

УДК 551

МЕТААЛЕВРОПЕЛИТЫ РАННЕГО ДОКЕМБРИЯ: РЗЭ-Th-СИСТЕМАТИКА КАК КЛЮЧ К РЕКОНСТРУКЦИИ ИСТОЧНИКОВ СЛАГАЮЩЕЙ ИХ ТОНКОЙ АЛЮМОСИЛИКОКЛАСТИКИ

© 2021 г. А. В. Маслов^{a, b, *}, В. Н. Подковыров^{c, **}

^aИнститут геологии и геохимии УрО РАН,

ул. акад. Вонсовского, 15, Екатеринбург, 620016 Россия

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

^cИнститут геологии и геохронологии докембрия РАН,

наб. Макарова, 2, Санкт-Петербург, 199034 Россия

*e-mail: amas2004@mail.ru

**e-mail: vpodk@mail.ru

Поступила в редакцию 23.06.2020 г.

После доработки 11.08.2020 г.

Принята к публикации 23.12.2020 г.

В статье проанализировано положение точек с составами индивидуальных образцов и усредненными составами метаалевропелитов архея и раннего протерозоя (ассоциации Исуа и Акилиа, Западная Гренландия, комплекс Бит Бридж, провинция Лимпопо, Южная Африка, серии Модис, Мозан и Претория, Горная страна Барбертон, Южная Африка, кольская серия, Балтийский щит, парагнейсы Нармес, восток Финляндии, Олотский зеленокаменный пояс, Юго-Восточное Присянье, серия Рампур, Низкие Гималаи, Индия, канский метаморфический комплекс, Восточный Саян, ладожская серия, Северное Приладожье, енисейский метаморфический комплекс и др.) на диаграммах $(La/Yb)_N-Eu/Eu^*$ и $(La/Yb)_N-Th$ с классификационными областями обломочных/пелитовых осадков приустьевых частей разных категорий современных рек, по [Bayon et al., 2015]. Показано, что подавляющее большинство точек метаалевропелитов тяготеет к областям 1 (тонкая взвесь современных крупных рек), 2 (тонкая взвесь рек, дренирующих осадочные субстраты) и 4 (тонкая взвесь рек, текущих по районам развития вулканических пород), а также зоне перекрытия областей 1, 2 и 3 (тонкая взвесь рек, питающихся продуктами размыва магматических/метаморфических террейнов). Фигуративные точки всех рассмотренных нами объектов с возрастом более 2.8 млрд лет на диаграмме $(La/Yb)_N-Eu/Eu^*$ сосредоточены преимущественно в области 4. Это позволяет считать, при условии корректности наших предположений, что до указанного времени, скорее всего, не существовало крупных рек и рек, питавшихся продуктами эрозии осадочных образований, а процессы рециклирования тонкой алюмосиликокластики были редуцированы.

Ключевые слова: метаалевропелиты, архей, ранний протерозой, распределение лантаноидов и Th, палеоводосборы, типы рек/речных систем.

DOI: 10.31857/S0024497X21030058

На основе данных [Bayon et al., 2015] о Th-редкоземельной (РЗЭ)-систематике пелитовых и алеврито-пелитовых осадков приустьевых частей современных рек, дренирующих различные по площади и составу пород водосборы, нами было показано [Маслов и др., 2017; Маслов, Шевченко, 2019], что на диаграммах $(La/Yb)_N-Eu/Eu^*$,

$(La/Yb)_N-(Eu/Sm)_N$ и $(La/Yb)_N-Th$ фигуративные точки тонкой взвеси рек разных категорий¹ образуют как перекрывающиеся, так и обособленные области (рис. 1, 2). Например, области точек с составами донных отложений крупных рек и рек, дренирующих осадочные образования, характеризуются примерно 60–80%-ным перекры-

¹ Категория 1 – “крупные реки” (world’s major rivers), т.е. реки, характеризующиеся сложно построенными водосборами с площадью >100 тыс. км²; категория 2 – реки, дренирующие различные/осадочные образования (rivers draining “mixed/sedimentary” formations); категория 3 – реки, питающиеся продуктами размыва пород “магматических/метаморфических” террейнов (rivers draining “igneous/metamorphic” terranes). Площадь водосборов таких рек, по данным [Bayon et al., 2015], варьирует от 100 до 95000 км²; категория 4 – реки, дренирующие провинции, сложенные в основном вулканическими породами (rivers draining “volcanic” rocks). Площадь водосборов современных рек такой категории варьирует преимущественно от менее 100 до 56000 км² (единственный пример – р. Камчатка) [Bayon et al., 2015].

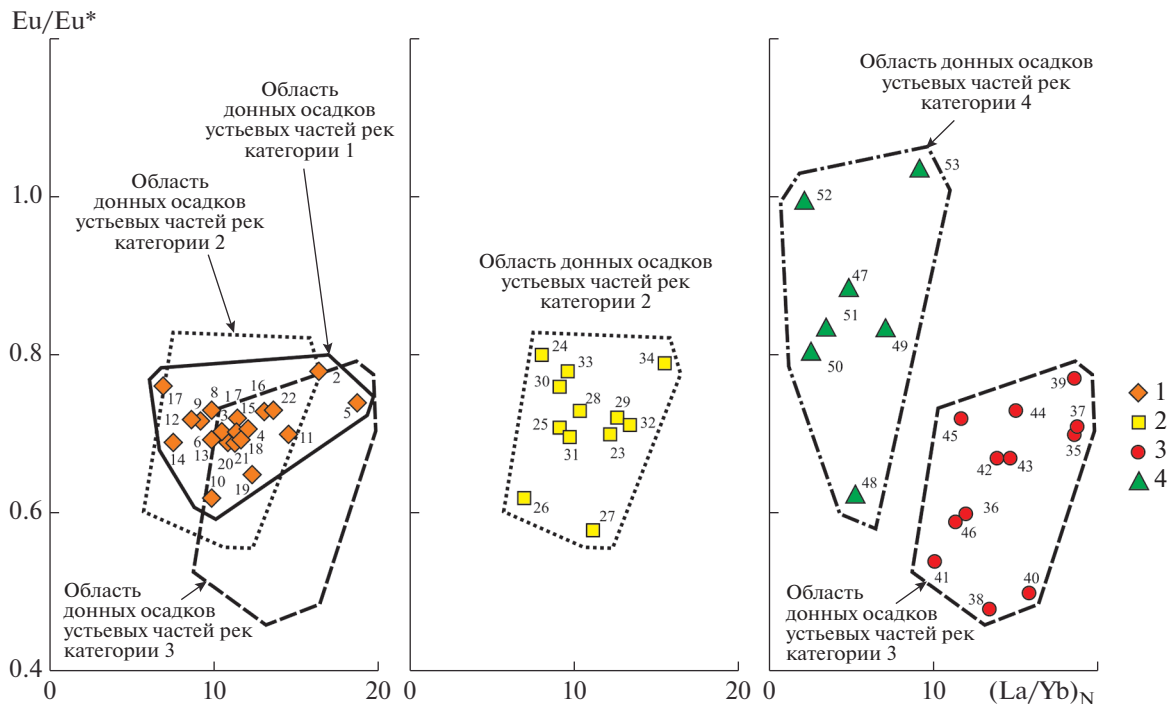


Рис. 1. Положение фигуративных точек с составами (по [Bayon et al., 2015]) донных осадков приустьевых частей современных рек различных категорий на диаграмме $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$.

