

УДК 551

ОБЛОМОЧНЫЕ ПОРОДЫ ПЕРЕКРЫВАЮЩИХ ФУНДАМЕНТ ОСАДОЧНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ ПРОТЕРОЗОЯ. СООБЩЕНИЕ 1. ГЛИНИСТЫЕ ПОРОДЫ: ОСНОВНЫЕ ЧЕРТЫ ЛИТОГЕОХИМИИ

© 2025 г. А. В. Маслов^{а, *}, В. Н. Подковыров^{б, **}, А. К. Худoley^{с, ***}, А. В. Купцова^с

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

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

^сИнститут 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.

Анализ валового химического состава тонкозернистых обломочных/глинистых пород ряда объектов (айская, прикамская и трехгорная свиты, мукунская серия и усть-ильинская свита, старорусская и василеостровская свиты, глинистые породы нижнего виндия и серий Гвалиор, Бима, Атабаска, Либби Крик и др.), участвующих в сложении несогласно перекрывающих кристаллический фундамент осадочных последовательностей протерозоя, показал, что их минеральный состав был близок к составу большинства постархейских глинистых пород. Соотношение Zr, Sc и Th в этих породах предполагает, что они сложены преимущественно слабо рециклированным материалом. Доля продуктов размыва магматических пород основного состава среди источников их тонкой алюмосиликокластики была относительно невелика. Особенности валового химического состава таких глинистых пород дают основание считать, что основными поставщиками обломочного материала для них выступали комплексы пород, сформированные в коллизионных и/или рифтогенных обстановках.

Ключевые слова: глинистые породы, фундамент, протерозой, литогеохимия

DOI: 10.31857/S0024497X25040023, EDN: JEEXZP

Во многих известных разрезах протерозоя его нижние подразделения (надсерии, серии, свиты, подсвиты) залегают с резким стратиграфическим или угловым несогласием на породах кристаллического фундамента: нижнерифейская бурзянская серия на Южном Урале [Семихатов, 1974; Семихатов и др., 2009 и др.]; рифейский вулканогенно-осадочный комплекс в Пашско-Ладожском бассейне [Купцова и др., 2011а], серия Со-нахан центральной части Индийского щита [Wani et al., 2022], серия Гвалиор на западном фланге кратона Бунделькханд, Индия [Absar et al., 2009], примеры можно продолжить.

Однако на целый ряд вопросов: 1) какими по валовому химическому составу (основные пороодообразующие оксиды и редкие и рассеянные

элементы) песчаниками и глинистыми (метапелиты) породами сложены несогласно перекрывающие фундамент осадочные толщи; 2) как распределены их фигуративные точки на различных дискриминантных диаграммах и др., ясных ответов в литературе все еще нет. Поэтому нашей главной целью является заполнение в какой-то мере указанного пробела.

Объект исследования – протерозойские внутрикратонные бассейны, базальные осадочные толщи которых несогласно перекрывают кристаллический фундамент. С осадочными последовательностями в зонах структурно-стратиграфических несогласий между чехлом и фундаментом связаны месторождения урана, золота, свинца, цинка, серебра в ассоциации с платиноидами,

ванадием, медью, никелем, мышьяком, селеном и другими экономически важными компонентами [Hoeve, Sibbald, 1978; Needham et al., 1980; Proterozoic..., 1981; Величкин, 1983; Комарницкий и др., 1987; Williams, 1998; Quirt, 2003; Михайлов и др., 2004; Молчанов и др., 2005; Пакульнис, Шумилин, 2005; Прогнозирование..., 2006; Jefferson et al., 2007; Шумилин, 2011, 2015; Афанасьев и др., 2014; Huston et al., 2016; Будяк и др., 2017; Geological..., 2018; Unconformity-related..., 2018; Гребенкин и др., 2021; Пэк и др., 2022; и др.].

Заложение протерозойских осадочных бассейнов связано в подавляющем большинстве случаев с дроблением вследствие рифтогенеза гранито-гнейсового фундамента и/или зрелой континентальной коры, консолидация которой происходила 3.5–3.0 и 2.8–2.5 млрд лет назад [Windley, Bridgwater, 1971; Armstrong, 1991; Condie, 1998; Isley, Abbott, 2002; Bleeker, 2003; van Kranendonk, 2012; Геологическая..., 2021; и др.], завершившись в основном к 2.0–1.8 млрд лет. Источники слагающего их обломочного материала могли быть местными (локальными) или находиться на значительном удалении, а состав песчаников варьирует от литаренитов, аркозов и кварц-полевошпатовых разностей до кварцаренитов. Встречаются здесь и довольно экзотические породы типа “диагенетических песчаников” (diagenetic arenites) [Hiatt et al., 2007; Купцова, Худoley, 2020]. Еще одна особенность осадочного выполнения такого рода бассейнов – отсутствие выраженной взаимосвязи тектонических обстановок формирования осадочных толщ и их состава. Так, весьма зрелые разности песчаников могут слагать осадочные последовательности даже вблизи несогласно перекрываемого ими кристаллического фундамента (см., например, [Rainbird et al., 2003]).

В настоящей работе использованы собственные аналитические данные по валовому химическому составу обломочных пород осадочных последовательностей разного возраста (или объектов нашего банка данных): айской свиты Южного Урала (объект 1); прикамской свиты Камско-Бельского авлакогена (объект 2); трехгорной свиты Учуро-Майского региона (объект 3); мукунской серии и усть-ильинской свиты периферии Анабарского массива (объект 4) и валдайской серии (старорусская и василеостровская свиты), северо-восточная часть Балтийской моноклинали (Ленобласть и Эстония) (объект 23).

Привлечены также заимствованные из литературы сведения, включая данные о содержании пороодообразующих оксидов, редких и рассеянных элементов в обломочных породах нижнего

виндия, бассейн Виндхьян, север Индийского щита (объект 5); серии Читравати, мобильный пояс Восточный Гат, Юго-Восточная Индия (объект 6); формации Керур, бассейн Каладги-Бадами, Южная Индия (объект 7); серии Соманпалли, восточный пояс долины Пранхита-Годавари, центральная Индия (объект 8); серии Гвалиор, северо-западная часть кратона Бунделькханд, Индия (объект 9); серии Биджавар, бассейн Сонрай, центральная Индия (объект 10); надсерии Дели, бассейн Баяна, северо-запад Индийского щита (объект 11); серий Сонахан и Махакошал, центральная часть Индийского щита (объект 12).

Также использованы данные о валовом химическом составе глинистых пород и метапелитов серии Бима, бассейн Бима, кратон Дхарвар, Южная Индия (объект 13); серии Атабаска, Канада (объект 14); серии Либби Крик, кратон Вайоминг, США (объект 15); надсерии Вернеке, Канада (объект 16); “геосинклинали Пайн-Крик”, север Австралии (объект 17); надсерии Гурон, кратон Сьюпириор, Канада (объект 18); серии Рама, северо-восточная часть Лабрадор, Канада (объект 19); серии Уфошань, южная часть Северо-Китайского кратона (объект 20); надсерии Бирим, щит Лео Ман, Западная Африка (объект 21) и Пашско-Ладожского бассейна, южная периферия Балтийского щита (объект 22). Возраст всех перечисленных объектов, как и возраст пород фундамента, указан далее (см. раздел “Краткая характеристика...”).

Не для всех названных объектов в литературе имеются аналитические данные одновременно для глинистых пород и для песчаников. Поэтому в двух больших группах аналитических материалов, сформированных нами для исследования глинистых пород (данная работа) и песчаников (следующее сообщение на эту тему) есть те или иные пробелы, что хорошо видно на иллюстрациях, где показано расположение фигуративных точек усредненных составов пород (т.н. усредненных точек) разных объектов.

Поскольку анализировался весьма разнородный по своей представительности материал, выводы на его основе можно считать только самым первым приближением к искомым наиболее общим характеристикам обломочных пород, слагающих базальные горизонты протерозойских осадочных толщ. Мы отдаем себе также отчет в различном стратиграфическом масштабе анализируемых объектов – от свит/формаций до надсерий, и, пожалуй, единственным оправданием постановки их в один ряд друг с другом служит в какой-то мере сопоставимая длительность

формирования многих из них. Так, например, надсерия Белт-Перселл, США–Канада, обладает максимальной мощностью около 22 км, а длительность ее формирования составляет не более чем 75 млн лет [Anderson, Davis, 1995; Sears et al., 1998; Evans et al., 2000]. Примерно таково (~60 млн лет) время накопления 14-километровой надсерии Вернеке, Канада [Furlanetto et al., 2013; Furlanetto, 2015], а также, по-видимому, айской свиты (1700–2200 м) нижнего рифея Южного Урала [Маслов и др., 2022 и ссылки в этой работе].

В настоящей работе рассматриваются особенности распределения индивидуальных и усредненных точек состава тонкозернистых обломочных/глинистых пород/метапелитов на широко используемых в осадочной петрологии классификационных диаграммах для глинистых пород, а также на дискриминантных диаграммах, позволяющих судить о составе пород-источников тонкой алюмосиликокластики и их палеогеодинамической природе.

В качестве референтных объектов для сравнения использованы средний постархейский австралийский сланец (PAAS), средние архейский кратонный сланец, протерозойский кратонный песчаник, архейский гранит, позднеархейский базальт и средний состав пород архейской тоналит-трондjemит-гранодиоритовой (ТТГ) ассоциации, все по [Condie, 1993], средний состав верхней континентальной коры (УСС [Rudnick, Gao, 2014]), а в ряде случаев также средний состав взвеси рек Мира (SSWR [Viers et al., 2009]). Всего наш банк включает аналитические данные (основные пороодообразующие оксиды) для более 430 индивидуальных образцов. Размер выборки варьирует от 3 (объект 15, глинистые породы и объект 10, песчаники) до 53 (объект 17, песчаники) и 95 (объект 21, глинистые породы) анализов. Величины содержания редких и рассеянных элементов (в том числе из неполных по набору этих элементов выборок) имеются в нашем банке данных для более 200 образцов глинистых пород и 270 образцов песчаников.

К сожалению, для значительного числа рассматриваемых объектов в оригинальных публикациях отсутствуют сведения о содержании CO_2 в глинистых породах или песчаниках. Это не позволяет исключить возможное влияние карбонатной компоненты на положение фигуративных точек на используемых диаграммах.

Степень метаморфизма исследуемых пород варьирует в весьма широких пределах — от метатенеза до зеленосланцевой и амфиболитовой

фазий. Однако, как и ранее [Маслов и др., 1999, 2008], мы считаем, что хотя дометаморфические процессы и процессы регионального метаморфизма могли тем или иным образом изменить первичный минеральный состав и структурно-текстурные особенности глинистых пород, но в целом они не приводят к существенной трансформации валового химического состава пород [Добрецов и др., 1970; Япаскурт, 1999; Перчук и др., 2015].

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Ниже перечислены объекты, для которых есть данные о валовом химическом составе глинистых пород и песчаников, а также те из них, относительно которых имеются сведения только для одного из исследуемых типов обломочных пород.

Объект 1. На северо-востоке Башкирского мегантиклинория (западный склон Южного Урала, рис. 1) на архейско-палеопротерозойских породах тараташского комплекса (возраст > 1.85 млрд лет [Тевелев и др., 2015 и ссылки там]), считающегося фрагментом фундамента Восточно-Европейской платформы [Стратотип..., 1983], с размывом и угловым несогласием, а часто и с корой выветривания в основании залегает айская свита (мощность от 1700 до 2200 м), с которой начинается стратотипический разрез рифея Северной Евразии. U-Pb-изотопный возраст циркона из трахибазальтов, развитых в нижней части свиты составляет 1752 ± 11 млн лет [Краснобаев и др., 2013]. В соответствии с принятым нами подходом это, очевидно, верхнепалеопротерозойский стратон. В нижней части айская свита сложена конгломератами с обломками пород кристаллического фундамента — гранитов, гнейсов, кварцитов, сланцев, жильного кварца и калиевых полевых шпатов (КПШ) [Ленных, Петров, 1978; Стратотип..., 1983], вулканическими породами с прослоями алевролитов, песчаников и гравелитов, а также аркозовыми песчаниками. Важно отметить, что вулканиты, чередующиеся с осадочными породами в нижней части айской свиты, не имеют признаков размыва и, следовательно, существенного вклада в состав ассоциирующих с ними осадочных пород не вносили. Выше в разрезе свиты присутствуют полимиктовые песчаники, гравелиты, конгломераты с прослоями углеродисто-глинистых сланцев, доломитов и, редко, известняков. Венчают свиту углеродисто-глинистые сланцы с прослоями алевролитов и песчаников.

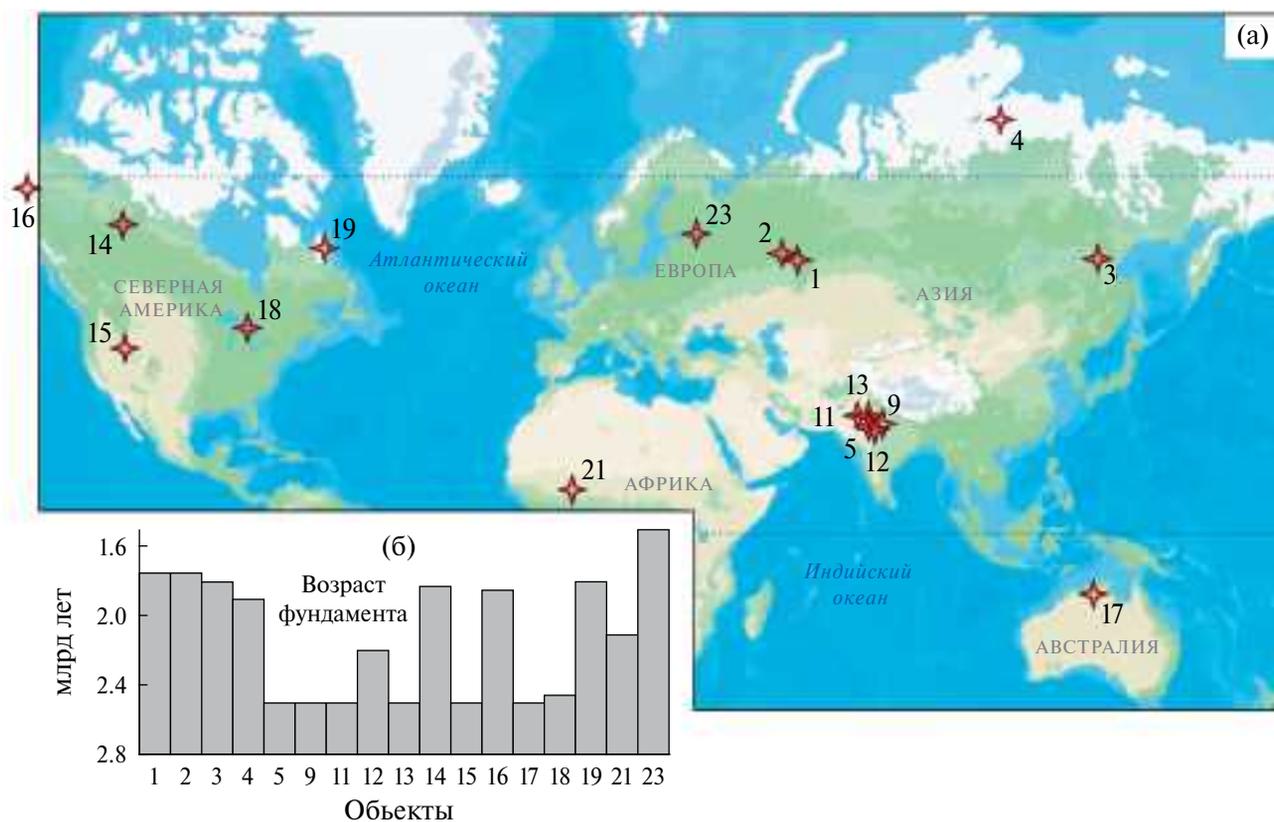


Рис. 1. Положение рассматриваемых в данной работе объектов (а) и возраст фундамента (б).

