Л., Сафонов О.Г., Сазонова Л.В. и др. Основы петрологии магматических и метаморфических процессов. М.: ИД “КДУ”, 2015. 472 с.

Прогнозирование и комплексное изучение рудных районов, перспективных на выявление урановых месторождений типа несогласия (методическое руководство) / Отв. ред. Н.В. Межеловский М., СПб.: Геокарт, ГЕОС, 2006. 201 с.

Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Чумаков Н.М. Изотопный возраст границ общих стратиграфических подразделений верхнего протерозоя (рифей и венда) России: эволюция взглядов и современная оценка // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2015. Т. 23. № 6. С. 16–27.

Стратиграфический кодекс России. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. 96 с.

Шумилин М.В. Новые данные о месторождениях урана типа несогласия в Канаде и их значение для поисков аналогов в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2015. № 4. С. 72–77.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.

Янакурт О.В. Предметаморфические изменения осадочных пород в стратисфере: Процессы и факторы. М.: ГЕОС, 1999. 260 с.

Agbenyezi T.K., Foli G., Brako V.A. et al. Paleoweathering, provenance and tectonic setting of metasedimentary rocks at Ayanfuri area in the Paleoproterozoic Kumasi basin in Ghana: evidence from petrography and geochemistry // J. Sediment. Environ. 2022. V. 7. P. 519–538. <https://doi.org/10.1007/s43217-022-00107-5>

Ahmad A.H.M., Agrawal R., Irshad R. Petrographic and geochemical studies of Proterozoic sandstones of Patherwa Formation, Son Valley, India: implication for prove-

- nance and weathering history // Arab. J. Geosci. 2015. V. 8. P. 1977–1991.
- Condie K.C.* Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chemical Geol. 1993. V. 104. P. 1–37.
- Dickinson W.R., Suczek C.A.* Plate tectonics and sandstone composition // AAPG Bull. 1979. V. 63. P. 2164–2182.
- Floyd P.A., Winchester J.A., Park R.G.* Geochemistry and tectonic setting of Lewisian clastic metasediments from the Early Proterozoic Loch Maree Group of Gairloch, N.W. Scotland // Precambrian Res. 1989. V. 45. P. 203–214.
- Geologic Time Scale 2020 / Eds F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg. Amsterdam: Elsevier, 2020. V. 1. 561 p.
- Hayashi K.-I., Fujisawa H., Holland H.D., Ohmoto H.* Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada // Geochim. Cosmochim. Acta. 1997. V. 61. P. 4115–4137.
- Herron M.M.* Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data // J. Sed. Res. 1988. V. 58. P. 820–829.
- Hoeve J., Sibbald T.I.I.* On the genesis of Rabbit Lake and other unconformity-type uranium deposits in northern Saskatchewan, Canada // Econ. Geol. 1978. V. 73. P. 1450–1473.
- Huston D.L., Mernagh T.R., Hagemann S.G. et al.* Tectono-metallogenic systems – The place of mineral systems within tectonic evolution, with an emphasis on Australian examples // Ore Geol. Rev. 2016. V. 76. P. 168–210.
- Jefferson C.W., Thomas D.J., Gandhi S.S. et al.* Unconformity-associated uranium deposits of the Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta // Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods / Ed. W.D. Goodfellow / Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division. Spec. Publ. 2007. № 5. P. 273–305.
- McLennan S.M., Fryer B.J., Young G.M.* The geochemistry of the carbonate-rich Espanola Formation (Huronian) with emphasis on the rare earth elements // Can. J. Earth Sci. 1979. V. 16. P. 230–239.
- McLennan S.M., Hemming S.R., McDaniel D.K., Hanson G.N.* Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics // Processes controlling the composition of clastic sediments / Eds M.J. Johnsson, A. Basu / Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 1993. № 284. P. 21–40.
- Needham R.S., Crick I.H., Stuart-Smith P.G.* Regional geology of the Pine Creek Geosyncline // Uranium in the Pine Creek Geosyncline / Eds J. Ferguson, A.B. Goleby Proceedings of the International Uranium Symposium on the Pine Creek Geosyncline. Vienna: IAEA, 1980. P. 1–22.
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R.* Sand and sandstone. Berlin: Springer-Verlag, 1972. 552 p.
- Quirt D.H.* Athabasca unconformity-type uranium deposits: one deposit type with many variations // Uranium Geochemistry 2003: Proceedings of an International Conference, Nancy-France, 2003. P. 309–312.
- Raza M., Ahmad A.H.M., Khan M.S., Khan F.* Geochemistry and detrital modes of Proterozoic sedimentary rocks, Bayana Basin, north Delhi fold belt: implications for provenance and source-area weathering // Int. Geol. Rev. 2012. V. 54. P. 111–129.
- Raza M., Dayal A.M., Khan A. et al.* Geochemistry of lower Vindhyan clastic sedimentary rocks of Northwestern Indian shield: Implications for composition and weathering history of Proterozoic continental crust // J. Asian Earth Sci. 2010. V. 39. P. 51–61.
- 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.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the Continental Crust // Treatise on Geochemistry. Volume 3: The Crust / Eds H.D. Holland, K.K. Turekian K.K. Oxford: Elsevier, 2014. P. 1–51.
- Somasekhar V., Ramanaiah S., Sarma D.S.* Geochemical characterization of the siliciclastic rocks of Chitravati Group, Cuddapah Supergroup: Implications for provenance and depositional environment // J. Earth Syst. Sci. 2018. V. 127. 54.
<https://doi.org/10.1007/s12040-018-0955-y>
- Taylor S.R., McLennan S.M.* The Continental Crust: Its Composition and Evolution: an Examination of the Geochemical Record Preserved in Sedimentary Rocks. Oxford: Blackwell, 1985. 312 p.
- Unconformity-related Uranium Deposits. IAEA-TECDOC-1857. Vienna: IAEA, 2018. 295 p.
- 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. 117–180.
- Wang B.-Q., Wang W., Zhou M.-F.* Provenance and tectonic setting of the Triassic Yidun Group, the Yidun Terrane, Tibet // Geosci. Frontiers. 2013. V. 4. P. 765–777.