1 – реки категории 1, “крупные реки” (world’s major rivers) (цифры у значков на диаграммах: 1 – Амазонка, 2 – Конго, 3 – Миссисипи, 4 – Нил, 5 – Нигер, 6 – Янцзы, 7 – МакКензи, 8 – Волга, 9 – Мюррей, 10 – Ориноко, 11 – Дунай, 12 – Меконг, 13 – Желтая, 14 – Аму-Дарья, 15 – Дон, 16 – Сев. Двина, 17 – Фрейзер, 18 – Рейн, 19 – Висла, 20 – Красная, 21 – Чаупхрар, река в Таиланде, 22 – Луара); 2 – реки категории 2, дренирующие различные/осадочные образования (rivers draining “mixed/sedimentary” formations) (23 – Сена, 24 – Флай, река на о-ве Новая Гвинея, 25 – Гуадиана, река в Испании и Португалии, 26 – Чубут, река на юге Аргентины, 27 – Мэкхлонг, река на западе Таиланда, 28 – Шэннон, река в Ирландии, 29 – Адур, река во Франции, 30 – Сефид Руд, река в Северном Иране, 31 – Майенн, река на западе Франции, 32 – Вар, река на юго-востоке Франции, 33 – Блэкуотер, река в Ирландии, 34 – Мойола, река в Ирландии); 3 – реки категории 3, питающиеся продуктами размыва пород “магматических/метаморфических” террейнов (rivers draining “igneous/metamorphic” terranes) (35 – Карони, река в Венесуэле, 36 – Нарва, 37 – Каура, река в Венесуэле, 38 – Кюмийоки, река в Финляндии, 39 – Аро, река в Венесуэле, 40 – Уме, река на севере Швеции, 41 – Луле, река в Норвегии, 42 – Тана, река в Норвегии, 43 – Кемийоки, река в Финляндии, 44 – Фойл, река в Ирландии, 45 – Илорн, река во Франции, 46 – Суилли, река в Ирландии); 4 – реки категории 4, дренирующие провинции, сложенные в основном вулканическими породами (rivers draining “volcanic” rocks) (47 – Камчатка, 48 – Уайкато, река в Новой Зеландии, 49 – Нижний Бэнн, река в Северной Ирландии, 50 – Мэн, река в Ирландии, 51 – Сикс Майл, река в Ирландии, 52 – Гленариф, река в Ирландии, 53 – Галец, река на о-ве Реюньон).

тием. Перекрываются (от ~30 до 50%) также и области составов донных отложений устьев крупных рек, рек с водоразделами, сложенными, в основном, осадочными образованиями, и рек, дренирующих “магматические/метаморфические” террейны. В то же время составы донных осадков рек, питающихся продуктами размыва водосборов, сложенных магматическими и метаморфическими образованиями, и рек, размывающих вулканические породы, перекрытия не имеют.

Перечисленные диаграммы использованы нами ранее при реконструкции водосборных пространств разных категорий, поставлявших тонкозернистый обломочный и глинистый материал для осадочных последовательностей верхнего докембрия Башкирского и Кваркушко-Каменно-

горского мегантиклинориев (Западный Урал), Камско-Бельского авлакогена и Учуро-Майского региона, осадочных толщ верхнего палеозоя Юрюзано-Сылвинской впадины Предуральяского предгорного прогиба, нижнемезозойских отложений запада Западной Сибири и ряда других объектов. В настоящей статье предпринята попытка применить эти диаграммы для анализа в разной степени метаморфизованных (метатерригенных) дорифейских образований.

ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ

Общая характеристика объектов

Из литературных источников последних 30–35 лет были заимствованы данные (рис. 3) о вели-

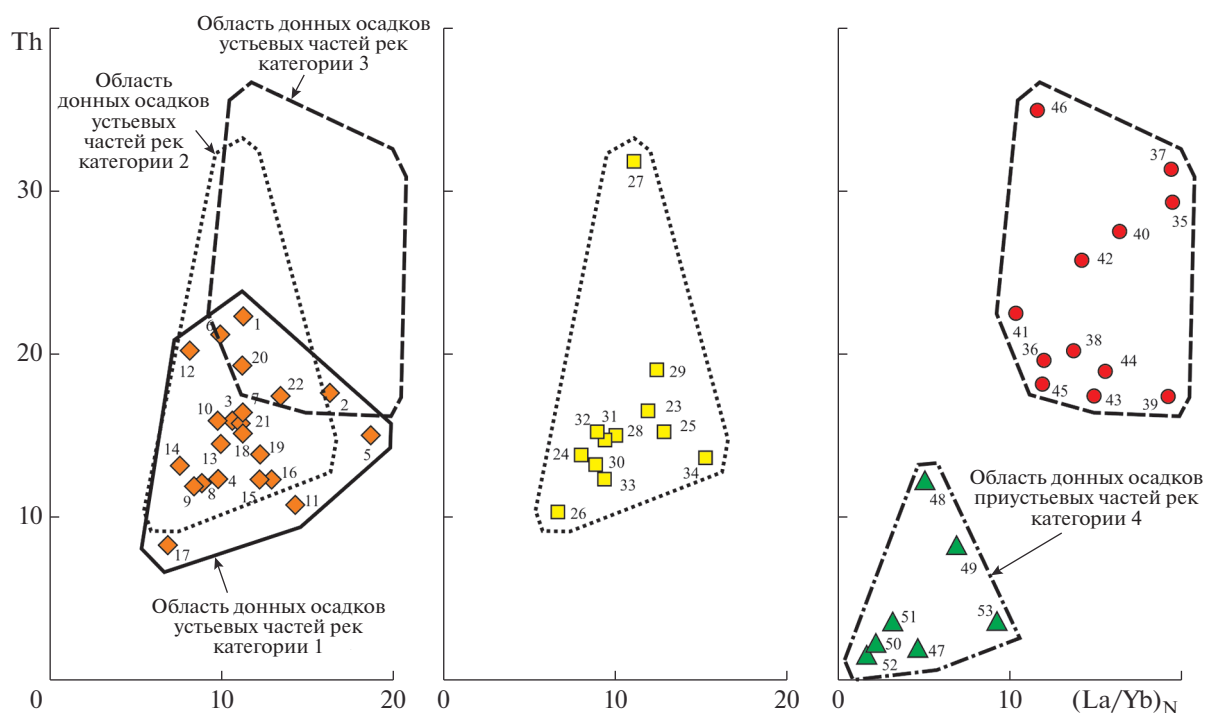


Рис. 2. Положение фигуративных точек с составами (по [Bayon et al., 2015]) донных осадков приустьевых частей современных рек различных категорий на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Th. Номера точек соответствуют показанным на рис. 1. Условные обозначения см. рис. 1.