1 – айская свита, верхи палеопротерозоя, Южный Урал; 2 – прикамская свита, верхи палеопротерозоя, Камско-Бельский авлакоген; 3 – трехгорная свита, верхи палеопротерозоя, север Юдомо-Майского прогиба; 4 – мукунская свита/серия и усть-ильинская свита, верхи палеопротерозоя, Анабарский массив; 5 – нижний виндий, низы мезопротерозоя, бассейн Виндхьян, север Индийского щита; 9 – серия Гвалиор, палеопротерозой, северо-западная окраина кратона Бундельханд; 11 – надсерия Дели, палеопротерозой, бассейн Баяна, северо-западная окраина Индийского щита; 12 – серии Сонахан и Махакошал, поздний архей-палеопротерозой и поздний палеопротерозой, центральная часть Индийского щита; 13 – серия Бима, ранний-средний мезопротерозой, бассейн Бима, кратон Дхарвар, Южная Индия; 14 – серия Атабаска, палеопротерозой, Канада; 15 – серия Либби Крик, палеопротерозой, кратон Вайоминг, США; 16 – надсерия Вернеке, поздний палеопротерозой, Канада; 17 – “геосинклиналь Пайн-Крик”, палеопротерозой, север Австралии; 18 – надсерия Гурон (формации Эспаньола, Гоуганда, Пекорс, Серпент и Гордон Лейк), палеопротерозой, кратон Сьюпириор, Канада; 19 – серия Рама, палеопротерозой, северо-восток Лабрадора, Канада; 21 – надсерия Бирим, палеопротерозой, щит Лео Ман, Западная Африка; 23 – валдайская серия, неопротерозой, северо-восток Балтийской моноклинали. Для объектов 6–8, 10 и 20 у авторов имеются аналитические данные только для песчаников.

Объект 2. В Камско-Бельском авлакогене, расположенном на востоке Восточно-Европейской платформы, на кристаллическом фундаменте (возраст пород >1.7 (?) млрд лет [Белоконь и др., 2001; Сергеева и др., 2021]) залегает прикамская свита и ее аналоги. Свита объединяет разнозернистые аркозовые, субаркозовые, полевошпатово-кварцевые и кварцевые песчаники, гравелиты, конгломераты, алевролиты и, в верхней части, более тонкозернистые обломочные породы иногда с примесью карбонатного материала. Мощность свиты варьирует от 100 до 1800 м [Белоконь и др., 2001] и в пределах Пермского края, по всей видимости, увеличивается до 3500 м [Ситчихин, 2009].

Объект 3. На севере Юдомо-Майского прогиба (юго-восток Сибирской платформы) разрез верхов палеопротерозоя начинает трехгорная свита учурской серии [Семихатов, Серебряков, 1983], объединяющая песчаники, алевролиты, строма-толитовые доломиты и глинистые известняки. Мощность ее оценивается в 1100–1200 м, но может быть, вероятно, больше. До начала 1980-х гг. трехгорная свита рассматривалась многими как эквивалент гонамской свиты, залегающей в основании рифейской последовательности в Учурской впадине, хотя прямых аналогий в строении названных свит не наблюдается [Семихатов, Серебряков, 1983]. Гонамская свита несогласно,

с корой выветривания в основании перекрывает палеопротерозойские кристаллические породы фундамента (различные гнейсы, мраморы, кристаллические сланцы, габбро-диабазы и др., возраст >1.8 млрд лет [Горошко, Гурьянов, 2008]) и осадочно-вулканогенные образования уянской серии (песчаники, гравелиты, конгломераты, алевролиты и базальты) [Карсаков и др., 2002; Горошко, Гурьянов, 2008]. В составе конгломератов можно видеть гальки пород фундамента – гранитоиды, гранито-гнейсы, жильный кварц, кварцевые порфиры, кварциты, а также доломитовые песчаники и доломиты, трахириолиты и породы основного состава [Семихатов, Серебряков, 1983; Карсаков и др., 2002].

Объект 4. На севере Сибирской платформы (Анабарский массив) на породах кристаллического фундамента (гнейсы, пара- и плагиогнейсы, мигматиты, гранитоиды, метабазиты, чарнокиты, эндербиты, кварциты, мрамора, кальцифиры и др.; возраст >1.9 млрд лет [Купцова и др., 2011б и ссылки там]) с угловым несогласием и следами коры выветривания залегают обломочные породы мукунской свиты/серии и усть-ильинской свиты верхов палеопротерозоя – низов мезопротерозоя – гравелиты, песчаники и кварцито-песчаники, а также пакеты тонкого чередования алевролитов и глинистых сланцев с прослоями строматолитовых доломитов [Комар, 1966; Нижняя..., 1978; Стратиграфия..., 2005]. Среди галек конгломератов в разрезах мукунской серии преобладает жильный кварц, кварциты, встречаются также фрагменты кристаллических сланцев, основных эффузивов и гранитоидов, т.е., очевидно, что обломочные породы описываемых стратонев сложены продуктами размыва кристаллического фундамента. Песчаники мукунской серии имеют в основном кварц-полевошпатовый состав [Купцова и др., 2011б].

Объект 5. На севере Индийского щита породы архея-палеопротерозоя, слагающие фундамент кратона Бунделькханд (ТТГ-гнейсы, санукитоиды, граниты и лейкограниты, мигматиты, метавулканиды и метаосадочные породы, перидотиты, габбро, дайки основных пород и кварцевые жилы; возраст >2.5 млрд лет [Mohanty, 2023 и ссылки там]), несогласно перекрыты слабометаморфизованными отложениями бассейна Виндхьян [Venkatachala et al., 1996; Raza et al., 2002; Ahmad et al., 2015]. Нижняя осадочная последовательность включает пять литостратиграфических единиц, сложенных преимущественно глинистыми породами (сланцы Arangi, Kajrahat, Porcellanite, Koldaha и Rampur) и разделенных интервалами песчаников

или известняков. Вблизи ее подошвы присутствуют основные вулканиды [Prasad, 1984; Raza et al., 2001, 2010]. Песчаники имеют кварцевый, полевошпатово-кварцевый и субаркозовый состав. Гальки в конгломератах представлены кремнями, кристаллическими сланцами, филлитами, кварцитами и другими типами кристаллических пород. Судя по составу песчаников и гальки, присутствие в разрезе основных вулканидов и здесь не оказало существенного влияния на минеральный состав ассоциирующих осадочных пород. Для характеристики валового химического состава глинистых пород и песчаников бассейна Виндхьян использованы аналитические данные из работ [Raza et al., 2002, 2010; Paikaray et al., 2008; Ahmad et al., 2015].

Объект 6. На юго-востоке Индии породы архейского гнейсового комплекса (возраст >2.52 млрд лет [Jayananda et al., 2000; Somasekhar et al., 2018]) несогласно перекрыты отложениями палео-мезопротерозойской надсерии Куддапа, объединяющей серии Папагни, Читравати и Налламалай. В настоящей работе мы приводим валовый химический состав песчаников (субаркозы, сублитарениты, кварцарениты по классификации [Folk, 1974]) толщ Кварциты Пуливендла и Кварциты Гандикота серии Читравати по данным публикации [Somasekhar et al., 2018].

Объект 7. На юго-западе Индии (шт. Северная Карнатака, бассейн Каладжи-Бадами) силикокластические породы неопротерозойской серии Бадами (верхняя часть надсерии Каладжи), принадлежащие формации Керур, несогласно перекрывают граниты, гнейсы и метаосадочные породы фундамента, возраст которых >2.6 млрд лет [Jayaram et al., 1983; Rao et al., 1999], а также осадочные образования мезопротерозойской серии Багалкот [Ramachandran et al., 2016; Velmurugan et al., 2019]. Конгломераты и песчаники формации Керур имеют преимущественно кварцевый состав. Валовой химический состав песчаников изучен по данным, опубликованным в работе [Ramachandran et al., 2016].

Объект 8. В центральной части Индии (долина Прахита–Годавари) архейско-палеопротерозойский фундамент (гнейсы, чарнокиты, метапироксениты и габбро, возраст >2.6 млрд лет [Rao et al., 2018 и ссылки там]) несогласно перекрыт мезо-неопротерозойскими осадочными породами серий Девапалли (мощность 1400–1500 м) и Соманпалли (мощность 2000–7000 м), объединяющих филлиты, конгломераты, кварцевые и субаркозовые песчаники и карбонатные породы. Данные по валовому химическому составу

песчаников серии Соманпалли заимствованы из работы [Rao et al., 2018].

Объект 9. В центральной части Индии на северо-западной окраине кратона Бунделькханд на породах архей-палеопротерозойского фундамента (гранитоиды, гнейсы, ультрамафиты, амфиболиты, кварциты, железистые кварциты, кристаллические сланцы, породы ТТГ-ассоциации, метасадочные породы, риолиты и их брекчии и др.; возраст пород фундамента >2.5 млрд лет [Absar et al., 2009]) залегают обломочные и карбонатные последовательности палеопротерозойской серии Гвалиор, перекрывающиеся отложениями надсерии Виндхьян. Серия Гвалиор объединяет кварцевые (преимущественно) конгломераты, аркозовые и полевошпатово-кварцевые песчаники, глинистые и кремнистые сланцы, железистые кварциты и известняки. Характеристика валового химического состава глинистых пород и песчаников серии Гвалиор приводится по данным публикации [Absar et al., 2009].

Объект 10. В центральной части Индии (шт. Уттар Прадеш, бассейн Сонрай) палеопротерозойская серия Биджавар (мощность <1 км [Saha, Mazumder, 2012]) несогласно перекрывает породы архейского гранито-гнейсового комплекса Бунделькханд (гранитоиды, метаморфические породы, пегматиты, кварцевые жилы и др.; возраст более 2.5 млрд лет [Pant et al., 1989; Dar et al., 2015, 2020]). В состав серии Биджавар входят конгломераты, кварциты, сланцы, в т.ч. туфогенные их разности, известняки, доломиты, фосфориты и фосфоритовые брекчии. Песчаные породы в разрезах серии – в основном кварцарениты, реже субаркозы. Сведения об их валовом химическом составе заимствованы из работы [Dar et al., 2020].

Объект 11. На северо-западной окраине Индийского щита архейский полосчатый гнейсовый комплекс фундамента (пара- и ортогнейсы, амфиболиты, мрамора, известково-силикатные породы, кварциты, горнблендиты, коматииты, слюдяные сланцы и др. [Roy, Kröner, 1996]; возраст более 2.5 млрд лет) перекрыт супракрустальными толщами палеопротерозойской надсерии Дели, выполняющими несколько осадочных бассейнов, в т.ч. бассейн Баяна. Осадочное выполнение последнего представлено кварцевыми и полевошпатово-кварцевыми песчаниками, конгломератами, глинистыми сланцами и вулканическими образованиями. Аналитические данные для характеристики валового химического состава глинистых пород и песчаников бассейна Баяна заимствованы из работы [Raza et al., 2012].

Объект 12. В центральной части Индийского щита кристаллические комплексы архейского фундамента (возраст более 2.6 млрд лет [Wani et al., 2022 и ссылки в этой работе]) блоков Бунделькханд и Бастар (граниты, гранито-гнейсы, ультрамафиты, основные вулканы, габбро, лампроиты и др. [Roy, Bandyopadhyay, 1988; Giri et al., 2021]) перекрыты вулканогенно-осадочными последовательностями серий Сонахан и Махакошал. Возраст их считается позднеархейско-палеопротерозойским. Серия Сонахан включает метаультрамафиты, метабазалты, пирокластические породы, игнимбриты, риолиты, кристаллические сланцы и железистые кварциты, а также конгломераты, обломки в которых представлены гранитами, гнейсами, кислыми вулканическими породами, амфиболитами, метабазалтами, кварцитами, жильным кварцем, железистыми кварцитами, яшмами, сланцами и филлитами. Серия Махакошал объединяет кварциты, карбонатиты, кремнистые и полосчатые железистые породы, граувакки, глинистые и основные вулканические породы. В соответствии с классификацией [Pettijohn et al., 1972], метапсаммиты серии Сонахан являются граувакками и литаренитами, а серии Махакошал – литаренитами и аркозами. Характеристика валового химического состава метапелитов обеих серий основывается на данных работы [Wani et al., 2022], метапсаммитов – на данных для пород с содержанием $\text{SiO}_2 > 68$ мас. %, опубликованных там же.

Объект 13. В бассейне Бима, расположенном в Южной Индии, терригенные осадочные последовательности ранне-среднемезопротерозойской серии Бима с перерывом и угловым несогласием залегают на архейских гранитах и гнейсах (возраст более 2.5 млрд лет) кратона Дхарвар [Kale et al., 1990; Absar et al., 2016]. Анализ валового химического состава тонкозернистых обломочных пород бассейна Бима основывается на данных, приведенных в публикации [Absar et al., 2016].

Объект 14. На севере Саскачевана (Канада) на архейско-палеопротерозойском фундаменте (гранито-гнейсы, ТТГ-гнейсы, графитовые и неграфитовые пелитовые, псаммопелитовые и псаммитовые гнейсы, метакварциты, гранитоиды, габбро и др.; возраст пород фундамента более 1.82 млрд лет [Alexandre, 2020 и ссылки там]) залегают обломочные (конгломераты с обломками кварцевых песчаников и алевролитов, а также глинистые в т.ч. углеродистые породы и грубозернистые песчаники) и карбонатные породы серии Атабаска [Alexandre, 2020]. Мощность серии 1–2 км, но в прошлом могла достигать 3 или

5–6 км [Pagel et al., 1980; Chi et al., 2018]. Песчаники серии Атабаска – почти исключительно кварцарениты, с минимальным содержанием примеси свежих обломочных зерен полевых шпатов [Ramaekers, 1990; Kotzer, Kyser, 1995]. Для характеристики валового химического состава метапелитов и песчаников серии Атабаска использованы как собственные аналитические данные, так и данные, заимствованные из публикаций [Quirt, 1985; Alexandre, 2020]. При этом анализы с содержанием $U > 6$ мкг/г (пороговое значение для разграничения безрудных и оруденелых песчаников [Alexandre, 2020]), исключены из рассмотрения.

Объект 15. На юго-востоке Вайоминга (США), на породах фундамента одноименного кратона (тоналиты- и гранито-гнейсы, гранитоиды, метаандезиты и метаосадочные породы [Mueller et al., 1993; Mueller, Frost, 2006]; возраст древнее 2.5 млрд лет [Mueller, Frost, 2006]) с перерывом и угловым несогласием залегают осадочные образования (пелиты, кварциты, конгломераты, строматолитовые доломиты, базальты) палеопротерозойской серии Либби Крик [Crichton, Condie, 1998]. Суммарная мощность серии достигает 7500 м. Обломки в конгломератах представлены жильным кварцем, кристаллическими сланцами, кварцитами и гранитами. Песчаники имеют состав, близкий к аркозам, субаркозам, полевошпатово-кварцевым псаммитам и кварцаренитам [Karlstrom et al., 1983]. В настоящем сообщении использованы аналитические данные для метапелитов и песчаников серии Либби Крик, приведенные в работе [Crichton, Condie, 1998].

Объект 16. В Юконе, на крайнем северо-западе Канады, в основании супракрустальной последовательности залегают позднепалеопротерозойская (1.66–1.60 млрд лет) надсерия Вернеке. Мощность надсерии достигает 14 км [Furlanetto et al., 2013; Furlanetto, 2015 и ссылки в этой работе]. Взаимоотношения ее с фундаментом неизвестны. По представлениям авторов работы [Thorkelson et al., 2005 и ссылки там], возраст пород фундамента варьирует от 2.0 до 1.84 млрд лет и соответствует времени проявления орогении Вупмэй. По геофизическим данным предполагается, что существенную роль в составе фундамента играют гранитоиды. Надсерия Вернеке объединяет серии Файрчайлд Лейк, Квартет и Гиллеспи Лейк. Серия Файрчайлд Лейк сложена более чем 4-километровой последовательностью слабометаморфизованных алевролитов, аргиллитов и тонкозернистых песчаников с пачками карбонатных пород. Серия Квартет (мощность до 5 км) объединяет темноцветные алевролиты, аргиллиты и

тонкозернистые песчаники; подчиненную роль играют доломиты. Серия Гиллеспи Лейк (мощность до 4 км [Delaney, 1981]) представлена доломитами, известняками, доломитистыми аргиллитами и песчаниками. Характеристика валового химического состава глинистых пород надсерии Вернеке приводится по данным [Furlanetto, 2015].