CLASTIC ROCKS OF THE OVERLYING BASEMENT PROTEROZOIC SEDIMENTARY SEQUENCES. COMMUNICATION 2. SANDSTONES: MAIN FEATURES OF LITHOGEOCHEMISTRY

A. V. Maslov^{1,*}, V. N. Podkovyrov^{2,**}, A. K. Khudoley^{3,***}, A. V. Kuptsova³

¹*Geological Institute RAS, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia*

²*Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, Makarov emb., 2, St. Petersburg, 199034 Russia*

³*Institute of Earth Sciences, St. Petersburg State University, Dekabristov lane, 16, St. Petersburg, 199155 Russia*

**e-mail: amas2004@mail.ru*

***e-mail: vpodk@mail.ru*

****e-mail: akhudoley@gmail.com*

Based on the analysis of the bulk chemical composition of sandstones that make up the Proterozoic sedimentary sequences that unconformably overlie the basement (Ai and Prikamsk formations, Mukun and Valdai groups, Kerur Formation, Gwalior, Athabasca, Libby Creek, Ufoshan, Birim groups, etc.), it has been shown that the content of the main rock-forming oxides and trace elements in them in the overwhelming majority of cases differs significantly from the chemical composition of the average Proterozoic cratonic sandstone. Their composition corresponds mainly to litharenites, sublitharenites, arkoses and subarkoses according to the classifications of F.J. Pettijohn et al. and M. Hirron. Most of the sandstones from the aggregate analyzed by us belong to rocks containing a significant or predominant share of the lithogenic component. The sources of the detrital material composing the sandstones were fairly mature substrates in which the role of the basic igneous and metamorphic (?) rocks was insignificant. In terms of paleogeodynamics, these substrates can be considered to have formed as a result of various orogenic/collisional and riftogenic events. As with the fine-grained clastic rocks present in the Proterozoic sedimentary sequences we studied, it is clear that not all of the discriminant diagrams used in this study yield consistent results.

Keywords: sandstones, Proterozoic, lithogeochemistry, basement