чинах содержания La, Sm, Eu, Gd, Yb² и Th в метаосадочных породах, главным образом в метаалевропелитах ($SiO_2 < 65$ –66 мас. %) различных геологических объектов, возраст которых варьирует от ~3.8 до 1.6 млрд лет (всего 245 анализов³). Эти объекты представлены аллювиальными последовательностями, прибрежно- и мелководно-морскими метатерригенными образованиями и иногда турбидитами.

На основании предположения о том, что породы не подверглись существенной трансформации исходных распределений РЗЭ и Th, по литературным данным были рассчитаны величины $(La/Yb)_N$ и Eu/Eu^* , нормированные по хондриту [Taylor, McLennan, 1985] (табл. 1). Области расположения фигуративных точек, характеризующих индивидуальные образцы, и точек с усредненным составом, рассчитанным для большинства исследованных объектов, на диаграммах $(La/Yb)_N$ – Eu/Eu^* и $(La/Yb)_N$ –Th были сопоставлены с областями современных алевропелитовых осадков рек четырех категорий. Следует отметить, одна-

ко, что, несмотря на значительный объем имеющихся в литературе данных, для некоторых объектов сведений о составе метаалевропелитов (в т.ч. содержании некоторых лантаноидов), характере метаморфизма, источниках тонкой алюмосиликокластки, времени формирования протолитов найти не удалось.

В Западной Гренландии в составе зеленокаменного пояса Исуа наряду с амфиболитами, кварцитами (тонкополосчатыми железистыми их разновидностями), дунитами и пироксен-оливиновыми породами присутствуют и метаосадочные породы (гранат-биотит-плаггиоклазовые кристаллические сланцы/метапелиты), время формирования которых оценивается ~3.80–3.75 млрд лет [McLennan, Taylor, 1984; Long, 2019]. Они метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации. Расчеты показывают, что исходные осадки были образованы в результате смешения продуктов разрушения магматических пород как основного, так и кислого состава [Bolhar et al., 2005]. Примерно такой же возраст имеет и т. н. “ассоциация Акилия” – включения, ксенолиты и будины основных, ультраосновных и осадочных (обломочных и хемогенных) пород в гнейсах Амйтсок [McGregor, Mason, 1977; Bolhar et al., 2004].

Комплекс Бит Бридж в провинции Лимпопо Южной Африки сложен преимущественно метаосадочными (биотит-гранат-кордиерит-силли-

² Выбор именно этих лантаноидов обусловлен тем, что по ним рассчитываются значения $(La/Yb)_N$ и Eu/Eu^* , которые используются для построения рассматриваемых нами в данной работе диаграмм.

³ Указанные аналитические данные предоставляются по запросу на адрес электронной почты первого автора.

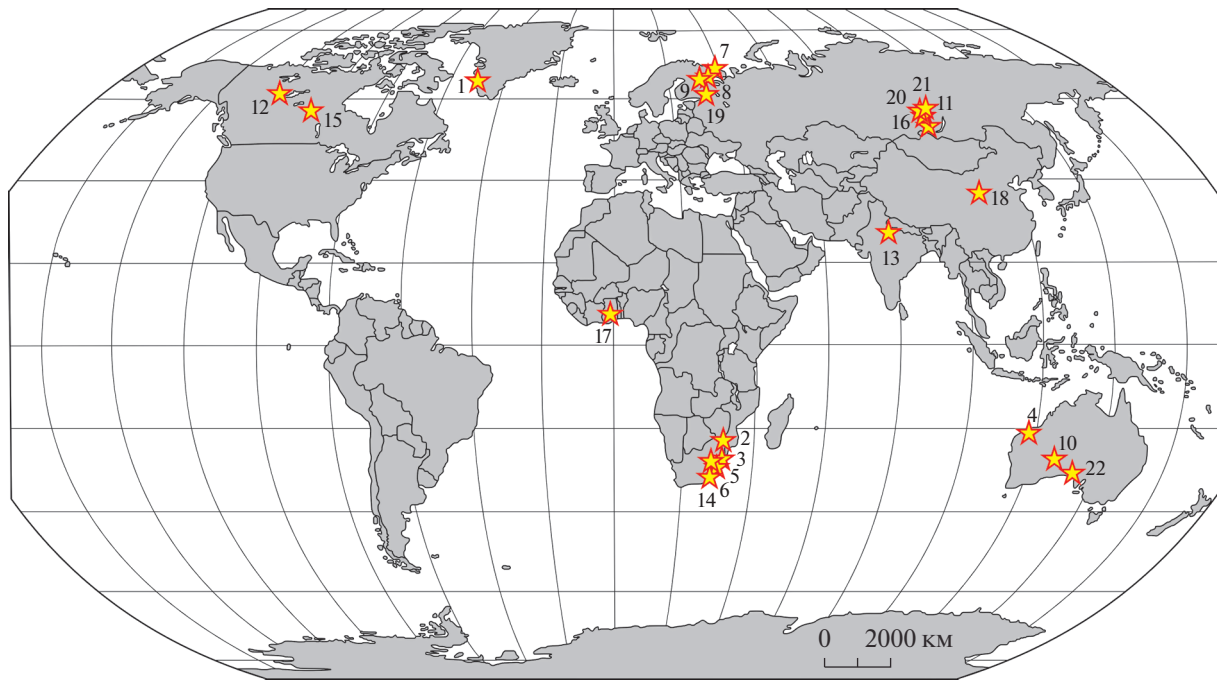


Рис. 3. Схема расположения рассмотренных в настоящей работе объектов (географическая основа по [Verga, Armstrong-Altrin, 2013] с некоторыми изменениями).