Объект 17. На севере Австралии на архейском (возраст более 2.5 млрд лет [Page et al., 1980]) фундаменте (граниты, гранито-гнейсы, мигматиты, амфиболиты, метаосадочные породы, железистые кварциты и метабазиты [Needham et al., 1980]) несогласно залегают осадочные породы палеопротерозойской “геосинклинали Пайн-Крик” [Taylor, McLennan, 1980]. Последняя объединяет ~14 км осадочных (в основном углеродистых и известковистых пелитовых, псаммитовых и карбонатных) пород, среди которых есть и вулканогенные образования. Метапесчаники “геосинклинали Пайн-Крик” – это метааркозы, полевошпатовые, полевошпатово-кварцевые и кварцевые метапсаммиты (кварциты) [Needham, Stuart-Smith, 1980; Ewers, Higgins, 1985]. Для характеристики валового химического состава тонкозернистых обломочных пород “геосинклинали Пайн-Крик” данных в нашем распоряжении мало, хотя, судя по работе [Ferguson, Winer, 1980]), в реальности их значительно больше. Мы используем далее данные, заимствованные из работ [McLennan, Taylor, 1979; Taylor, McLennan, 1980; McLennan, 1981; Ewers, 1982; Ewers et al., 1985]. Они позволяют получить только общее представление о валовом химическом составе метапелитов. Сведения о валовом химическом составе песчаников заимствованы из публикации [Ewers, 1982].

Объект 18. В окрестностях оз. Гурон (Канада), на породах провинции Сьюпириор (гранитоиды, гранито-гнейсы, разнообразные по составу протолита – основные, тоналитовые, анортозитовые и метаосадочные гнейсы, метавулканиды, метаграувакки, мигматиты и др. [Percival, West, 1994; Percival et al., 2012]; возраст пород фундамента более 2.45 млрд лет [Al-Hashim, 2016 и ссылки в этой работе]) с хорошо выраженным несогласием залегают палеопротерозойская надсерия Гурон [Long, 1976; Young, 1984; Krogh et al., 1984; Al-Hashim, 2016]. Максимальная ее мощность достигает 12 км. Надсерия объединяет преимущественно обломочные породы; подчиненную роль в ее составе играют карбонатные и магматические образования [Al-Hashim, 2016]. Надсерия Гурон подразделяется на пять серий, из них три средние начинаются микститами (ледниковые отложения?), сменяющимися вверх по разрезу алевролитами

и глинистыми породами (преобладают). Венчают каждую серию песчаники. Данные петрографических исследований [McLennan et al., 1979a] позволяют считать, что основным источником обломочного материала для пород надсерии Гурон были гранитоиды и вулканогенно-осадочные/зеленокаменные образования провинции Сьюпириор. Исследования 1960–1990-х гг. были в основном сосредоточены на изучении валового химического состава тонкозернистых обломочных пород формаций Эспаньола, Серпент и Гоуганда [Young, 1969, 1978; McLennan et al., 1979b; Fedo et al., 1997; Young, Nesbitt, 1999; и др.]. В настоящей работе мы использовали аналитические данные, в том числе усредненные, для глинистых пород перечисленных формаций, а также формаций Пекорс и Гордон Лейк из работ [McLennan et al., 1979; Taylor, McLennan, 1983; Al-Nashim, 2016]. Все вместе они охватывают почти весь разрез надсерии Гурон.

Объект 19. На северо-востоке Лабрадора (Канада), на фундаменте провинции Наин (орто- и парагнейсы, граниты, чарнокиты, анортозиты, габбро, сиениты, щелочные магматические и др. породы [Stockwell, 1963; Taylor, 1971]; возраст пород фундамента более 1.8 млрд лет [Connolly, Ryan, 1996]) несогласно залегают осадочные образования (кварциты, песчаники, преимущественно граувакковые, глинистые породы, в т.ч. с карбонатной примесью, карбонатные брекчии и др.) палеопротерозойской серии Рама [Taylor, 1971; Hayashi et al., 1997]. Мощность серии ~1700 м. Для характеристики валового химического состава глинистых пород и песчаников серии привлечены аналитические данные [Hayashi et al., 1997], полученные для входящих в нее формаций Роуселл-Харбор, Реддик-Байт и Нуллатакток.

Объект 20. В южной части Северо-Китайского кратона породы кристаллического фундамента (возраст более 1.74 (1.85?) млрд лет [Li et al., 2021]) несогласно перекрыты осадочными образованиями мезо(?)–неопротерозойской серии Уфошань. Эта серия объединяет песчаники, конгломераты, алевро-глинистые сланцы, алевролиты, известняки, в т.ч. строматолитовые. Мощность ее достигает 600–700 м. Песчаники имеют кварцевый, полевошпатово-кварцевый и субаркозовый состав, для их характеристики использованы аналитические данные из работы [Hu et al., 2012].

Объект 21. В Западной Африке архейско-палеопротерозойские породы (ТТГ-гнейсы, метавулканиды и др. Возраст фундамента более 2.1 млрд лет [Liégeois et al., 1991; Asiedu et al., 2017; Konate et al., 2024 и др.]) щита Лео Ман перекрыты

палеопротерозойскими осадочными и вулканогенными образованиями надсерии Бирим. Последняя сложена метаграувакками, метапелитами, филлитами, графитистыми сланцами, метабазальтами, метаандезитами и метадацитами, подчиненную роль играют вулканокластические, кремнистые и карбонатные породы [Leube et al., 1990; Taylor et al., 1992; Asiedu et al., 2017]. Присутствующие в составе надсерии песчаники – это вакки, полевошпатовые и полевошпатово-кварцевые, а также собственно кварцевые песчаники. Геохимические особенности тонкозернистых обломочных пород и их Nd-изотопная систематика позволяют предполагать, что основная часть слагающего их обломочного материала поступала за счет эрозии пород палеопротерозойских зеленокаменных поясов и лишь $\leq 10\%$ – продукты разрушения архейской коры. Характеристика валового химического состава глинистых пород и песчаников надсерии Бирим заимствована из работ [Asiedu et al., 2004, 2017, 2019; Roddaz et al., 2007; Manu et al., 2013; Agbenyezi et al., 2022; Konate et al., 2024].

Объект 22. У северного окончания Ладожского озера в Пашско-Ладожском бассейне на коре выветривания архейско-палеопротерозойского фундамента (гнейсы и мигматиты, метавулканиды, карбонатно-терригенные породы, метатурбидиты, анортозиты, габбро, граниты рапакиви и др.; возраст более 1.54–1.53 (1.75) млрд лет [Купцова и др., 2011а и ссылки там]) с резким угловым несогласием залегают раннемезопротерозойские вулканогенные и осадочные образования приозерской, салминской и пашской свит. Приозерская свита (мощность до 230–250 м) объединяет гравелиты, конгломераты и кварц-полевошпатовые песчаники. В верхней ее части присутствуют базальты и андезибазальты. Салминская свита (мощность ~100 м) представлена в основном песчаниками с прослоями конгломератов. В ее кровле залегают туфы и покровы щелочных базальтов. Пашская свита сложена преимущественно песчаниками и алевролитами; есть в ее разрезах также конгломераты. Песчаники приозерской свиты – это субаркозы, аркозы и лититовые аркозы. Песчаники салминской свиты имеют в основном кварц-полевошпатовый состав. Источниками обломочного материала для песчаников приозерской и салминской свит являлись, по данным U-Pb-изотопного датирования обломочного циркона, Салминский массив и свекофенские интрузии Северного Приладожья [Купцова и др., 2011а]. Для исследования валового химического состава песчаников всех трех свит использованы авторские данные.

Объект 23. Валдайская серия неопротерозоя включает на северо-востоке Балтийской моноклинали ряд свит. В настоящей работе мы используем аналитические данные для глинистых пород и песчаников старорусской и василеостровской свит. Мощность старорусской свиты до 50 м. В подошве ее часто можно видеть реликты дезинтегрированной и переотложенной коры выветривания пород дорифейского и рифейского (включая граниты рапакиви с возрастом 1.48 млрд лет(?) фундамента или песчано-гравелитовых отложений рифея [Подковыров и др., 2017]). Нижняя часть свиты представлена в основном песчаниками с прослоями алевролитов и аргиллитов или песчанистыми аргиллитами с глинистыми пудинговыми песчаниками. Выше наблюдаются преимущественно разноокрашенные аргиллиты, алевролиты и пудинговые песчаники, а также пакеты алевроаргиллитов. На старорусской свите как согласно, так и с несогласием залегает василеостровская свита (мощность 150–170 м). В нижней части свиты присутствуют алевроаргиллиты и слюдястые песчаники, а в верхней – сидеритсодержащие глины с прослоями песчаников. Песчаники старорусской и василеостровской свит по составу аркозы, субаркозы, полевошпатово-кварцевые и, реже, кварцевые. Определения возраста обломочного циркона из песчаников обеих свит [Isozaki et al., 2014; Ershova et al., 2019] дают основание считать, что источником обломочного материала для них являлись юго-западные и север–северо-западные (в современных координатах) районы Балтийского щита.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение среднего содержания основных породообразующих оксидов в тонкозернистых обломочных породах и метапелитах большинства исследуемых объектов с PAAS показало, что количество SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 и в какой-то степени FeO^* (FeO^* – суммарное железо в виде FeO) в них вполне сопоставимы (рис. 2). Величины содержания других оксидов отклоняются от PAAS и заметно варьируют.

При сравнении усредненного содержания редких и рассеянных элементов в метапелитах разных объектов нашего банка данных с PAAS (рис. 3) можно отметить как достаточно сопоставимые концентрации (например, Sc, V, Cr, Ga, Yb и др.), так и заметные вариации (например, Co, Rb, Y, Pb, Th и др.). Метапелиты серий Со-нахан и Махакошал (объект 12) демонстрируют

чрезвычайно высокое среднее содержание Zr (~37 PAAS) и Hf (~30 PAAS).

Для классификации по минеральному составу глинистых пород, участвующих в строении исследованных последовательностей, использовались диаграммы НКМ–ФМ [Юдович, Кетрис, 2000] и K/Al – Mg/Al [Turgeon, Brumsack, 2006]. На первой (рис. 4а) индивидуальные фигуративные точки глинистых пород сосредоточены в основном в полях II (глинистые породы с преобладанием смектита при подчиненном количестве каолинита и иллита), IV (преимущественно иллитовые глины), V (хлорит–смектит–иллитовые глины) и VI (иллитовые глины с примесью тонкорастертого КППШ). Относительно небольшая часть точек состава глинистых пород присутствует также в полях I (глинистые породы с преобладанием каолинита) и III (глинистые породы с преобладанием хлорита и примесью Fe-иллита), тяготея к областям перекрытия их с полями II и III (см. рис. 4а). В распределении точек состава индивидуальных образцов глинистых пород на рассматриваемом графике можно видеть определенные тенденции, но лучше всего они выражены при анализе положения точек с усредненным составом, рассчитанным для каждого объекта. Основная часть последних сосредоточена в полях V (здесь же локализована точка PAAS) и VI; а одна из них (объект 14) расположена в области перекрытия полей II, IV и V рядом с точкой среднего архейского аргиллита (см. рис. 4б). Референтная точка среднего состава верхней континентальной коры, обладающая по сравнению со всеми рассматриваемыми нами объектами весьма низкой величиной НКМ, и только немного более высоким значением ФМ, локализована в поле III. Максимальная величина НКМ характерна для усредненной точки объекта 4 (верхи палеопротерозоя Анабарского щита), однако далее мы увидим, что фигуративные точки тонкозернистых обломочных пород этого объекта (как индивидуальные, так и усредненная) на диаграмме $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ – $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ тяготеют к полю составов, которые могли испытать влияние К-метасоматоза.

Распределение индивидуальных точек состава глинистых пород различных объектов на диаграмме K/Al – Mg/Al демонстрирует весьма широкие вариации их состава (рис. 5а). Очевидно, что в нашем банке данных присутствуют как глинистые породы, в составе которых достаточно много хлорита (например, объект 18), так и тонкозернистые обломочные образования с повышенной долей каолинита (объекты 5 и 21) или иллита (объекты 2 и 9). Наиболее хорошо это видно при обращении к положению на диаграмме K/Al – Mg/Al

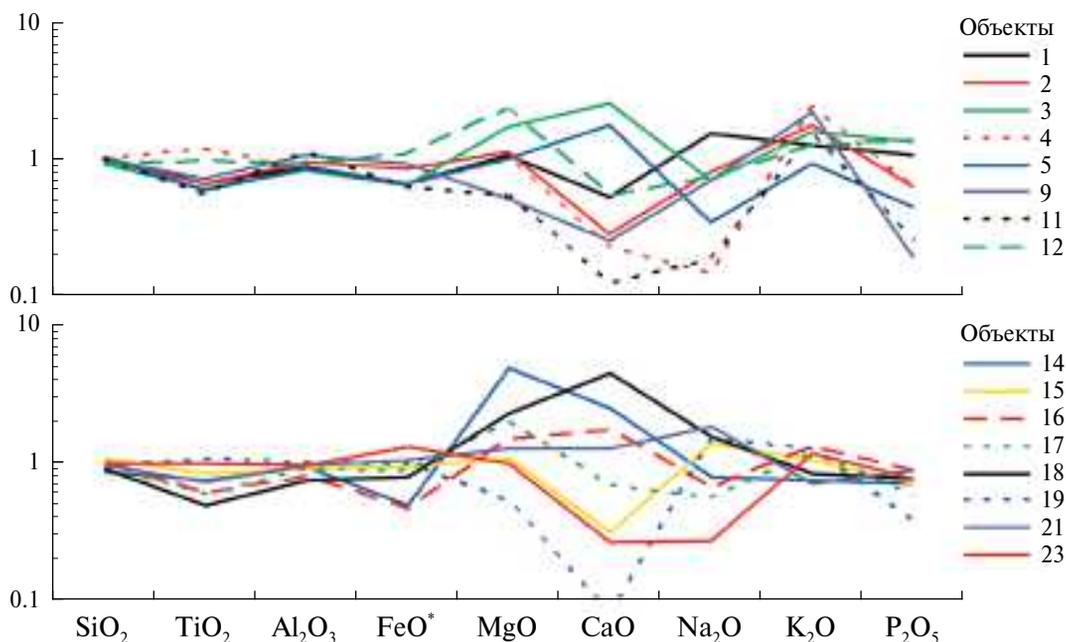


Рис. 2. Нормированное к PAAS среднее содержание основных породообразующих оксидов в тонкозернистых обломочных породах и метапелитах ряда исследуемых объектов (номера кривых соответствуют номерам объектов на рис. 1а, описание которых приведено в тексте).

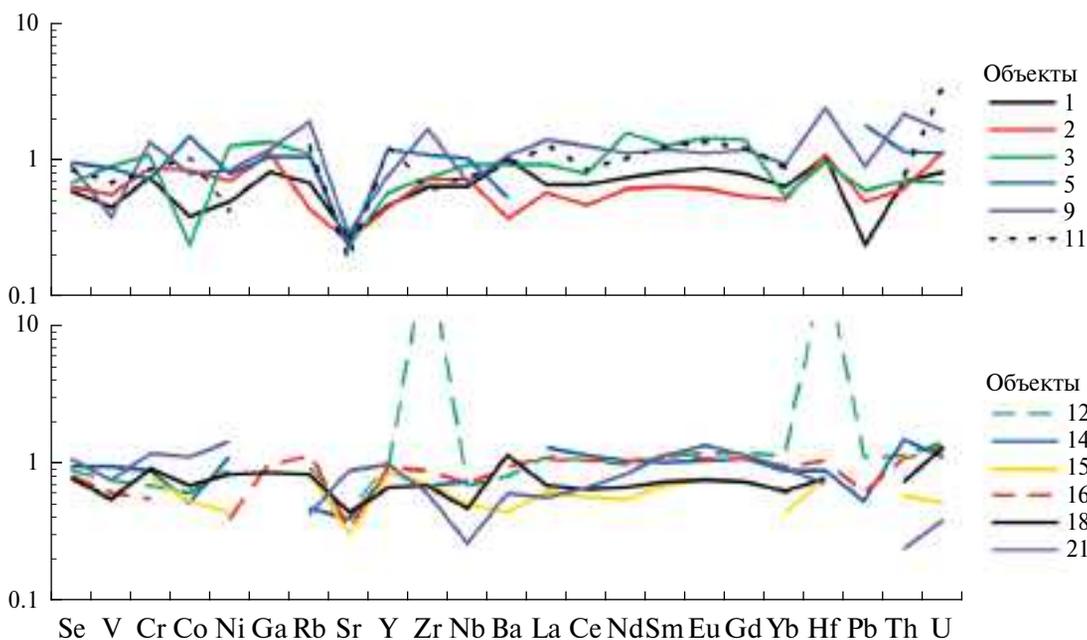


Рис. 3. Нормированное к PAAS среднее содержание ряда редких и рассеянных элементов в метапелитах ряда исследуемых объектов (номера кривых соответствуют номерам объектов (см рис. 1а), описание которых приведено в тексте).