1 — ассоциации Исуа и Акиля, Западная Гренландия; 2 — комплекс Бит Бридж, провинция Лимпопо, Южная Африка; 3 — серия Модис, Горная страна Барбертон, Южная Африка; 4 — серия Джордж Крик, блок/кратон Пилбара, Западная Австралия; 5 — серия Мозаан, надсерия Понгола, Горная страна Барбертон, Южная Африка; 6 — надсерия Витватерсранд, кратон Каапвааль, Южная Африка; 7 — кольская серия, Балтийский щит; 8 — Карельская провинция, Балтийский щит; 9 — парагнейсы Нармес, восток Финляндии; 10 — район Камбалда, блок/кратон Йлгарн, Западная Австралия; 11 — Онотский зеленокаменный пояс, Шарыжалгайский выступ, Юго-Восточное Прикаспье; 12 — надсерия Йеллоунайф, провинция Слейв, Канада; 13 — серия Рампур, Низкие Гималаи, Индия; 14 — серия Претория, кратон Каапвааль, Южная Африка; 15 — серия Гарвиц, Саскачеван, Южная Канада; 16 — канский метаморфический комплекс, Канский блок, Восточный Саян; 17 — пояс Ва-Лавра, Гана; 18 — террейн Конглинг, северо-западная часть кратона Янцзы, Южный Китай; 19 — ладожская серия, Северное Приладожье; 20 — амфиболит-мрамор-парагнейсовая толща енисейского метаморфического комплекса, Ангари-Канский блок, Енисейский край; 21 — парагнейсовая толща того же комплекса; 22 — домен Фаулер, западная часть кратона Гавлер, Южная Австралия.

манитовыми гнейсами) и метавулканическими (амфиболитами) образованиями (возраст ~3.6... 3.2 млрд лет⁴); подчиненную роль играют мраморы и тальк-содержащие породы [Taylor et al., 1986]. Эти породы образовались в условиях гранулитовой фации метаморфизма. По данным [Eriksson, Kidd, 1985], протолитами метаосадочных пород являлись аргиллиты, кварцевые арены, аркозы, а также известняки и известковистые аргиллиты, представленные в соотношении 50 : 17 : 17 : 17. Это дает основание предполагать, что их формирование происходило в обстановках мелководных шельфов кратонов, широко развитых позднее — в протерозое и фанерозое. РЗЭ-систематика метапелитов позволяет думать, что источниками тонкой алюмосиликокластики для

них были как основные, так и кислые магматические породы, в том числе К-граниты.

Метаосадочные породы серии Модис Горной страны Барбертон в Южной Африке, по современным оценкам, имеют возраст ~3.2 млрд лет [Hessler, Lowe, 2006; Long, 2019]. Образование их протолитов происходило за счет эрозии тоналитов, трондьемитов, кварцевых монзонитов и кислых вулканитов (т.е. это породы первого цикла седиментации) [McLennan, Taylor, 1983]. Высокое содержание Ni и Cr в глинистых сланцах дает основание предполагать в них присутствие значительной доли продуктов размыва ультраосновных пород [Hessler, Lowe, 2006]. Примечательно, что сланцы (shale) являются сугубо подчиненным компонентом в разрезах серии Модис (так, в блоке Модис Хиллс, а также в пределах синклинали Саддлбак, где аргиллиты (mudstone) и сланцы составляют менее 5% разреза мощностью около 3000 м, накопление глинистых осадков происходило, вероятно, в аллювиальных, приливно-отливных и

⁴ Следует отметить, что длительность формирования образований, составляющих анализируемые объекты, или неизвестна, или все еще слабо обоснована, или более значительная, по сравнению с рифейско-фанерозойскими объектами.

Таблица 1. Средние, минимальные и максимальные содержания ряда лантаноидов, Th (г/т), и значения некоторых индикаторных отношений в изученных метабазальтоидных породах

№ п/п	Надсерия, серия, комплекс	La	Sm	Eu	Gd	Yb	Th	(La/Yb) _N	Eu/Eu*	n
1	Западная Гренландия (Исуа и Акиля), ~3.80 млрд лет	14.08 ± 9.34 $2.03-31.80$	3.58 ± 1.58 $0.88-6.38$	1.04 ± 0.36 $0.27-1.56$	3.43 ± 1.34 $1.08-5.44$	1.83 ± 0.74 $0.59-3.26$	2.41 ± 1.83 $0.23-5.39$	5.61 ± 3.24 $0.61-11.55$	0.94 ± 0.17 $0.72-1.44$	22
2	Комплекс Бит Бридж, пояс Лимпопо, ~3.80...3.30 млрд лет	28.44 ± 9.88 $14.00-39.80$	5.82 ± 1.71 $3.99-7.60$	1.44 ± 0.77 $0.77-2.75$	5.66 ± 2.08 $3.15-8.29$	5.09 ± 5.39 $1.26-14.50$	9.11 ± 5.14 $1.39-14.80$	6.75 ± 4.80 $1.85-13.19$	0.76 ± 0.23 $0.56-1.07$	5
3	Серия Модис, ~3.30 млрд лет	33.19 ± 18.40 $14.50-71.75$	5.12 ± 2.38 $2.39-10.11$	1.35 ± 0.67 $0.68-2.90$	3.21 ± 1.13 $2.07-5.70$	2.21 ± 0.78 $1.29-3.78$	5.77 ± 1.34 $3.00-7.21$	9.82 ± 3.02 $7.41-16.16$	0.89 ± 0.07 $0.77-0.98$	9
4	Серия Джордж Крик, блок Пилбара, ~2.90 млрд лет	35.80 ± 12.53 $16.50-60.80$	6.21 ± 2.44 $2.66-12.40$	1.53 ± 0.60 $0.64-3.11$	4.47 ± 1.81 $2.13-9.39$	2.58 ± 0.93 $1.27-4.89$	11.78 ± 5.07 $5.16-25.70$	9.51 ± 1.68 $7.53-12.54$	0.89 ± 0.06 $0.82-0.99$	12
5	Серия Мозан, ~3.00...2.90 млрд лет	29.44 ± 8.23 $16.20-37.90$	5.25 ± 1.39 $3.67-6.39$	1.22 ± 0.30 $0.85-1.47$	4.36 ± 1.25 $2.96-5.41$	3.15 ± 1.21 $1.58-4.77$	8.89 ± 2.44 $5.95-12.30$	6.56 ± 1.05 $5.37-7.65$	0.78 ± 0.04 $0.74-0.84$	5
6	Серия Витватерсранд, ~3.00...2.70 млрд лет	34.30 ± 17.01 $16.00-68.00$	5.86 ± 2.16 $3.20-9.70$	1.29 ± 0.36 $0.83-2.00$	5.56 ± 1.99 $2.70-9.40$	3.10 ± 1.45 $1.30-6.50$	7.45 ± 3.95 $4.30-17.00$	7.99 ± 3.47 $4.00-14.36$	0.71 ± 0.08 $0.63-0.88$	10
7	Кольская серия, ~2.80 млрд лет	28.56 ± 4.25 $18.74-33.62$	4.74 ± 0.97 $3.55-6.26$	1.29 ± 0.20 $1.07-1.64$	4.51 ± 1.21 $2.86-6.24$	1.46 ± 0.77 $0.31-2.42$	7.81 ± 2.03 $3.77-10.04$	20.16 ± 16.59 $5.23-59.79$	0.87 ± 0.11 $0.68-1.03$	10
8	Западная и Центральная Карелия, ~2.75 млрд лет	20.58 ± 7.92 $10.20-28.80$	4.11 ± 1.78 $1.77-6.14$	1.03 ± 0.36 $0.63-1.46$	3.51 ± 1.70 $1.30-5.37$	1.65 ± 0.72 $0.99-2.88$	6.67 ± 2.32 $4.15-10.10$	8.67 ± 2.52 $6.76-11.87$	0.91 ± 0.26 $0.56-1.27$	5
9	Восточная Финляндия, 2.75...2.70 млрд лет	20.84 ± 7.85 $6.79-34.40$	4.09 ± 1.40 $1.74-6.17$	1.00 ± 0.25 $0.56-1.46$	3.66 ± 1.31 $1.59-5.45$	1.56 ± 0.61 $0.31-2.88$	6.45 ± 2.17 $2.57-11.10$	10.66 ± 6.68 $3.56-29.43$	0.85 ± 0.23 $0.55-1.37$	14
10	Район Камбалда, блок Йлгарн, ~2.70 млрд лет	11.21 ± 5.76 $3.23-20.27$	2.52 ± 0.92 $1.26-4.05$	0.87 ± 0.21 $0.47-1.26$	2.64 ± 0.89 $1.13-4.00$	1.62 ± 0.58 $0.88-2.66$	4.64 ± 2.70 $1.26-8.54$	4.49 ± 1.26 $1.98-6.30$	1.11 ± 0.38 $0.78-2.07$	9
11	Онотский, ~2.70 млрд лет	25.80 ± 4.44 $22.00-33.00$	5.10 ± 0.69 $4.30-6.00$	1.17 ± 0.13 $1.02-1.31$	4.32 ± 0.82 $3.10-5.20$	1.77 ± 0.37 $1.15-2.10$	7.92 ± 1.08 $6.40-9.20$	10.10 ± 2.08 $8.54-13.51$	0.77 ± 0.07 $0.69-0.85$	5

Таблица 1. Окончание

№ п/п	Надсерия, серия, комплекс	La	Sm	Eu	Gd	Yb	Th	(La/Yb) _N	Eu/Eu*	n
12	Надсерия Йеллоунайф, ~2.70...2.61 млрд лет	26.60 ± 8.96 7.67–49.00	5.04 ± 1.34 1.59–7.80	1.38 ± 0.32 0.61–2.10	4.00 ± 0.84 1.94–6.00	1.82 ± 0.41 1.00–2.67	8.25 ± 3.38 5.05–19.90	10.41 ± 4.38 3.09–20.69	0.95 ± 0.13 0.70–1.23	23
13	Серия Рампур, 2.51 млрд лет	35.92 ± 5.35 27.00–44.00	6.44 ± 0.73 4.85–7.55	1.17 ± 0.12 0.93–1.36	4.83 ± 0.62 3.34–5.83	2.49 ± 0.44 1.69–3.32	18.47 ± 4.27 10.40–26.60	9.98 ± 2.05 7.54–14.87	0.64 ± 0.04 0.58–0.72	13
14	Серия Претория, ~2.40...2.20 млрд лет	52.29 ± 15.86 28.00–76.00	7.43 ± 1.65 4.80–9.40	1.44 ± 0.24 1.10–1.80	6.86 ± 1.52 4.70–8.50	3.39 ± 0.41 2.70–3.90	19.71 ± 3.35 15.00–24.00	10.47 ± 3.03 5.73–13.95	0.63 ± 0.07 0.55–0.71	7
15	Серия Гарвиц, ~2.40...1.90 млрд лет	39.76 ± 18.31 1.76–65.20	5.56 ± 2.40 0.29–9.10	1.07 ± 0.46 0.06–1.91	4.41 ± 1.89 0.29–7.15	2.19 ± 0.86 0.08–3.26	12.62 ± 7.22 0.31–23.90	12.73 ± 4.76 6.67–25.96	0.66 ± 0.05 0.60–0.77	15
16	Канский, ~2.30...1.87 млрд лет	37.58 ± 17.07 18.00–67.00	7.08 ± 2.24 3.70–10.60	1.52 ± 0.44 0.90–2.30	6.59 ± 2.10 2.60–11.60	3.81 ± 1.39 1.59–7.10	14.82 ± 10.60 2.20–46.60	8.12 ± 5.86 2.55–22.99	0.70 ± 0.13 0.43–0.92	19
17	Пояс Ва-Лавра, ~2.10 млрд лет	18.78 ± 3.07 11.80–23.00	4.19 ± 0.78 2.57–5.42	0.98 ± 0.14 0.68–1.25	3.51 ± 0.59 2.41–4.52	1.88 ± 0.25 1.26–2.35	3.14 ± 0.35 2.26–3.86	6.79 ± 1.12 4.74–9.76	0.79 ± 0.10 0.62–0.98	21
18	Террейн Конглинг, <2.10 млрд лет	41.62 ± 11.09 21.70–64.40	6.21 ± 1.88 3.25–10.60	1.17 ± 0.26 0.80–1.83	5.51 ± 1.72 2.90–9.71	2.88 ± 1.18 1.11–4.81	10.81 ± 4.25 5.60–23.50	11.38 ± 5.23 4.13–24.78	0.65 ± 0.20 0.41–1.07	20
19	Ладожская серия, 2.00...1.92 млрд лет	29.42 ± 12.55 13.30–50.10	4.97 ± 1.73 2.30–7.73	0.96 ± 0.32 0.47–1.52	4.12 ± 1.35 2.00–5.97	1.93 ± 0.63 0.60–2.80	8.53 ± 2.68 4.40–14.20	10.49 ± 3.02 4.73–17.46	0.65 ± 0.07 0.56–0.79	13
20	Енисейский, первая толща, 1.85...1.84 млрд лет	39.50 ± 4.97 31.00–45.00	6.15 ± 1.02 4.40–7.00	1.27 ± 0.18 1.00–1.50	5.00 ± 1.05 3.60–6.00	2.87 ± 0.77 1.80–4.20	17.88 ± 3.99 10.90–22.40	9.89 ± 3.08 6.44–15.39	0.71 ± 0.07 0.59–0.79	6
21	Енисейский, четвертая толща, >1.74 млрд лет	48.02 ± 21.48 10.10–63.00	7.82 ± 2.95 2.60–9.40	1.48 ± 0.43 0.79–1.90	6.10 ± 1.95 2.80–7.80	3.44 ± 0.60 3.00–4.50	18.56 ± 6.85 6.50–23.30	9.60 ± 4.72 2.13–14.19	0.69 ± 0.15 0.49–0.89	5
22	Кратон Гавлер, 1.76...1.67 млрд лет	58.43 ± 27.67 17.00–92.00	10.07 ± 4.74 2.50–15.00	1.76 ± 0.50 1.15–2.50	6.73 ± 2.90 2.60–10.00	2.20 ± 1.60 0.70–4.60	29.93 ± 15.47 3.00–47.00	26.13 ± 14.97 3.02–44.66	0.75 ± 0.29 0.55–1.38	7

Примечание. В числителе – среднее арифметическое значение и стандартное отклонение, в знаменателе – минимальное и максимальное значения. n – число образцов в выборке.