точек усредненного состава глинистых пород различных объектов (см. рис. 5б). Фигуративные точки тонкозернистых обломочных пород объекта 4 (как индивидуальных образцов, так и усредненная), характеризующиеся наибольшими

величинами K_2O/Na_2O , могли испытать влияние К-метасоматоза (см. далее), или слагающая их тонкая алюмосиликокластита накапливалась в условиях климата близкого к ариднему, что вело к сохранению в их составе тонкорастертого КПШ.

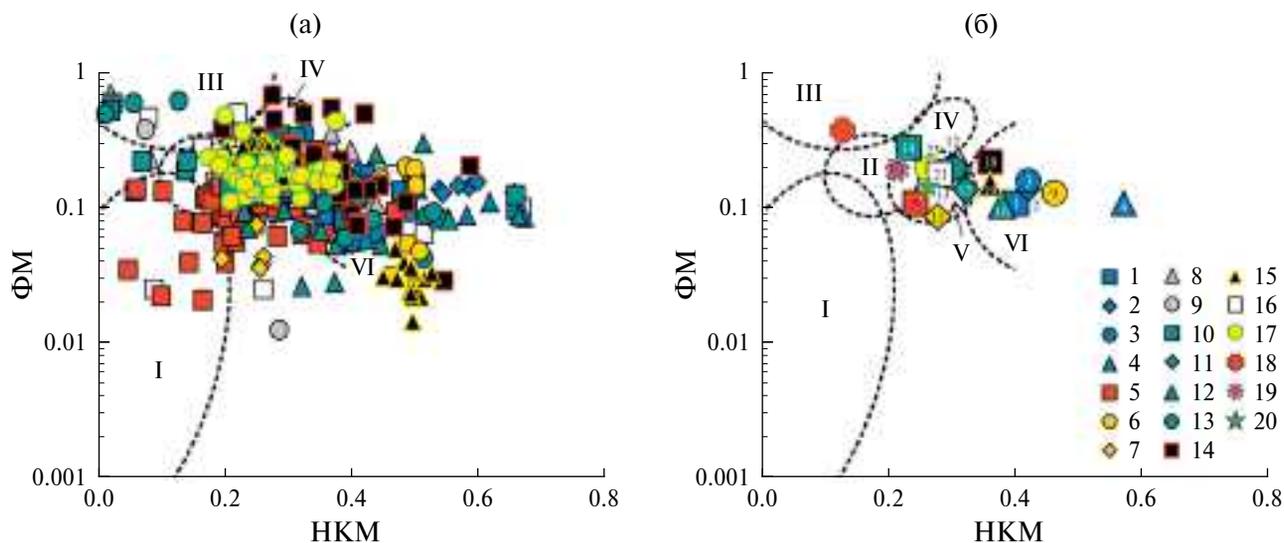


Рис. 4. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород различных объектов на диаграмме НКМ–ФМ.

1 – объект 1; 2 – объект 2; 3 – объект 3; 4 – объект 4; 5 – объект 5; 6 – объект 9; 7 – объект 11; 8 – объект 12; 9 – объект 13; 10 – объект 14; 11 – объект 15; 12 – объект 16; 13 – объект 17; 14 – объект 18; 15 – объект 19; 16 – объект 21; 17 – объект 23; 18 – UCC; 19 – средний архейский аргиллит; 20 – РААС. Числа у значков условных обозначений и внутри них на части “б” здесь и далее отвечают номерам объектов, описанных в тексте.

НКМ = $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$, ФМ = $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MgO})/\text{SiO}_2$. Здесь Fe_2O_3^* – суммарное железо в виде Fe_2O_3 .

Поля глинистых пород: I – с преобладанием каолинита; II – с преобладанием смектита при подчиненном количестве каолинита и иллита; III – доминирует хлорит, в виде примеси может присутствовать Fe-иллит; IV – преимущественно иллитовых; V – стандартная трехкомпонентная система “хлорит + смектит + иллит”; VI – иллитовые глины с той или иной примесью тонкорастертого КПШ.

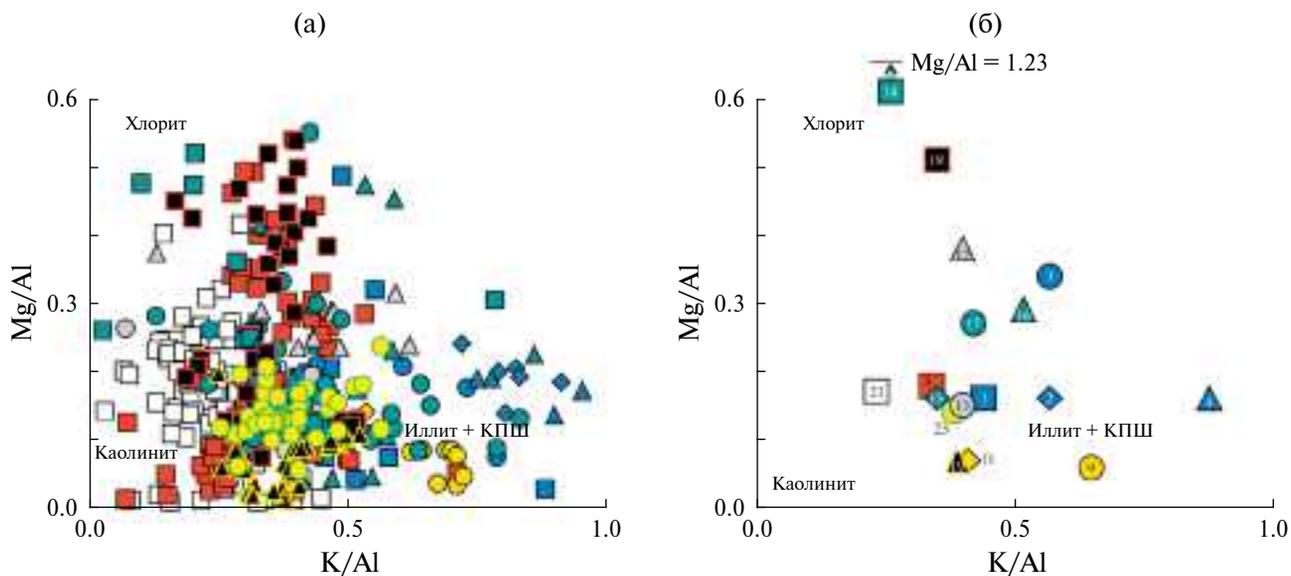


Рис. 5. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) точек состава тонкозернистых обломочных пород различных объектов на диаграмме К/Al–Mg/Al.

Условные обозначения см. рис. 4.

На диаграмме Al_2O_3 – K_2O [van de Kamp, 2016] индивидуальные точки состава глинистых пород из осадочных последовательностей разного возраста, перекрывающих фундамент, распределены

между точками фенгита, иллита и смектита (рис. 6а). Усредненные точки группируются в основном у линии $\text{K}/\text{Al} = 0.28$, при этом ряд из них (объекты 5, 14, 18, 21 и др.) по соотношению

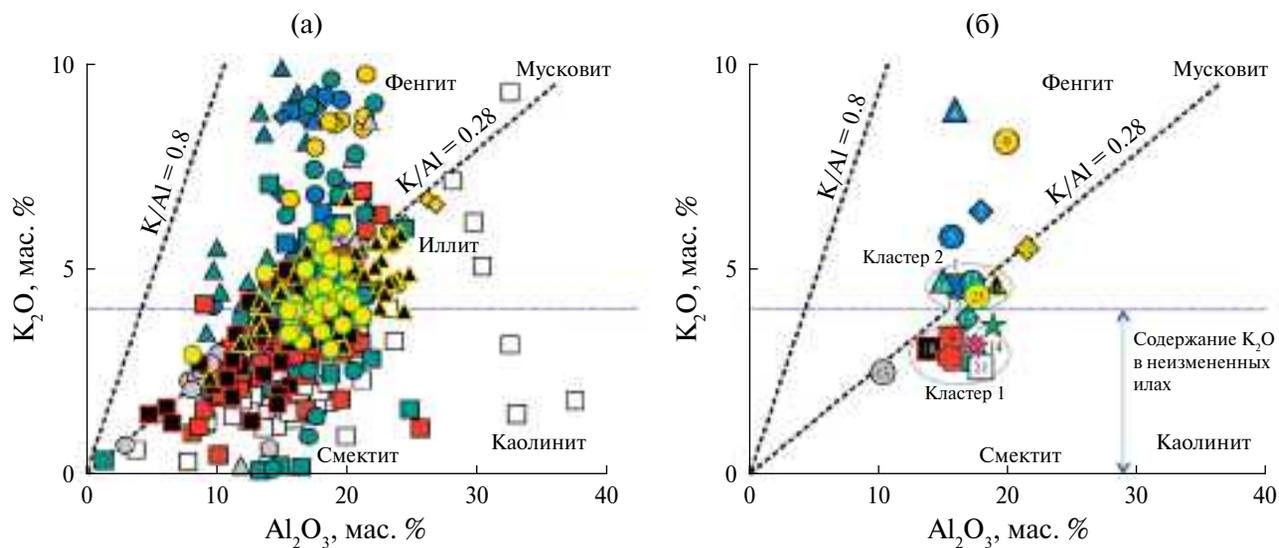


Рис. 6. Распределение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород различных объектов на диаграмме $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--K}_2\text{O}$. Содержание K_2O в неизмененных глинистых породах, по [van de Kamp, 2016]. Условные обозначения см. рис. 4.

в составе глинистых пород оксидов алюминия и калия, достаточно близки к среднему архейскому аргиллиту и UCC. К этому кластеру тяготеют также усредненная точка глинистых пород объекта 15 и точка PAAS (см. рис. 6б). Вместе с тем примерно у половины усредненных точек рассматриваемых нами объектов (например, 1, 12, 16, 17, 19, 23) значения $\text{K}_2\text{O} > 4$ мас. % (кластер 2 и др.). В соответствии с представлениями [van de Kamp, 2016], такое распределение позволяет думать, что породы объектов 1–4, 9, 16 и 17 в той или иной мере затронуты процессами К-метасоматоза (для неизмененных или минимально измененных подобными процессами пелитовых пород характерны значения $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3 < 0.3$ и содержание $\text{K}_2\text{O} < 4$ мас. %). Однако, как мы увидим далее при рассмотрении положения точек глинистых пород из нашего банка данных на диаграмме $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}\text{--SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, не все из перечисленных выше объектов локализованы на ней в области составов, для которых можно предполагать влияние процессов К-метасоматоза. И это порождает при интерпретации результатов определенные трудности.

Конечно, сделанные выше выводы корректны при условии, что мы имеем дело с глинистыми породами в минимальной или умеренной степени затронутыми процессами калиевого метасоматоза, столь характерного для докембрийских осадочных последовательностей. Решить, так это или нет, в нашем случае в определенной мере позволяет диаграмма $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}\text{--SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ [Bolnar et al., 2005].

На ней точки состава тонкозернистых обломочных пород, испытавших воздействие К-метасоматоза, расположены в области величин $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 20$, а точки состава пород, с признаками окремнения, локализованы в области величин $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 > 10$. Распределение индивидуальных фигуративных точек глинистых пород большинства различных объектов из нашего банка данных на этом графике предполагает отсутствие влияния процессов окремнения на их состав (рис. 7а). В области со значениями $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} < 20$ расположены и точки среднего архейского аргиллита, PAAS и UCC. В то же время заметная часть индивидуальных точек состава глинистых пород характеризуется значениями $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 20$, что хорошо видно и по распределению усредненных точек тонкозернистых обломочных пород ряда объектов (объекты 3, 4, 11, 12, 16, 17 и 23) (см. рис. 7б). Однако при оценке сказанного следует иметь в виду, что повышенное содержание оксида калия в глинистых породах в ряде случаев (аридный климат и др. [Юдович, Кетрис, 2000]) может быть следствием не калиевого метасоматоза, а специфических обстановок выветривания и накопления тонкозернистой алюмосиликокластики. Поэтому исключение из дальнейшего исследования глинистых пород объектов 3, 4, 11, 12, 16 и 17 не представляется нам конструктивным. Дополнительный аргумент в пользу, по-видимому, незначительного влияния К-метасоматоза на валовый химический состав исследуемых нами пород – это расположение многих усредненных точек объектов со значениями $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O} > 20$

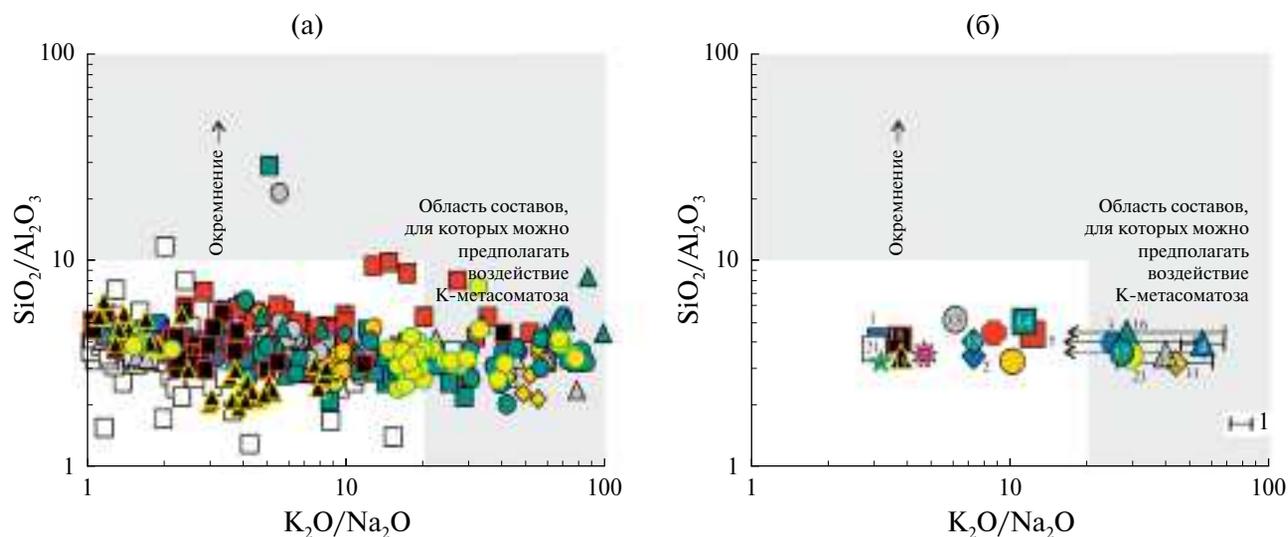


Рис. 7. Распределение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород различных объектов на диаграмме $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$. 1 – величина стандартного отклонения ($\pm 1\sigma$); стрелка показывает, что одно из значений выходит за рамки данной диаграммы. Остальные условные обозначения см. рис. 4.

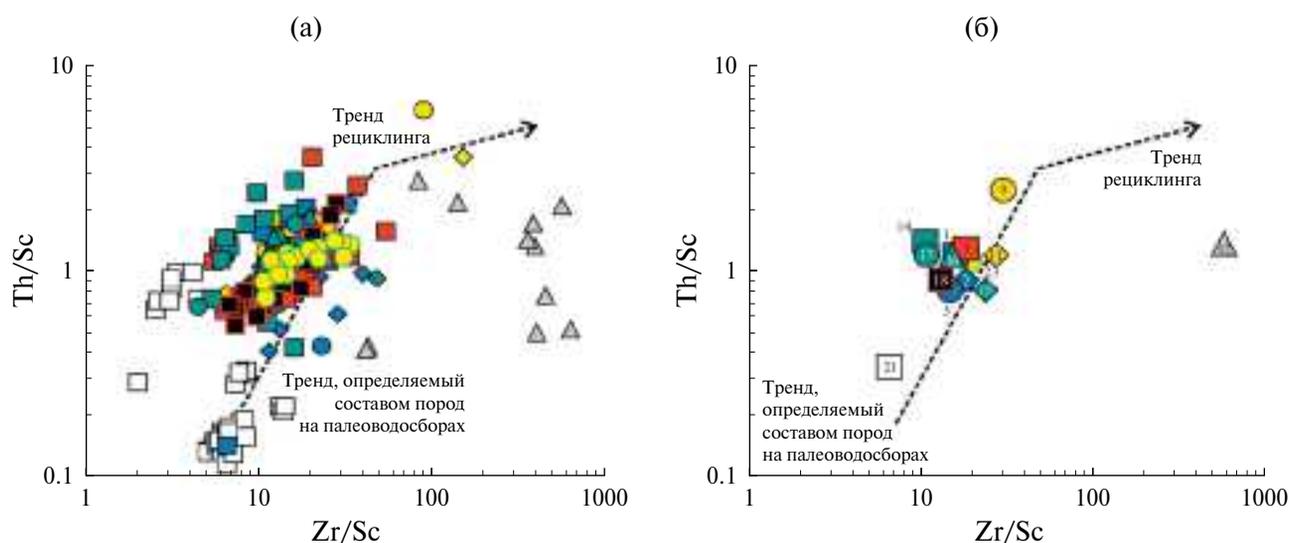


Рис. 8. Локализация индивидуальных (а) и усредненных (б) точек состава тонкозернистых обломочных пород различных объектов на диаграмме $Zr/Sc-Th/Sc$. Условные обозначения см. рис. 4.

и <20 на разных диаграммах в одних и тех же полях (см., например, рис. 2, 6, 7, 8–10).

Еще одно важное обстоятельство связано с характером слагающих глинистые породы материала (петрогенный он или литогенный). Петрогенный материал – это материал, прошедший только один седиментационный цикл. Литогенный материал, напротив, это материал, прошедший несколько осадочных циклов; в результате состав его в той или иной мере отличается от состава материнских магматических или метаморфических

пород. Есть несколько подходов к распознаванию природы алюмосиликокластики, слагающей осадочные породы. Из них мы используем анализ положения индивидуальных и усредненных фигуративных точек глинистых пород нашего банка данных на диаграмме $Zr/Sc-Th/Sc$ [McLennan et al., 1993]. Подавляющее большинство индивидуальных точек состава глинистых пород характеризуется значениями отношения $Zr/Sc < 45$ и тяготеет к тренду, определяемому составом пород на палеоводосборах (см. рис. 8а). Исключение

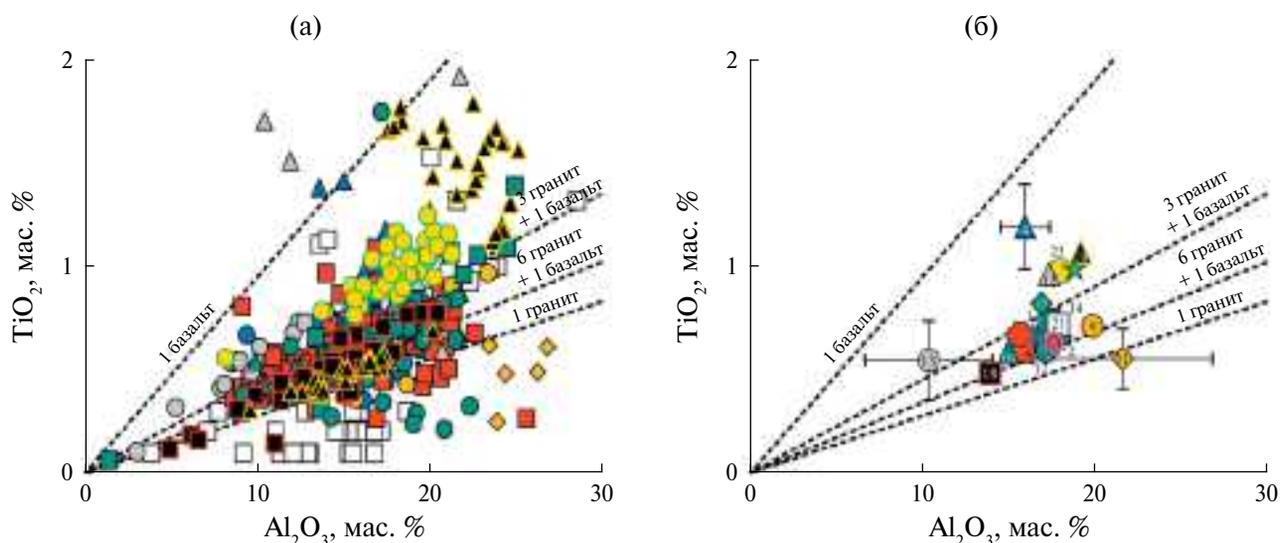


Рис. 9. Распределение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород различных объектов на диаграмме Al_2O_3 – TiO_2 . Условные обозначения см. рис. 4 и 7.

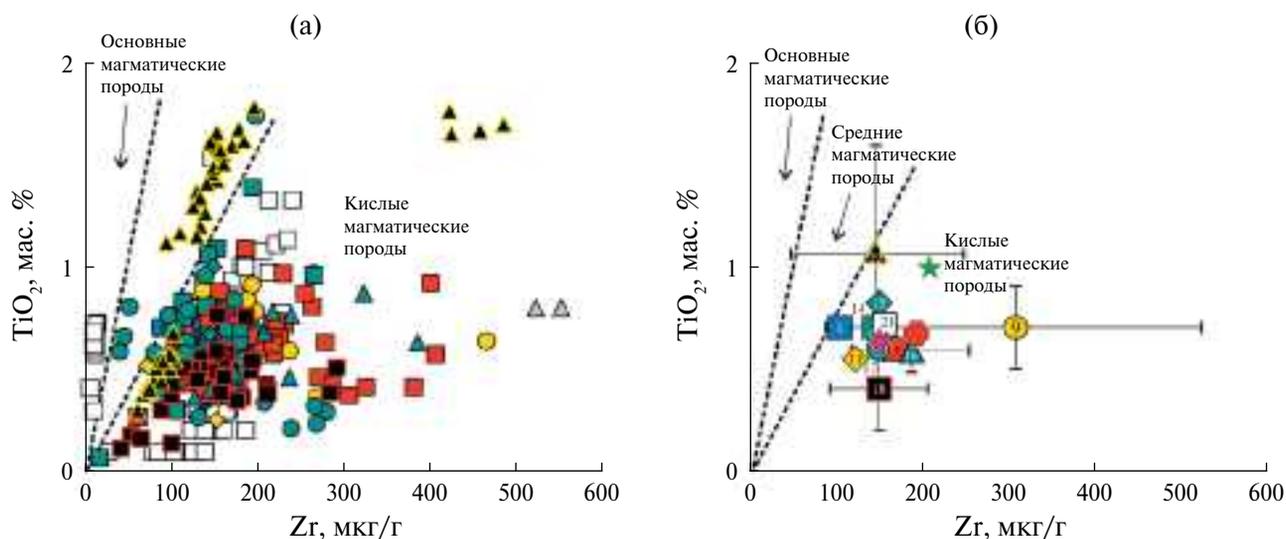


Рис. 10. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород различных объектов на диаграмме Zr – TiO_2 . Условные обозначения см. рис. 4 и 7.

представляют метакластиты объекта 12, для 12-ти из 14-ти образцов которых величина Zr/Sc составляет от 84 до 1900 и более ($Zr/Sc_{\text{среднее}} = 576$, см. рис. 8б). К категории тонкозернистых обломочных пород эти образования отнесены нами на основе двух параметров – содержание оксида кремния в подавляющем большинстве образцов составляет от ~ 49 до ~ 66 мас. %, а содержание оксида алюминия варьирует от ~ 16 до ~ 22 мас. %. Весьма значительные величины Zr/Sc в данном случае дают основание считать, что тонкозернистые обломочные породы сложены в основном

переотложенным осадочным материалом. Следует также иметь в виду, что на диаграмме K_2O/Na_2O – SiO_2/Al_2O_3 фигуративные точки тонкозернистых обломочных пород объекта 12 (как индивидуальные, так и усредненная), расположены в области значений K_2O/Na_2O , характерных для пород, которые могли испытать влияние К-метасоматоза. Отметим, однако, что на большинстве представленных в данной работе дискриминантных диаграмм усредненная точка состава тонкозернистых обломочных пород объекта 12 расположена в одних и тех же полях, что и точки других

объектов. Это предполагает, что данный объект по ряду параметров, кроме высоких значений Zr/Sc , не отличается каким-то кардинальным образом от других. В целом распределение фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород на диаграмме $Zr/Sc-Th/Sc$ позволяет видеть вклад в их состав как продуктов разрушения основных (например, объект 21), так и кислых (например, объект 9) магматических и метаморфических образований.

Основная часть индивидуальных точек состава глинистых пород на диаграмме $Al_2O_3-TiO_2$ [McLennan et al., 19796] сосредоточена в области трендов, отвечающих соотношениям Гранит : Базальт от 3 : 1 до 1 : 0 (см. рис. 9а). В этой же области расположены точки UCC и среднего архейского аргиллита. Точка PAAS, напротив, расположена между трендами, характерными для продуктов разрушения: а) собственно базальтов и б) смеси гранита и базальта в соотношении 3 : 1. Весьма близким к PAAS соотношением средних содержаний оксидов алюминия и титана характеризуются глинистые породы объектов 12, 19 и 23. Для части объектов из нашего банка данных наблюдается яркая кластеризация индивидуальных точек состава тонкозернистых обломочных пород (например, объекты 19 и 21). В случае усредненных точек указанная особенность, как и следовало ожидать, микшируется (см. рис. 9б).

Кластеризация индивидуальных точек состава глинистых пород ряда объектов наблюдается и на диаграмме $Zr-TiO_2$ [Hayashi et al., 1977]

(см. рис. 10а). Как и в случае выше, это особенно характерно для тонкозернистых обломочных пород объектов 19 и 21. Основная же масса индивидуальных фигуративных точек сосредоточена на рассматриваемом графике в поле составов, характерных для кислых магматических пород. Это дает основание предполагать, что глинистые породы, входящие в состав перекрывающих фундамент осадочных последовательностей разного возраста, сложены продуктами разрушения достаточно зрелых субстратов. Усредненные точки состава глинистых пород из нашего банка данных образуют на данном графике достаточно компактный кластер, тяготеющий к точкам UCC и среднего архейского аргиллита (см. рис. 10б). Не входят в него только усредненные точки глинистых пород объектов 9 и 19. Отдельно от указанного кластера расположена здесь и точка PAAS.

На диаграмме $Sc-Th/Sc$ [Taylor, McLennan, 1985 и ссылки там] преобладающая часть индивидуальных точек состава тонкозернистых обломочных пород расположена в области смешения продуктов разрушения как основных и кислых магматических пород, так и пород ТТГ-ассоциации. Иначе распределены на этом графике точки глинистых пород объектов 1 и 21 (рис. 11а). Усредненные точки подавляющего числа объектов из нашего банка данных образуют на графике $Sc-Th/Sc$ компактный кластер, в состав которого не входят только точки объектов 9 и 21 (см. рис. 11б). Содержание Sc и значения отношения Th/Sc , свойственные таким объектам, как UCC и PAAS, также помещают их вблизи

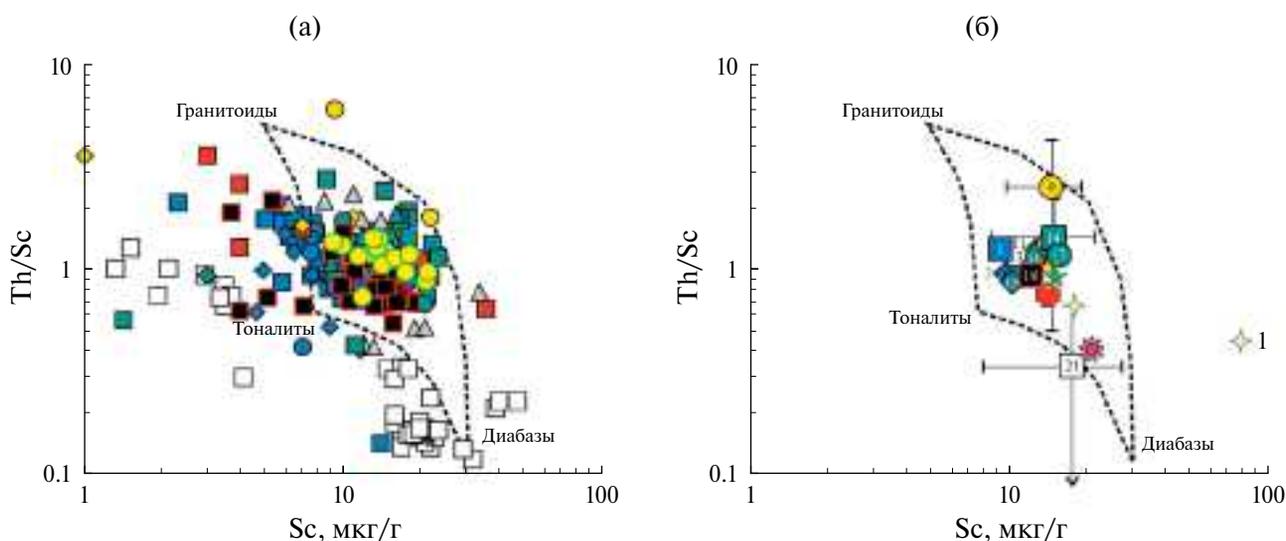


Рис. 11. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) точек состава тонкозернистых обломочных пород различных объектов на диаграмме $Sc-Th/Sc$.

1 – референтная точка SSWR. Остальные условные обозначения см. рис. 4 и 7.

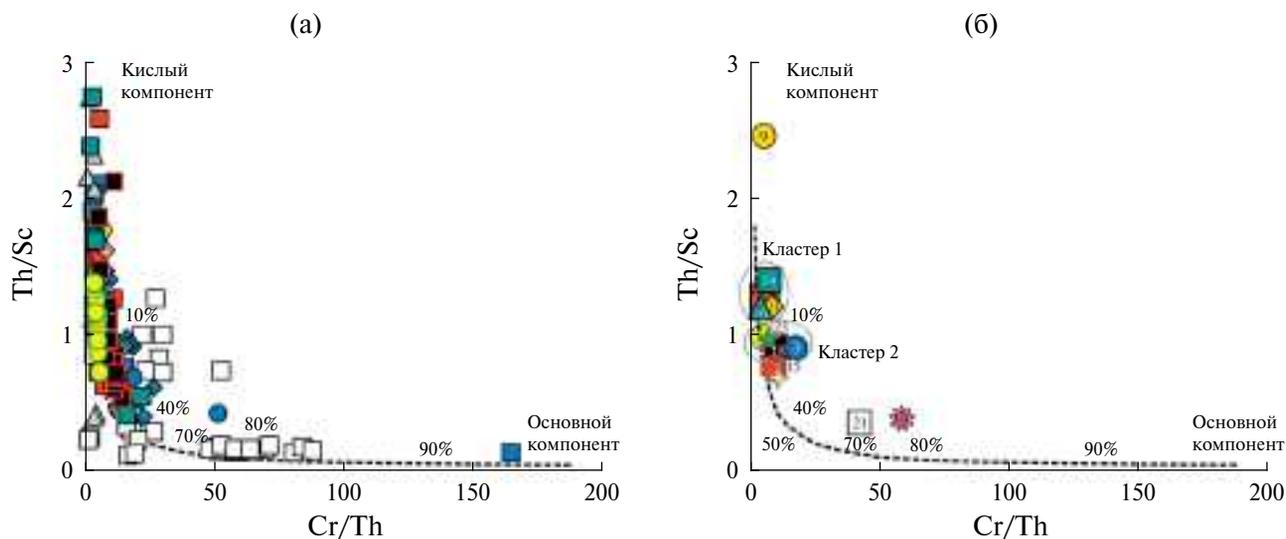


Рис. 12. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород различных объектов на диаграмме Cr/Th–Th/Sc. Условные обозначения см. рис. 4 и 11.

указанного кластера. Иное положение на данной диаграмме характерно для точек среднего архейского аргиллита (к этой точке весьма близка усредненная точка глинистых пород объекта 21) и SSWR.