прибрежно-морских обстановках [Eriksson, 1978, 1979; Long, 2019 и ссылки в этой работе]).

В составе серии Джордж Крик кратона Пилбара в Западной Австралии доминируют метатерригенные породы (мусковит-кварцевые сланцы), есть также железистые кварциты и базальты [Van Kranendonk, 2006]. Возраст их ранее оценивался как ~3.4...3.3 млрд лет [McLennan et al., 1983; Groves et al., 1994], а сейчас считается соответствующим 3.066–3.015 млрд лет [Long, 2019 и ссылки в этой работе]. По представлениям [Eriksson, 1981, 1982], эти метатерригенные образования формировались в аллювиальных и троговых (турбидиты) обстановках; мелководные фации здесь, вероятно, отсутствуют. Источниками обломочного материала для них выступали как основные, так и кислые магматические породы.

Метатерригенные породы серии Мозаан (метаконгломераты, метапесчаники, метапелиты с прослоями метакарбонатных пород и метабазальтов) надсерии Понгола (Горная страна Барбертон, Южная Африка) имеют возраст ~2.9 млрд лет [McLennan, Taylor, 1983; Long, 2019 и ссылки там]. Накопление их протолитов происходило предположительно в флювиальных и приливных обстановках, а источниками алюмосиликокластики выступали породы гранит-зеленокаменных ассоциаций [Watchorn, 1980; Hicks, Hofmann, 2012].

Надсерия Витватерсранд (~2.97...2.78 млрд лет) кратона Каапвааль Южной Африки объединяет серии Западного и Центрального Ранда [Jahn, Condie, 1995; Long, 2019]. Первая – сложена преимущественно метапелитами и кварцитами, подчиненную роль играют здесь основные вулканы. Накопление отложений, предположительно, происходило в мелководно-морских или межприливных (intertidal) обстановках при незначительной роли обстановок аллювиальных [Tankard et al., 1982]. Вторая серия объединяет метасубграувакки, кварциты и метаконгломераты; метапелиты, как и основные вулканы, играют здесь подчиненную роль. Накопление их происходило преимущественно в многоруслевой аллювиальной системе, а в составе источников сноса заметную роль играли базальты и коматититы [Jahn, Condie, 1995].

Среди отложений кольской серии (~2.8 млрд лет) Балтийского щита присутствуют высокглиноземистые (гранат-биотитовые, биотит-силлиманитовые и др.) гнейсы, которые рядом исследователей рассматриваются как метаосадочные образования [Сиротин и др., 2005; Ранний докембрий ..., 2005; Ветрин и др., 2013 и др.], хотя есть и другие точки зрения [Мыскова, Милькевич, 2016 и др.]. Протолитами гнейсов являлись, по-видимому, полимиктовые и аркозовые песчаники,

граувакки, а также продукты выветривания основных и кислых пород [Сиротин и др., 2005].

В разрезах верхнего архея (~2.75 млрд лет) Карельской провинции Балтийского щита (Центрально- и Западно-Карельский домены) значительная роль, наряду с вулканитами среднего и кислого состава, принадлежит метатерригенным породам (преимущественно метаграуваккам) [Чекулаев, Арестова, 2020]. Источниками слагающей их алюмосиликокластики являлись породы тоналит-трондьемит-гранитных (ТТГ) ассоциаций, при подчиненной роли пород основного и ультраосновного состава.

Карельский кратон в восточной части Финляндии представлен зеленокаменными и метаосадочными поясами, расположенными между гнейсо-гранитными комплексами, состоящими из орто- и парагнейсов, а также плутонов тоналит-гранодиорит-гранитов [Sorjonen-Ward, Luukkonen, 2005]. Парагнейсы Нармес, речь о которых пойдет далее, входят в состав одноименного пояса, зажатого между гранит-зеленокаменными терреймами Кухмо и Иломанси к северу от г. Нармес [Kontinen et al., 2007]. Это преимущественно биотит-плагиоклазовые породы, состав которых близок к среднему составу неоархейских граувакк. Время формирования их протолитов оценивается как 2.75...2.70 млрд лет. Источниками кластики для них выступали преимущественно породы ТТГ-ассоциаций и/или санукитоиды и основные вулканы. Накопление метаграувакк Нармес происходило, предположительно, в за- или междугорных обстановках [Kontinen et al., 2007].

Район Камбалда (блок/кратон Йлгарн, Западная Австралия) является областью распространения позднеархейских (~2.7 млрд лет) гранит-зеленокаменных ассоциаций, в составе которых присутствуют мафит-ультрамафитовые и кислые вулканические породы, а также метаосадочные образования, гнейсы и гранитогнейсы [Bavinton, Taylor, 1980; Batemann et al., 2001]. Они преобразованы в условиях эпидот-амфиболитовой фации. Среди метаосадочных пород есть кремни и углеродистые их разности, углеродистые сланцы и метатурбидиты, кислые вулканокластические образования. Считается, что источниками обломочного материала являлись как кислые вулканы и граниты (удаленный источник), так и основные и ультраосновные породы (местный источник). Накопление указанных образований происходило, предположительно, в низкоэнергетических глубоководных или мелководных обстановках [Squire et al., 1998].

В составе Онотского зеленокаменного пояса Шарыжалгайского выступа в Юго-Восточном Присяянье метавулканогенно-осадочные толщи (предполагаемое время седиментации ~2.7 млрд лет) слагаются амфиболитами, амфиболовыми, ам-

фибол-биотитовыми, гранат-биотитовыми, гранат-ставролит-амфиболовыми и гранат-ставролит-биотитовыми (метаалевролиты и метааргиллиты), мусковит-хлорит-кварцевыми, биотит-амфибол-плагиоклазовыми (метаграувакки) и другими сланцами, мраморами, железистыми кварцитами и метариолитами. Породы метаморфизованы в условиях эпидот-амфиболитовой фации. Источниками обломочного материала для метатерригенных образований являлись как плагиогнейсы тоналит-трондьемитового состава, так и перекрывающие их основные и кислые вулканыты [Ножкин и др., 2001б; Туркина и др., 2014].