Распределение индивидуальных фигуративных точек глинистых пород на диаграмме Cr/Th–Th/Sc [Condie, Wronkiewicz, 1990; Bracciali et al., 2007] позволяет сделать вывод, что глинистые породы, входящие в состав перекрывающих фундамент осадочных толщ, различного возраста, содержат, как правило, менее 40% продуктов размыва основных магматических образований (рис. 12а). Только в составе части тонкозернистых обломочных пород объекта 21 можно предполагать присутствие заметно большей (или даже доминирующей) доли основной алюмосиликокластики. Анализ распределения на графике Cr/Th–Th/Sc усредненных точек состава глинистых пород различных объектов из нашего банка данных позволяет видеть два своеобразных “конечных члена” – объект 9, в породах которого, по-видимому, доминируют продукты размыва кислых магматических пород, и объект 21, в составе которого значительную долю составляют продукты эрозии основных магматических образований (см. рис. 12б). Рядом с усредненной точкой объекта 21 расположена и точка среднего архейского аргиллита. Усредненные точки других объектов образуют на диаграмме Cr/Th–Th/Sc два кластера. В первый входят объекты 1, 5, 11, 12, 14 и 16. Во второй – объекты 2, 3, 15, 18 и 23. К этому кластеру тяготеют также точки PAAS, UCC и SSWR.

Доля продуктов размыва основных магматических пород в составе глинистых пород объектов первого кластера составляет <10%. В составе тонкозернистых обломочных пород объектов, образующих второй кластер, она увеличивается до 15–30%. Таким образом, и на данной диаграмме хорошо видно, что в составе тонкозернистых обломочных пород, слагающих перекрывающие фундамент осадочные последовательности, преобладают продукты разрушения геохимически достаточно зрелых субстратов.

Вместе с тем, исходя из положения и индивидуальных и усредненных точек состава глинистых пород различных объектов на графике ICV–CIA¹ [Potter et al., 2005], можно прийти к иному выводу (рис. 13). Подавляющее большинство фигуративных точек тяготеет здесь к линии тренда, берущей начало у референтных точек среднего базальта палеопротерозоя и UCC, но не у точки среднего архейского гранита. Кроме того, подавляющее большинство индивидуальных точек тонкозернистых обломочных пород характеризуется значениями ICV <1, что, вполне вероятно, предполагает присутствие в их составе значительной доли глинистых минералов и продуктов их трансформации. Значительная доля фигуративных точек на

¹ ICV = $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2)/\text{Al}_2\text{O}_3$, рассчитывается по мас. %. CIA = $100 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$, рассчитывается по молекулярным количествам оксидов, CaO* – количество оксида кальция в силикатной матрице породы. При построении диаграммы ICV–CIA использованы преимущественно анализы, отвечающие следующим критериям: п.п.п. <5 мас. %, CaO <1 мас. %, Al₂O₃ >14 мас. %.

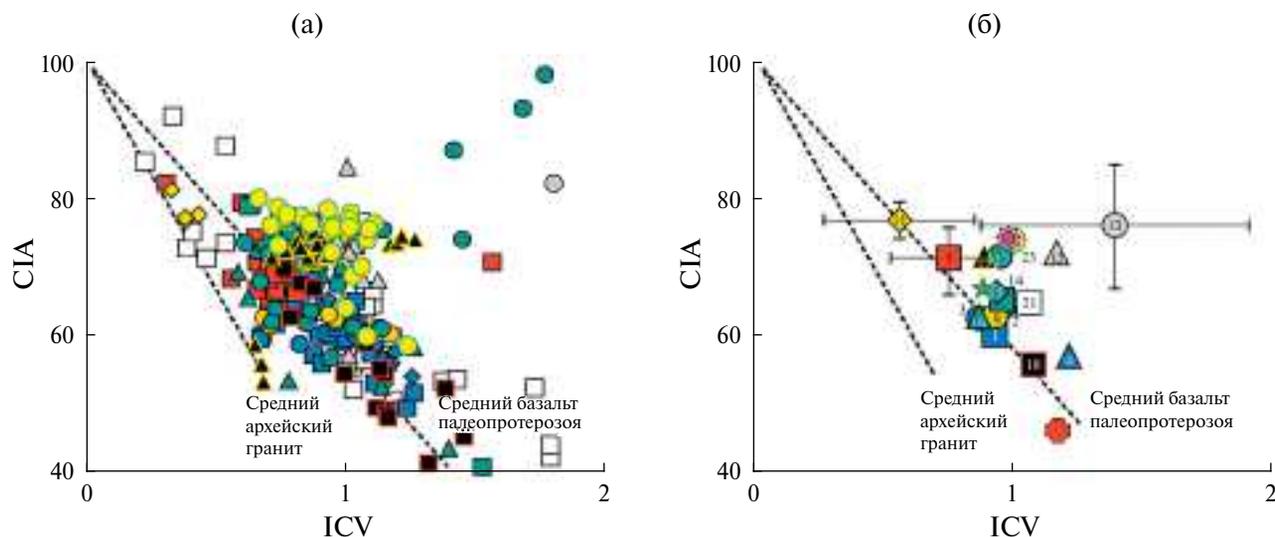


Рис. 13. Локализация индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород различных объектов на диаграмме ICV–CIA. Условные обозначения см. рис. 4 и 7.

данном графике отвечает также значениям CIA от 60 до 80, свойственных широкому спектру современных климатических обстановок (с умеренным климатом и относительно слабо проявленным химическим выветриванием до явно выраженных гумидных, с достаточно интенсивным химическим выветриванием [McLennan, 1993]). Положение усредненной точки глинистых пород валдайской серии северо-востока Балтийской моноклинали (объект 23) здесь почти такое же, как и точки среднего архейского аргиллита.

Обратимся теперь к рассмотрению положения точек состава глинистых пород представленных в нашем банке данных объектов на диаграмме $F1-F2^2$ [Roser, Korsch, 1988], использующей для реконструкции состава материнских пород не содержание или отношение каких-либо редких и рассеянных элементов, а дискриминантные функции (при ее построении учтены только образцы тонкозернистых обломочных пород с величиной потерь при прокаливании (п.п.п.) < 5 мас. %). Подавляющее большинство индивидуальных и усредненных точек состава глинистых пород, слагающих осадочные толщи, непосредственно перекрывающие породы кристаллического фундамента разного возраста в разных регионах, расположено на ней в полях кислых магматических и осадочных пород (рис. 14). Некоторая часть индивидуальных точек

представлена в полях и средних, и основных магматических пород, но, как правило, это не все точки, принадлежащие какому-либо из объектов. Точки усредненных составов в поле основных магматических пород вообще не попадают, в поле пород среднего состава попали точки объектов 19 и 21 (для которых в целом характерны большие величины стандартных отклонений), а в поле кислых магматических пород — точки объектов 9 и 11.

Диаграмма $DF1-DF2^3$ [Verma, Armstrong-Altrin, 2013], базирующаяся на использовании дискриминантных функций, также применяется для реконструкции палеогеодинамических обстановок формирования осадочных последовательностей широкого возрастного диапазона. Так как в подавляющем большинстве тонкозернистых обломочных пород нашего банка данных содержание SiO_2 не превышает 66–67 мас. %, далее обсуждается положение фигуративных точек на низкокремнистой ($35 < SiO_2 < 63$ мас. %) версии диаграммы $DF1-DF2$. Еще одним ограничением являлось использование только составов с величиной п.п.п. < 5 мас. %. Залегающие под исследуемыми

² $F1 = -1.773 \cdot TiO_2 + 0.607 \cdot Al_2O_3 + 0.76 \cdot Fe_2O_3^* - 1.5 \cdot MgO + 0.616 \cdot CaO + 0.509 \cdot Na_2O - 1.224 \cdot K_2O - 9.09$; $F2 = 0.445 \cdot TiO_2 + 0.07 \cdot Al_2O_3 - 0.25 \cdot Fe_2O_3^* - 1.142 \cdot MgO + 0.438 \cdot CaO + 1.475 \cdot Na_2O + 1.426 \cdot K_2O - 6.861$.

³ $DF1 = 0.608 \cdot \ln(TiO_2/SiO_2) - 1.854 \cdot \ln(Al_2O_3/SiO_2) + 0.299 \cdot \ln(Fe_2O_3^*/SiO_2) - 0.55 \cdot \ln(MnO/SiO_2) + 0.12 \cdot \ln(MgO/SiO_2) + 0.194 \cdot \ln(CaO/SiO_2) - 1.51 \cdot \ln(Na_2O/SiO_2) + 1.941 \cdot \ln(K_2O/SiO_2) + 0.003 \cdot \ln(P_2O_5/SiO_2) - 0.294$; $DF2 = -0.554 \cdot \ln(TiO_2/SiO_2) - 0.995 \cdot \ln(Al_2O_3/SiO_2) + 1.765 \cdot \ln(Fe_2O_3^*/SiO_2) - 1.391 \cdot \ln(MnO/SiO_2) - 1.034 \cdot \ln(MgO/SiO_2) + 0.225 \cdot \ln(CaO/SiO_2) + 0.713 \cdot \ln(Na_2O/SiO_2) + 0.33 \cdot \ln(K_2O/SiO_2) + 0.637 \cdot \ln(P_2O_5/SiO_2) - 3.631$. 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 диаграмме [Маслов и др., 2018].

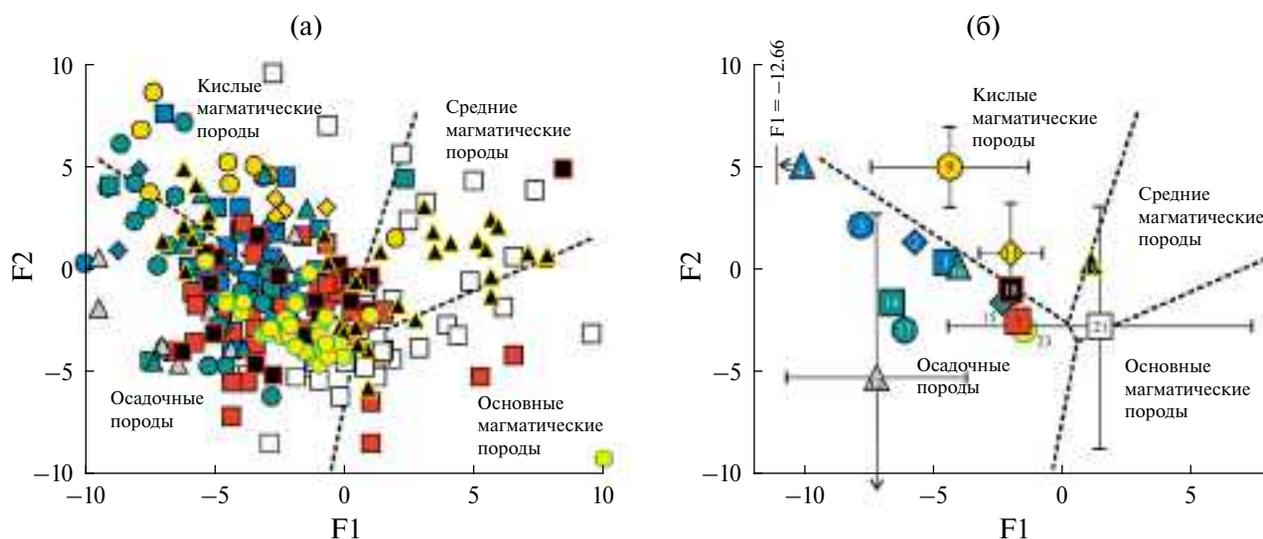


Рис. 14. Локализация индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород различных объектов на диаграмме F1–F2 (формулы дискриминантных функций см. в тексте). Условные обозначения см. рис. 4 и 7.

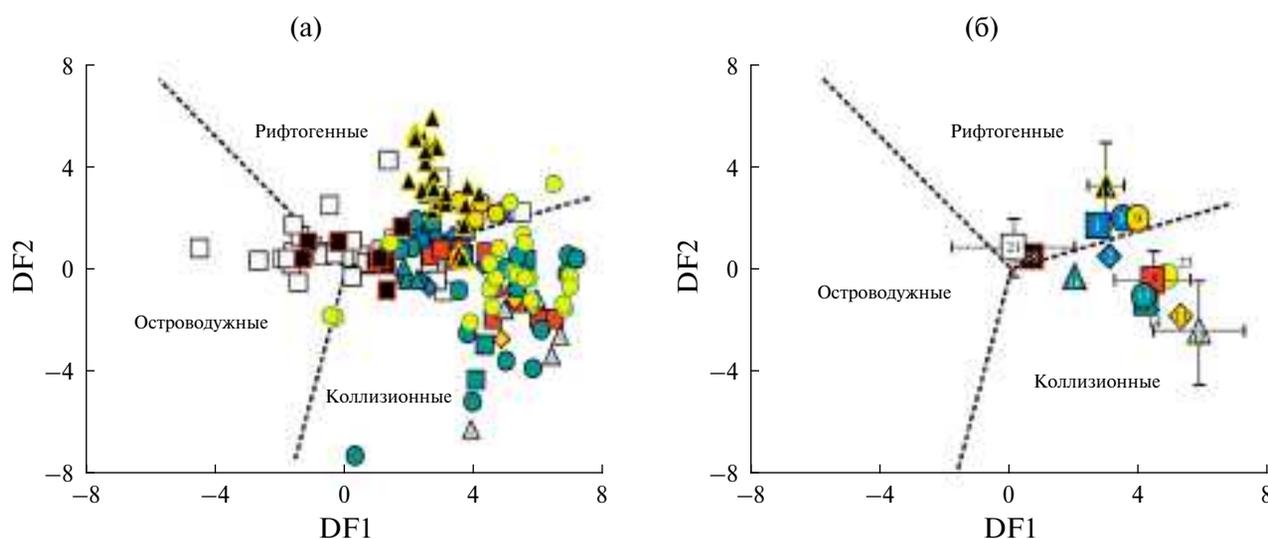


Рис. 15. Положение индивидуальных (а) и усредненных (б) фигуративных точек тонкозернистых обломочных пород различных объектов на низкокремнистой диаграмме DF1–DF2 (формулы дискриминантных функций см. в тексте). Условные обозначения см. рис. 4 и 7.

осадочными последовательностями комплексы фундамента сформировались в результате различных коллизионных событий, которые привели к их кратонизации. Как было подчеркнуто в монографии [Геологическая..., 2021], рост коры в конце архея, по-видимому, протекал преимущественно в зонах орогенеза (события 2.6, 2.56, 2.5, 2.48, 2.47 млрд лет). Следующий ярко выраженный пик корообразования зафиксирован ~1.87 млрд лет назад. С ним связано появление суперконтинента Нуна/Колумбия, с периодом сборки которого совпадает формирование коллизионных

орогенов, установленных во многих докембрийских кратонах. Поэтому мы вправе ожидать, что продукты размыва пород кристаллического фундамента на указанной диаграмме в основном попадут в поле составов коллизионных обстановок, однако далеко не всегда это так.

Индивидуальные фигуративные точки глинистых пород присутствуют во всех трех полях диаграммы DF1–DF2 – рифтогенных, островодужных и коллизионных обстановок (рис. 15а). Например, точки объектов 18 и 21 можно увидеть во

всех перечисленных полях, а усредненные составы глинистых пород этих объектов располагаются у точки смыкания указанных полей (см. рис. 15б), что приводит к невозможности каких-либо суждений о “геодинамической” природе слагающей их тонкой алюмосиликокластики. Индивидуальные точки глинистых пород объектов 2, 17 и 19 локализованы в полях, характерных для составов как рифтогенной, так и коллизионной обстановок, хотя усредненные точки первых двух объектов располагаются в пределах коллизионного поля. Для остальных объектов характер распределения индивидуальных точек глинистых пород не отличается от распределения точек с усредненными составами. В поле рифтогенных обстановок попадают усредненные точки объектов 1 и 9, а в поле коллизионных обстановок – объектов 5, 11, 12, 14, 16, 17, 23.

ВЫВОДЫ

По результатам анализа валового химического состава тонкозернистых обломочных и глинистых пород, которые слагают протерозойские осадочные последовательности, несогласно перекрывающие фундамент, можно сделать ряд выводов.

Во-первых, в исходном составе глинистых пород преобладали смектит и иллит, в отдельных случаях с некоторой долей хлорита, каолинита и тонкорастертого КПШ. Присутствие последнего и/или влияние процессов К-метасоматоза невозможно разделить, признаки переработки такими процессами можно предполагать для ряда объектов, но в целом рассматриваемые образования по своему составу принципиально не отличаются от PAAS.

Во-вторых, среди источников слагающей исследованные глинистые породы тонкой алюмосиликокластики, как следует из распределения индивидуальных и усредненных фигуративных точек различных объектов на диаграммах $Al_2O_3-TiO_2$, $Zr-TiO_2$ и $Cr/Th-Th/Sc$, роль магматических пород основного состава была относительно невелика. Однако распределение точек состава на диаграммах ICV-CIA и F1-F2 позволяет считать, что породы основного состава или осадочные образования играли существенную роль среди источников обломочного материала. Возможно, не все использованные нами дискриминантные диаграммы позволяют получить согласующиеся выводы, и в будущем это следует иметь в виду.

В-третьих, реконструируемая с помощью диаграммы DF1-DF2 палеогеодинамическая природа тонкой алюмосиликокластики, слагающей

осадочные последовательности, которые с несогласием перекрывают породы кристаллического фундамента, предполагает формирование этих последовательностей в результате различных орогенных и рифтогенных событий. Оценить, как это согласуется с конкретной геологической ситуацией для каждого из проанализированных объектов – задача будущих исследований. Ранее мы уже отмечали, что использование как низко-, так и высокременистого вариантов диаграммы DF1-DF2 позволяет установить геодинамическую природу осадочных последовательностей лишь с определенной долей условности [Маслов и др., 2016].

В целом, исходя из результатов анализа всего приведенного выше материала, можно прийти к общему выводу о том, что глинистых пород с какими-то специфическими характеристиками валового химического состава в осадочных последовательностях протерозоя, перекрывающих фундамент, 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), 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.
- Белоконь Т.В., Горбачев В.И., Балашова М.М.* Строение и нефтегазоносность рифейско-вендских отложений востока Русской платформы. Пермь: ИПК “Звезда”, 2001. 108 с.
- 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.
- Величкин В.И.* Особенности металлогении ураноносных областей. М.: Энергоатомиздат, 1983. 199 с.
- Геологическая эволюция Земли: от космической пыли до обители человечества / Отв. ред. Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2021. 327 с.

- Горошко М.В., Гурьянов В.А. Мезо-неопротерозойские комплексы чехла юго-востока Сибирской платформы: условия образования и основные черты тектоники // Геотектоника. 2008. № 2. С. 80–96.
- 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.
- Карсаков Л.П., Гурьянов В.А., Горошко М.В. Стратиграфия нижних горизонтов гипостратотипа рифея (юго-восток Сибирской платформы) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2002. Т. 10. № 1. С. 47–61.
- Комар Вл.А. Строматолиты верхнекембрийских отложений севера Сибирской платформы и их стратиграфическое значение. М.: Наука, 1966. 122 с.
- Комарницкий Г.М., Меньшиков Г.С., Петров Ю.М. К вопросу о месторождениях урана "типа несогласия" на Енисейском крае // Геология и геохимия урановых провинций Сибири. Вып. 5. Новосибирск: ИГГ СО АН СССР, 1987. С. 122–136.
- Краснобаев А.А., Козлов В.И., Пучков В.Н. и др. Цирконология навышских вулканитов айской свиты и проблема возраста нижней границы рифея на Южном Урале // Докл. АН. 2013. Т. 448. № 4. С. 437–442.
- Купцова А.В., Худoley А.К. Тектоника докембрийских ураноносных бассейнов // Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики. Материалы ЛП Тектонического совещания. Т. 1. М.: ГЕОС, 2020. С. 371–374.
- Купцова А.В., Худoley А.К., Дэвис В. и др. Возраст и источники сноса песчаников приозерской и салминской свит рифея в восточном борту Пашско-Ладожского бассейна (южная окраина Балтийского щита) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2011а. Т. 19. № 2. С. 3–19.
- Купцова 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. 2011б. Вып. 1. С. 17–31.
- Ленных В.И., Петров В.И. Стратиграфия айской свиты и проблема ее возраста // Вулканизм, метаморфизм и железистые кварциты обрамления Тараташского комплекса / Отв. ред. В.И. Ленных, А.И. Белковский. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1978. С. 33–43.
- 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. Пермь: ПГНИУ, ГИ УрО РАН, 2018. С. 153–161.
- Маслов А.В., Гареев Э.З., Крупенин М.Т., Демчук И.Г. Тонкая алюмосиликокластика в верхнекембрийском разрезе Башкирского мегантиклинория (к реконструкции условий формирования). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1999. 324 с.
- Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Крамчанинов А.Ю. и др. Источники сноса верхнекембрийских глинистых пород Южного Урала: результаты геохимических и Sm-Nd изотопно-геохимических исследований // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2022. Т. 30. № 1. С. 33–54.
- 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., Мизенс Г.А. и др. Дискриминантные палеогеодинамические диаграммы для терригенных пород: опыт сопоставления // Геохимия. 2016. № 7. С. 579–595.
- Михайлов В.А., Афанасьева Е.Н., Миронов Ю.Б., Кушнеренко Е.К. Перспективы промышленной ураноносности Российской части Балтийского щита // Материалы по геологии месторождений урана, редких и редкоземельных металлов. Вып. 146. М.: ВИМС, 2004. С. 5–11.
- Молчанов А.В., Мишенин С.Г., Проскурин В.Ф., Лазарев Ф.Д. Перспективы промышленной ураноносности выступов древнего основания Сибирской платформы и её 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.
- Нижняя граница рифея и строматолиты афебия / Отв. ред. Келлер Б.М. М.: Наука, 1978. 198 с.
- 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.
- Подковыров В.Н., Маслов А.В., Кузнецов А.Б., Ершова В.Б. Литостратиграфия и геохимия отложений верхнего венда–нижнего кембрия северо-востока Балтийской моноклинали // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2017. Т. 25. № 1. С. 3–23.
- 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.
- Пэк А.А., Мальковский В.И., Петров В.А. О формировании уникально богатых руд урановых месторождений несогласия бассейна Атабаска (Канада): гипотеза многоэтапного телескопированного отложения руд // Геология рудных месторождений. 2022. Т. 64. № 1. С. 73–92.
- Семихатов М.А. Стратиграфия и геохронология протерозоя. М.: Наука, 1974. 302 с.
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Маслов А.В. и др. Стратотип нижнего рифея – бурзянская серия Южного Урала: литостратиграфия, палеонтология, геохронология, Sr- и С-изотопные характеристики карбонатных пород // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2009. Т. 17. № 6. С. 17–45.
- 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.

- Семихатов М.А., Серебряков С.Н. Сибирский гипостратотип рифея. М.: Наука, 1983. 224 с.
- Сергеева Н.Д., Пучков В.Н., Карасева Т.В. Верхний протерозой (рифей и венд) Волго-Уральской области в параметрических и глубоких скважинах. Уфа: Книга-Принт, 2021. 196 с.
- Ситчихин О.В. Строение и нефтегазоносность рифейских пород северо-востока Волго-Уральского бассейна (Пермский край) // Нефтегазовое дело. 2009. № 1. https://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Sitchikhin/Sitchikhin_1.pdf (дата обращения 29.08.2024)
- Стратиграфический кодекс России. СПб.: ВСЕГЕИ, 2019. 96 с.
- Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Рифей и венд Сибирской платформы и ее складчатого обрамления / Отв. ред. Н.В. Мельников. Новосибирск: Гео, 2005. 428 с.
- Стратотип рифея. Стратиграфия. Геохронология / Отв. ред. Б.М. Келлер, Н.М. Чумаков. М.: Наука, 1983. 184 с.
- Тевелев Ал.В., Кошелева И.А., Тевелев Арк.В. и др. Новые данные об изотопном возрасте тараташского и александровского метаморфических комплексов (Южный Урал) // Вестник Московского университета. Сер. 4. Геология. 2015. № 1. С. 27–42.
- 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.
- Шумилин М.В. Урановые месторождения “несогласия”. Перспективы открытия в России // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2011. № 5. С. 70–75.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
- Янакурт О.В. Предметаморфические изменения осадочных пород в стратифере: Процессы и факторы. М.: ГЕОС, 1999. 260 с.
- Absar N., Nizamudheen B.M., Sminto A. Petrography, clay mineralogy and geochemistry of clastic sediments of Proterozoic Bhima Group, Eastern Dharwar craton, India: implications for provenance and tectonic setting // J. Appl. Geochem. 2016. V. 18. P. 237–250.
- Absar N., Raза M., Roy M. et al. Composition and weathering conditions of Paleoproterozoic upper crust of Bundelkhand craton, Central India: Records from geochemistry of clastic sediments of 1.9 Ga Gwalior Group // Precambrian Res. 2009. V. 168. P. 313–329.
- Agbenyezi T.K., Foli G., Brako B.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 provenance and weathering history // Arab. J. Geosci. 2015. V. 8. P. 1977–1991.
- Alexandre P. Geochemistry of the Athabasca basin, Saskatchewan, Canada, and the unconformity-related uranium deposits hosted by it // Can. Mineral. 2020. V. 58. P. 1–22.
- Al-Hashim M.H. Sedimentology and geochemistry of the mixed carbonatesiliciclastic Espanola Formation, Paleoproterozoic Huronian Supergroup, Bruce Mines-Elliot Lake Area, Ontario, Canada / A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Doctor of Philosophy degree in Geology. University of Western Ontario, Canada. 2016. 287 p. Electronic Thesis and Dissertation Repository. 4350. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/4350>
- Anderson H.E., Davis W.D. U–Pb geochronology of the Moyie sills, Purcell Supergroup, southeastern British Columbia: implications for the Mesoproterozoic geological history of the Purcell (Belt) basin // Can. J. Earth Sci. 1995. V. 32. P. 1180–1193.
- Armstrong R.L. The persistent myth of crustal growth // Austr. J. Earth Sci. 1991. V. 38. P. 613–630.
- Asiedu D.K., Agoe M., Amponsah P.O. et al. Geochemical constraints on provenance and source area weathering of metasedimentary rocks from the Paleoproterozoic (~2.1 Ga) Wa-Lawra Belt, southeastern margin of the West African Craton // Geodinamica Acta. 2019. V. 31. P. 27–39.
- Asiedu D., Asong S., Atta-Peters D. et al. Geochemical and Nd-isotopic compositions of juvenile-type Paleoproterozoic Birimian sedimentary rocks from southeastern West African Craton (Ghana): constraints on provenance and tectonic setting // Precambrian Res. 2017. V. 300. P. 40–52.
- Asiedu D.K., Dampare S.B., Sakyi P.A. et al. Geochemistry of Paleoproterozoic metasedimentary rocks from the Birim diamondiferous field, southern Ghana: Implications for provenance and crustal evolution at the Archean-Proterozoic boundary // Geochem. J. 2004. V. 38. P. 215–228.
- Bleeker W. The Late Archean record: a puzzle in ca. 35 pieces // Lithos. 2003. V. 71. P. 99–134.
- Bolnar R., Kamber B.S., Moorbath S. et al. Chemical characterization of earth’s most ancient clastic metasediments from the Isua Greenstone Belt, southern West Greenland // Geochim. Cosmochim. Acta. 2005. V. 69. P. 1555–1573.
- Braccialli L., Marroni M., Pandolfi L., Rocchi S. Geochemistry and petrography of Western Tethys Cretaceous sedimentary covers (Corsica and Northern Apennines): from source areas to configuration of margins // Sedimentary Provenance and Petrogenesis: Perspectives from Petrography and Geochemistry / Eds J. Arribas, S. Critelli, M.J. Johnsson // Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 2007. V. 420. P. 73–93.
- Chi G., Li Z., Chu H., Bethune K.M. et al. A shallow-burial mineralization model for the unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin // Econ. Geol. 2018. V. 113. P. 1209–1217.
- Condie K.C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chem. Geol. 1993. V. 104. P. 1–37.
- Condie K.C. Episodic continental growth and supercontinents: a mantle avalanche connection? // Earth Planet. Sci. Lett. 1998. V. 163. P. 97–108.
- 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. P. 256–267.