Надсерия Йеллоунайф провинции Слейв, Канада (предполагаемое время накопления 2.72–2.661 млрд лет, [Long, 2019 и ссылки там]), объединяет мощный комплекс супракрустальных образований, среди которых преобладают метаосадочные породы. Одним из наилучших примеров их считаются турбидиты формации Барваш [Ferguson et al., 2005], метаморфизованные в основном в условиях от зеленосланцевой до амфиболитовой фаций. Предполагается [Jenner et al., 1981], что источником слагающей их кластики являлась питающая провинция, в составе которой присутствовало ~20% основных и средних вулканитов, ~55% кислых их разностей и 25% гранитоидов. Более поздние исследования [Yamashita, Creaser, 1999] дают основание считать, что ~35% площади палеоводосбора были сложены основными и средними вулканитами, на долю кислых вулканитов приходилось около 45%, гранитоидов и ультраосновных пород соответственно 18 и 2%.

Позднеархейская (~2.51 млрд лет) серия Рампур в Низких Гималаях (Индия) объединяет метапелиты, метапесчаники и основные вулканиты. Степень изменения этих пород соответствует метатенезу (anchizone). Считается, что источниками обломочного материала для них выступали преимущественно кислые магматические породы, роль основных пород была небольшой [Bhat, Ghosh, 2001]. Накопление протолитов метатерригенных пород серии Рампур происходило, предположительно, в мелководно-морских обстановках.

Серия Претория (~2.30...2.10 млрд лет) кратона Каапвааль в Южной Африке объединяет формации Таймбол Хил, Струбенкоп и Силвертон [Jahn, Condie, 1995; Long, 2019], сложенные кварцитами и метапелитами мелководно-морского и приливно-отливного генезиса. Подчиненную роль в разрезах этих формаций играют карбонатные породы и вулканиты.

Серия Гарвиц (~2.4...1.9 млрд лет) провинции Саскачеван Южной Канады объединяет метаосадочные породы (метапелиты и их железистые разновидности, а также мраморы) и разнообразные интрузивные образования. Породы метамор-

физованы, в основном, в условиях амфиболитовой, а локально – гранулитовой фации [Harper, 2004].

Палеопротерозойский (~2.45...2.3 млрд лет [Ножкин, 2009]) канский метаморфический комплекс (Канский блок, Восточный Саян) объединяет амфиболовые, биотит-амфиболовые, гранат-биотитовые и биотитовые гнейсы, метавулканиты, мраморы, плагиоклазовые амфиболиты и метаультрамафиты [Ножкин, Туркина, 1993; Ножкин и др., 1996; Дмитриева и др., 2008]. Породы метаморфизованы в условиях амфиболитовой фации [Ножкин и др., 2001а]. Считается, что протолитами метатерригенных пород комплекса являлись “граувакки островных дуг”, т.е. породы первого цикла седиментации (предполагаемое время седиментации 2.30...1.87 млрд лет) [Дмитриева и др., 2008]. Локальными источниками обломочного материала были островодужные ассоциации, а также основные магматические образования и более зрелые коровые комплексы (архей Сибирского кратона или ранний протерозой Центрального террейна Канского блока).

Палеопротерозойский (~2.1 млрд лет) пояс Ва-Лавра расположен в северной части Ганы и сложен в том числе метаосадочными породами (метапелитами, метапесчаниками и др.), метаморфизованными в условиях зеленосланцевой фации. Геохимические особенности метапелитов позволяют предполагать, что они представлены в основном материалом первого цикла седиментации, источниками которого выступали как основные, так и кислые магматические породы. Расчеты на основе РЗЭ-систематики метапелитов позволяют думать, что на долю базальтов приходилась примерно половина площади палеоводосборов, тогда как около 16% – на породы ТТГ-ассоциации, а примерно 35% – на граниты. Накопление исходных осадков происходило в интраконтинентальных обстановках задугового бассейна [Asiedu et al., 2019 и ссылки в этой работе].

Террейн Конглинг в северо-западной части кратона Янцзы (Южный Китай) сложен диоритами, тоналитами и гранито-гнейсами, метаосадочными породами (гранат-силлиманитовые гнейсы), а также амфиболитами и основными гранулитами. Породы террейна метаморфизованы в условиях верхней амфиболитовой и гранулитовой фаций. Максимальный возраст накопления метаосадочных пород оценивается как ~2.1 млрд лет [Yin et al., 2013]. Минералогические и изотопно-геохимические характеристики гнейсов заметно варьируют, что указывает на разнообразный состав пород питающей провинции. По данным [Gao et al., 1999], источниками обломочного материала могли выступать диорит-тоналит-трондьемитовые гнейсы (до 62%) и амфиболиты (до 25%) (материал первого цикла седимента-

ции), а также в какой-то степени (2–10%) коматиты и граниты (до 7%). По мнению авторов работы [Qiu et al., 2018], источниками кластики были интенсивно выветрелые основные магматические породы с подчиненным содержанием кислых вулканических пород. Предполагается, что формирование протолитов метаосадочных пород комплекса Конглинг происходило в обстановках континентальной вулканической дуги.

Ладожская серия (предполагаемое время седиментации ~2.00...1.92 млрд лет) в Северном Приладожье объединяет биотитовые гнейсы и кварц-слюдистые сланцы [Котова и др., 2007, 2009, 2013], протолитами которых являлись в основном граувакковые песчаники и аргиллиты. Источниками кластики для метатерригенных пород этой серии считаются гранито-гнейсы архея Карельского мегаблока Балтийского щита и раннепротерозойские отложения ятулия, в том числе основные магматические породы. Доля первых, по оценкам, приведенным в работе [Мыскова и др., 2012], составляла ~30–40%, доля вторых – около 60–70%. Супракрустальные образования Приладожья претерпели региональный метаморфизм в условиях от зеленосланцевой фации на северо-востоке до гранулитовой на юго-западе.

Енисейский позднепалеопротерозойский метаморфический комплекс Ангара-Канского блока Енисейского кряжа объединяет четыре толщи: амфиболит-мрамор-парагнейсовую (вулканогенно-карбонатно-терригенную, время осадконакопления 1.85...1.84 млрд лет назад), амфиболит-ортогнейсовую (вулканогенную, время формирования ~1.74 млрд лет назад), мрамор-парагнейсовую (карбонатно-терригенную) и парагнейсовую (терригенную) [Ножкин и др., 2019]. Протолитами для гнейсов и сланцев первой и четвертой толщ являлись, предположительно, полимиктовые или аркозовые песчаники, алевролиты и аргиллиты первого седиментационного цикла; гранат-двуслюдяные сланцы рассматриваются как метааргиллиты.

В составе домена Фаулер, расположенного в западной части кратона Гавлер Южной Австралии, существенная роль принадлежит метаосадочным породам (биотит-мусковит-гранат-кварц-силлиманит-кордиеритовые метапелиты), сформировавшимся в период между 1.76–1.71 и 1.69–1.67 млрд лет назад [Howard et al., 2011]. Источниками алюмосиликокластики для них являлись, скорее всего, геохимически зрелые породы Северо-Австралийского кратона.