- Connelly J.N., Ryan B.* Late Archean evolution of the Nain Province, Nain, Labrador: imprint of a collision // *Can. J. Earth Sci.* 1996. V. 33. P. 1325–1342.
- Crichton J.G., Condie K.C.* Trace elements as source indicators in cratonic sediments: A case study from the Early Proterozoic Libby Creek Group, Southeastern Wyoming // *J. Geol.* 1993. V. 101. P. 319–332.
- Dar S.A., Khan K.F., Khan S.A. et al.* Petro-mineralogical studies of the Paleoproterozoic phosphorites in the Sonrai basin, Lalitpur District, Uttar Pradesh, India // *Nat. Resources Res.* 2015. V. 24. P. 339–348.
- Dar S.A., Khan K.F., Mir A.R.* Provenance and paleo-weathering of Paleoproterozoic siliciclastic sedimentary rocks of Bijawar Group, Sonrai Basin, Uttar Pradesh, India: using a geochemical approach // *J. Sediment. Environ.* 2020. V. 5. P. 399–413.
<https://doi.org/10.1007/s43217-020-00024-5>
- Delaney G.D.* The Mid-Proterozoic Wernecke Supergroup, Wernecke Mountains, Yukon Territory // *Proterozoic basins of Canada* / Ed. F.H.A. Campbell // *Geol. Surv. Canada Paper* 8110. 1981. P. 1–23.
- Ershova V.B., Ivleva A.S., Podkovyrov V.N. et al.* Detrital zircon record of the Mesoproterozoic to Lower Cambrian sequences of NW Russia: implications for the paleogeography of the Baltic interior // *GFF.* 2019. V. 141(4). P. 279–288.
- Evans K.V., Aleinikoff J.N., Obradovich J.D., Fanning C.M.* SHRIMP U-Pb geochronology of volcanic rocks, Belt Supergroup, western Montana: evidence for rapid deposition of sedimentary strata // *Can. J. Earth Sci.* 2000. V. 37. P. 1287–1300.
- Ewers G.R.* Chemical analyses of Early Proterozoic metasedimentary rocks from the Pine Creek Geosyncline // *Aust. Bur. Miner. Resour. Geol. Geophys.* 1982. Rec. 1982/17. 53 p.
- Ewers G.R., Higgins N.C.* Geochemistry of the early Proterozoic metasedimentary rocks of the Alligator Rivers Region, Northern Territory, Australia // *Precambrian Res.* 1985. V. 29. P. 331–357.
- Ewers G.R., Needham R.S., Stuart-Smith P.G., Crick I.H.* Geochemistry of the low-grade Early Proterozoic sedimentary sequence in the Pine Creek Geosyncline, Northern Territory // *Austr. J. Earth Sci.* 1985. V. 32. P. 137–154.
- Fedo C.M., Young G.M., Nesbitt H.W., Hanchar J.M.* Potassic and sodic metasomatism in the Southern Province of the Canadian Shield: evidence from the Paleoproterozoic Serpent Formation, Huronian Supergroup, Canada // *Precambrian Res.* 1997. V. 84. P. 17–36.
- Ferguson J., Winer P.* Pine Creek Geosyncline: Statistical treatment of whole rock chemical data // *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. 191–208.
- Folk R.L.* Petrology of sedimentary rocks. Austin: Hemphill Publishing Co., 1974. 170 p.
- Furlanetto F.* The evolution of the late Paleoproterozoic Wernecke Supergroup, Wernecke Mountains, Yukon, from sedimentation to deformation // Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. Simon Fraser University, British Columbia, Canada. 2015. 235 p.
- Furlanetto F., Thorkelson D.J., Gibson H.D. et al.* Late Paleoproterozoic terrane accretion in northwestern Canada and the case for circum-Columbian orogenesis // *Precambrian Res.* 2013. V. 224. P. 512–528.
- Geologic Time Scale 2020* / Eds F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg. Amsterdam: Elsevier, 2020. V. 1. 561 p.
- Geological Classification of Uranium Deposits and Description of Selected Examples.* IAEA TECDOC-1842. Vienna: IAEA, 2018. 417 p.
- Giri R.K., Chalapathi Rao N.V., Rahaman W. et al.* Paleoproterozoic calc-alkaline lamprophyres from the Sidhi Gneissic complex, India: Implications for plate tectonic evolution of the Central Indian Tectonic Zone // *Precambrian Res.* 2021. V. 362. 106316.
- 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.
- Hiatt E.E., Kyser K., Fayek M. et al.* Early quartz cements and evolution of paleohydraulic properties of basal sandstones in three Paleoproterozoic continental basins: evidence from in situ $\delta^{18}\text{O}$ analyses of quartz cements // *Chem. Geol.* 2007. V. 238. P. 19–37.
- 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.
- Hu G.H., Zhou Y.Y., Zhao T.P.* Geochemistry of Proterozoic Wufoshan Group sedimentary rocks in the Songshan area, Henan Province: Implication for provenance and tectonic setting // *Acta Petrologica Sinica.* 2012. V. 28. P. 3692–3704 (in Chinese with English abstract).
- 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.
- Isley A.E., Abbott D.H.* Implications of the temporal distribution of high-Mg magmas for mantle plume volcanism through time // *J. Geol.* 2002. V. 110. P. 141–158.
- Isozaki Y., Poldvere A., Bauert H. et al.* Provenance shift in Cambrian mid-Baltica: detrital zircon chronology of Ediacaran-Cambrian sandstones in Estonia // *Estonian J. Earth Sci.* 2014. V. 63. P. 251–256.
- Jayananda M., Moyen J.-F., Martin H. et al.* Late Archean (2550–2520 Ma) juvenile Magmatism in the Eastern Dharwar craton, southern India: constraints from geochronology, Nd–Sr isotopes and whole rock geochemistry // *Precambrian Res.* 2000. V. 99. P. 225–254.
- Jayaram S., Venkatasubramaniam V.S., Radhakrishna B.P.* Geochronology and trace element distribution in some tonalitic and granitic gneisses of the Dharwar craton, Precambrian of south India // *Proceedings of the Indo-US Workshop, Hyderabad* / Eds S.M. Naqvi, J.J.W. Rogers. *Mem. Geol. Soc. India.* 1983. V. 8. P. 377–389.
- 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. Special Publication 5. 2007. P. 273–305.
- Kale V.S., Mudholkar A.V., Phansalkar V.G., Pespwa V.V.* Stratigraphy of the Bhima Group // *J. Paleontol. Soc. India*. 1990. V. 35. P. 91–103.
- Karlstrom K.E., Flurkey A.J., Houston R.S.* Stratigraphy and depositional setting of the Proterozoic Snowy Pass Supergroup, southeastern Wyoming: record of an early Proterozoic Atlantic-type cratonic margin // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1983. V. 94. P. 1257–1274.
- Konate S.I., Bolarinwa A.T., Kwayisi D. et al.* Provenance and tectonic setting of greywacke and siltstone of the Nampala gold deposit, Southern Mali // *Appl. Earth Sci.* 2024. <https://doi.org/10.1177/25726838241263698>
- Kotzer T.G., Kyser T.K.* Petrogenesis of the Proterozoic Athabasca Basin, northern Saskatchewan, Canada, and its relation to diagenesis, hydrothermal uranium mineralization and paleohydrogeology // *Chem. Geol.* 1995. V. 120. P. 45–89.
- Krogh T.W., Davis D.W., Corfu G.* Precise U-Pb zircon and baddeleyite ages for the Sudbury area // *The geology and ore deposits of the Sudbury structure* / Eds E.G. Pye, A.J. Naldrett, P.E. Giblin // *Ontario Geol. Surv. Spec. V. 1*. 1984. P. 431–446.
- Leube A., Hirdes W., Mauer R., Kesse G.O.* The early Proterozoic Birimian Supergroup of Ghana and some aspects of its associated gold mineralization // *Precambrian Res.* 1990. V. 46. P. 139–165.
- Li Z., Jiang R., Cao G. et al.* Depositional age and provenance analysis of the Wufoshan Group in the southern North China Craton: Constraints from detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes // *Geological J.* 2021. V. 56. P. 5600–5620. <https://doi.org/10.1002/gj.4261>
- Liégeois J.P., Claessens W., Camara D., Klerkx J.* Short-lived Eburnean orogeny in southern Mali: geology, tectonics, U-Pb and Rb-Sr geochronology // *Precambrian Res.* 1991. V. 50. P. 111–136.
- Long D.G.F.* The stratigraphy and sedimentology of the Huronian (lower Apebian) Mississagi and Serpent Formations / Ph. D. thesis, University of Western Ontario. London, Ont. 1976. 291 p.
- Manu J., Asiedu D.K., Anani C.Y.* Geochemistry of Birimian phyllites from the Obuasi and Prestea Mines, Southwestern Ghana: Implications for provenance and source-area weathering // *Int. J. Basic and Applied Sci.* 2013. V. 2. P. 12–19.
- McLennan S.M.* Trace element geochemistry of sedimentary rocks: implications for the composition and evolution of the continental crust / Thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy. Australian National University. Canberra, Australia. 1981. 609 p.
- McLennan S.M.* Weathering and global denudation // *J. Geol.* 1993. V. 101. P. 295–303.
- McLennan S.M., Fryer B.J., Young G.M.* Rare earth elements in Huronian (Lower Proterozoic) sedimentary rocks: composition and evolution of the post-Kenoran upper crust // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1979a. V. 43. P. 375–388.
- 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.* 1979b. 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.* 284. 1993. P. 21–40.
- McLennan S.M., Taylor S.R.* Rare earth element mobility associated with uranium mineralization // *Nature*. 1979. V. 282(15). P. 247–250.
- Mohanty S.P.* Proterozoic basins of the Bundelkhand Craton, India: Correlations and significance in understanding the tectonic evolution // *Geosystems and Geoenvironment*. 2023. V. 2. 100155.
- Mueller P.A., Frost C.D.* The Wyoming Province: a distinctive Archean craton in Laurentian North America // *Can. J. Earth Sci.* 2006. V. 43. P. 1391–1397.
- Mueller P.A., Shuster R.D., Wooden J.L. et al.* Age and composition of Archean crystalline rocks from the southern Madison Range, Montana: Implications for crustal evolution in the Wyoming craton // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1993. V. 105. P. 437–446.
- 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.
- Needham R.S., Stuart-Smith P.G.* Geology of the Alligator rivers uranium field // *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. 233–257.
- Page R.W., Compston W., Needham R.S.* Geochronology and evolution of the late-Archaean basement and Proterozoic rocks in the Alligator Rivers Uranium Field, Northern Territory, Australia // *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. 39–68.
- Pagel M., Poty B., Sheppard S.M.F.* Contributions to some Saskatchewan uranium deposits mainly from fluid inclusion and isotopic data // *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. 639–654.
- Paikaray S., Banerjee S., Mukherji S.* Geochemistry of shales from the Paleoproterozoic to Neoproterozoic Vindhyan Supergroup: Implications on provenance, tectonics and paleoweathering // *J. Asian Earth Sci.* 2008. V. 32. P. 34–48.
- Pant A., Khan H.H., Sonakia A.* Phosphorite resources in the Bijawar Group of central India // *Phosphate deposits of the world. Phosphate rock resources* / Eds A.J.G. Noholt, R.P. Sheldon, D.F. Davidson. Cambridge: Cambridge University Press, 1989. P. 473–477.
- Percival J.A., Skulski T., Sanborn-Barrie M. et al.* Geology and tectonic evolution of the Superior Province, Canada. Chapter 6 // *Tectonic styles in Canada: the LITHOPROBE perspective* / Eds J.A. Percival, F.A. Cook, R.M. Clowes // *Geol. Ass. Canada. Spec. Pap.* 2012. V. 49. P. 321–378.

- Percival J.A., West G.F.* The Kapuskasing Uplift: A geological and geophysical synthesis // *Can. J. Earth Sci.* 1994. V. 31. P. 1256–1286.
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R.* Sand and sandstone. Berlin: Springer-Verlag, 1972. 552 p.
- Potter P.E., Maynard J.B., Depetris P.J.* Mud and Mudstones: Introduction and Overview. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005. 308 p.
- Prasad B.* Geology, sedimentation and palaeogeography of the Vindhyan Supergroup, S.E Rajasthan // *Mem. Geol. Surv. India.* 1984. № 116. 148 p.
- Proterozoic basins of Canada / Ed. F.H.A. Campbell // *Geol. Surv. Canada. Paper* 81–10. 1981. 444 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.
- Quirt D.H.* Lithochemistry of the Athabasca Group: Summary of sandstone data // *Summary of Investigations. Saskatchewan Geol. Surv. Saskatchewan Energy and Mines. Miscellaneous Report* 85-41. 1985. P. 128–132.
- Rainbird R.H., Hadlari T., Aspler L.B. et al.* Sequence stratigraphy and evolution of the Paleoproterozoic intracontinental Baker Lake and Thelon basins, western Churchill Province, Nunavut, Canada // *Precambrian Res.* 2003. V. 125. P. 21–53.
- Ramachandran A., Madhavaraju J., Ramasamy S. et al.* Geochemistry of Proterozoic clastic rocks of the Kerur Formation of Kaladgi-Badami Basin, North Karnataka, South India: implications for paleoweathering and provenance // *Turkish J. Earth Sci.* 2016. V. 25. <https://doi.org/10.3906/yer-1503-4>
- Ramaekers P.* Geology of the Athabasca Group (Helikian) in Northern Saskatchewan // *Saskatchewan Energy and Mines, Saskatchewan Geol. Surv. Rep.* 195. 1990. 48 p.
- Rao N.K., Dora M.L., Baswani S.R. et al.* Petrography and geochemistry of the Proterozoic sandstones of Somanpalli Group from Pomburna area, Eastern Belt of Pranhita–Godavari Valley, central India: Implications for provenance, weathering and tectonic setting // *J. Earth Syst. Sci.* 2018. V. 127. 90. <https://doi.org/10.1007/s12040-018-0991-7>
- Rao V.V.S., Sreenivas B., Balaram V. et al.* The nature of the Archean upper crust as revealed by the geochemistry of the Proterozoic shales of the Kaladgi basin, Karnataka, southern India // *Precambrian Res.* 1999. V. 98. P. 53–65.
- 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., Casshyap S.M., Khan A.* Accretionary lapilli from basal Vindhyan volcanic sequence, south of Chittaurgarh, Rajasthan and their implication // *J. Geol. Soc. India.* 2001. V. 57. P. 77–82.
- Raza M., Casshyap S.M., Khan A.* Geochemistry of Mesoproterozoic Lower Vindhyan Shales from Chittaurgarh, Southeastern Rajasthan and its Bearing on Source Rock Composition, Palaeoweathering Conditions and Tectono-sedimentary Environments // *J. Geol. Soc. India.* 2002. V. 60. P. 505–518.
- 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.
- Roddaz M., Debat P., Nikiema S.* Geochemistry of Upper Birimian sediments (major and trace elements and Nd–Sr isotopes) and implications for weathering and tectonic setting of the Late Paleoproterozoic crust // *Precambrian Res.* 2007. V. 159. P. 197–211.
- 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.
- Roy A., Bandyopadhyay B.K.* Tectonic significance of ultramafic and associated rocks near Tal in the Bijawar belt, Sidhi district, Madhya Pradesh // *J. Geol. Soc. India.* 1988. V. 32. P. 397–410.
- Roy A.B., Kroner A.* Single zircon evaporation ages constraining the growth of the Archaean Aravalli craton, northwestern Indian shield // *Ceol. Mag.* 1996. V. 133. P. 333–342.
- Rudnick R.L., Gao S.* Composition of the Continental Crust // *Treatise on Geochemistry* / Eds H.D. Holland, K.K. Turekian. Oxford: Elsevier, 2014. P. 1–51.
- Saha D., Mazumder R.* An overview of the Paleoproterozoic geology of Peninsular India, and key stratigraphic and tectonic issues // *Paleoproterozoic of India* / Eds R. Mazumder, D. Saha // *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* 2012. № 365. P. 5–29.
- Sears J.W., Chamberlain K.R., Buckley S.N.* Structural and U-Pb geochronological evidence for 1.47 Ga rifting in the Belt Basin, western Montana // *Can. J. Earth Sci.* 1998. V. 35. P. 467–475.
- 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>
- Stockwell C.H.* Third report on structural provinces, orogenies, and time-classification of rocks of the Canadian Precambrian Shield // *Geol. Surv. Can. Paper.* 1963. № 63–17. P. 125–131.
- Taylor F.C.* A revision of Precambrian structural provinces in northeastern Quebec and northern Labrador // *Can. J. Earth Sci.* 1971. V. 8. P. 579–584.
- Taylor P.N., Moorbath S., Leube A., Hirdes W.* Early Proterozoic crustal evolution in the Birimian of Ghana: constraints from geochronology and isotope geology // *Precambrian Res.* 1992. V. 56. P. 97–111.
- Taylor S.R., McLennan S.M.* Geochemistry of Early Proterozoic sedimentary rocks and the Archean/Proterozoic boundary // *Geol. Soc. Am. Memoir.* 1983. № 161. P. 119–132.
- Taylor S.R., McLennan S.M.* Rare earth elements in sedimentary rocks, granites and uranium deposits 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. 175–190.

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.

Thorkelson D.J., Abbott J.G., Mortensen J.K. et al. Early and Middle Proterozoic evolution of Yukon, Canada // *Can. J. Earth Sci.* 2005. V. 42. P. 1045–1071.

Turgeon S., Brumsack H.-J. Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian-Turonian Boundary Event (Cretaceous) in the Umbria-Marche basin of central Italy // *Chem. Geol.* 2006. V. 234. P. 321–339.

Unconformity-related Uranium Deposits. IAEA-TEC-DOC-1857. Vienna: IAEA, 2018. 295 p.

van de Kamp P.C. Potassium distribution and metasomatism in pelites and shists: how and when? Relation to postdepositional events // *J. Sediment. Res.* 2016. V. 86. P. 683–711.

van Kranendonk M.J. A Chronostratigraphic Division of the Precambrian: Possibilities and Challenges // *The Geologic Time Scale / Eds F.M. Gradstein, J.G. Ogg, M.D. Schmitz, G.M. Ogg.* Amsterdam: Elsevier Science & Technology, 2012. P. 299–392.

Velmurugan K., Madhavaraju J., Balaram V. et al. Provenance and Tectonic Setting of the Proterozoic Clastic Rocks of the Kerur Formation, Badami Group, Mohare Area, Karnataka, India // *Geological Evolution of the Precambrian Indian Shield / Ed. M.E. Mondal // A. Soc. Earth Sci. Series.* 2019. P. 239–269.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-89698-4_11

Venkatachala B.S., Mukund S., Shukla M. Age and life of the Vindhyan – facts and conjectures // *Mem. Geol. Soc. India.* 1996. № 36. P. 137–155.

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.

Viers J., Dupré B., Gaillardet J. Chemical composition of suspended sediments in World Rivers: New insights from a new database // *Sci. Total Environ.* 2009. V. 407. P. 853–868.

Wani H., Mondal M.E.A., Ahmad I. Geochemistry of metasedimentary rocks of the Sonakhan and Mahakoshal greenstone belts, Central India: Implications for paleoweathering, paleogeography and mechanisms of greenstone belt development // *Acta Geochim.* 2022. V. 41. P. 64–83.

Williams P.J. An introduction to the metallogeny of the McArthur River–Mount Isa–Cloncurry Minerals Province // *Econ. Geol.* 1998. V. 93. P. 1120–1131.

Windley B.F., Bridgwater D. The evolution of Archaean low- and high-grade terrains // *Geol. Soc. Australia. Spec. Pub.* 3. 1971. P. 33–46.

Young G.M. Geochemistry of early Proterozoic tillites and argillites of the Gowganda Formation, Ontario, Canada // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1969. V. 33. P. 483–492.

Young G.M. Proterozoic Plate Tectonics in Canada with special emphasis on evidence for a late Proterozoic rifting event // *Precambrian Res.* 1984. V. 25. P. 233–256.

Young G.M. Some aspects of the evolution of the Archean crust // *Geosci. Canada.* 1978. V. 5. № 5. P. 140–149.

Young G.M., Nesbitt H.W. Paleoclimatology and provenance of the glaciogenic Gowganda Formation (Paleoproterozoic), Ontario, Canada; a chemostratigraphic approach // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1999. V. 111. P. 264–274.

CLASTIC ROCKS OF THE OVERLYING BASEMENT PROTEROZOIC SEDIMENTARY SEQUENCES. COMMUNICATION 1. CLAY ROCKS, 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

Analysis of the bulk chemical composition of fine-grained clastic/clay rocks of a number of objects (Ai, Prikamsk and Trekhgornaya formations, Mukun Group and Ust-Ilya Formation, Starorusskaya and Vasilostrovskaya formations, clay rocks of the Lower Vindhyan and Gwalior, Bhima, Athabasca, Libby Creek groups, etc.), participating in the composition of Proterozoic sedimentary sequences unconformably overlying the crystalline basement, showed that their initial mineral composition was close to the composition of most post-Archean clay rocks. The ratio of Zr, Sc and Th in these rocks suggests that they are composed predominantly of weakly recycled material. The share of erosion products of mafic igneous rocks among the sources of their fine-grained aluminosilicoclastics was relatively small. The features of the bulk chemical composition of such clay rocks give reason to believe that the main suppliers of detrital material for them were rock complexes formed in collisional and/or riftogenic settings.

Keywords: clay rocks, basement, Proterozoic, lithogeochemistry