Геохимическая характеристика объектов

Минимальное содержание Th устанавливается в метапелитах раннего архея Западной Гренландии (в среднем 2.41 г/т), тогда как максимальное

(до 29.93 г/т в среднем) – в метаосадочных породах домена Фаулер кратона Гавлер. Наиболее низкие величины для La установлены в метатерригенных породах района Камбалда (в среднем 11.21 г/т, см. табл. 1), а наиболее высокие – в метатерригенных породах кратона Гавлер (до 58.43 г/т в среднем). Минимальные содержания Sm, Eu и Gd характерны для метатерригенных пород района Камбалда (соответственно 2.52, 0.87 и 2.64 г/т в среднем). Максимальные величины для Sm и Eu установлены в породах кратона Гавлер (соответственно 10.07 и 1.76 г/т), а для Gd – в метапелитах серии Претория (в среднем 6.86 г/т). Наиболее низкое значение среди рассчитанных средних содержаний Yb (1.46 г/т) получено для высокоглиноземистых гнейсов кольской серии, максимальное значение – для гнейсов комплекса Бит Бридж пояса Лимпопо (см. табл. 1). Средние величины $(La/Yb)_N$ в метатерригенных породах исследованной выборки изменяются от 4.49 (район Камбалда) до 26.13 (домен Фаулер кратона Гавлер). Значения $Eu/Eu^*_{\text{среднее}}$ варьируют от 0.63 (серия Претория) до 1.11 (район Камбалда).

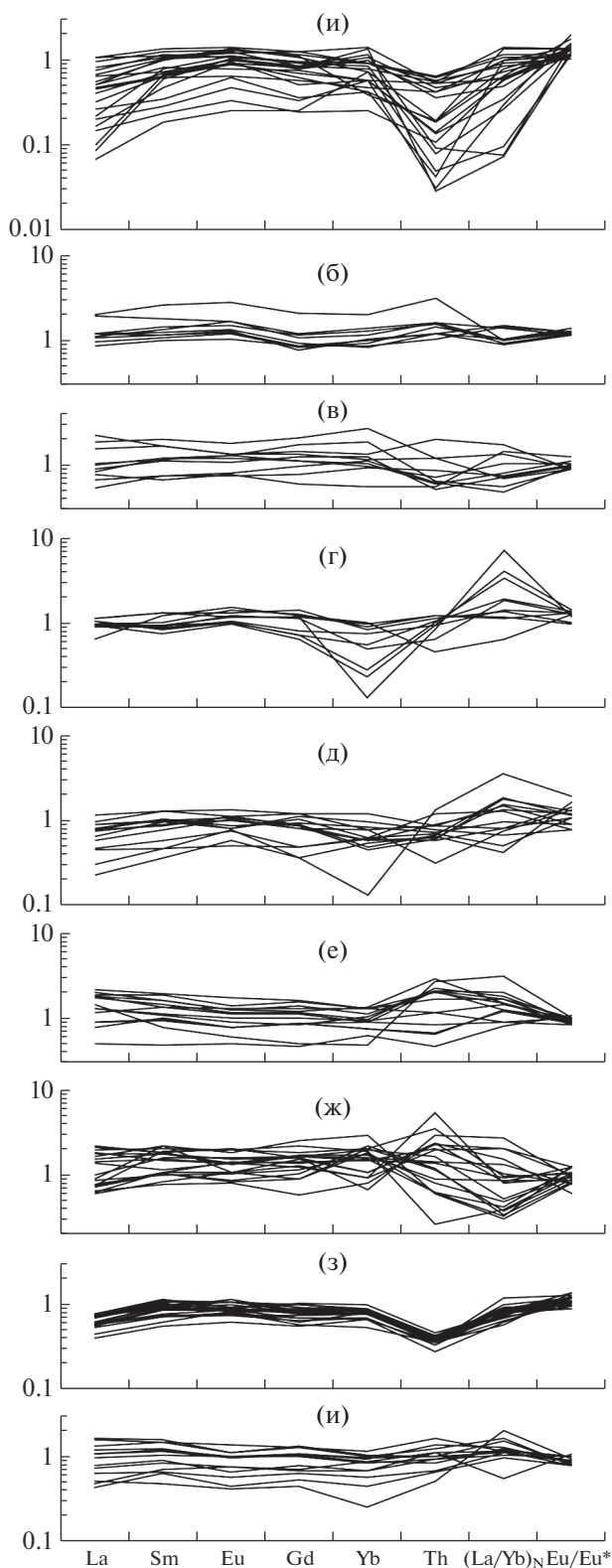
Нормирование La, Sm, Eu, Gd, Yb и Th, а также значений $(La/Yb)_N$ и Eu/Eu^* в индивидуальных образцах на средний архейский аргиллит [Condie, 1993] позволило выделить несколько типов их распределения (рис. 4).

Так, в метапелитах Исуа и Акилиа содержание Th заметно ниже, чем в среднем архейском аргиллите, а $(La/Yb)_N$ характеризуется меньшими величинами. Содержание лантаноидов в этих метапелитах, как правило, тоже низкое [Condie, 1993].

Метатерригенные породы серий Джордж Крик (блок Пилбара) и надсерии Витватерсранд (формации K8, Бусенс, Рудерпорт и Пактаун) по содержанию Th, лантаноидов и величинам отношений $(La/Yb)_N$ и Eu/Eu^* вполне сопоставимы со средним архейским аргиллитом [Condie, 1993]. В целом близки среднему архейскому аргиллиту высокоглиноземистые гнейсы кольской серии, однако для них характерны вариации содержания Yb и величины $(La/Yb)_N$. Примерно такие же особенности присущи гнейсам Намрес Восточной Финляндии.

Метатерригенные породы серии Гарвиц характеризуются широкими вариациями содержания Th, то же наблюдается в метапелитах канского комплекса, причем в последних заметно варьируют значения $(La/Yb)_N$. В метатерригенных породах Ва-Лавра содержание La немного ниже, а Th – заметно ниже, чем в среднем архейском аргиллите [Condie, 1993].

Наконец, в метатерригенных породах ладожской серии величины содержания большинства рассматриваемых элементов, за исключением Yb и отношения Eu/Eu^* , вполне сопоставимы со



средним архейским аргиллитом [Condie, 1993], в то время как значения $(La/Yb)_N$ могут быть как несколько выше, так и несколько ниже архейского аргиллита.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде чем перейти к обсуждению, следует рассмотреть ряд принципиальных вопросов: 1) существовали ли реки в раннем докембрии и каковы были их характеристики? 2) каким был состав питающих провинций раннего докембрия, как они эволюционировали и отличались ли от провинций более поздних эпох? 3) отражена ли эволюция химического состава магматических пород во времени в составе продуктов их размыва и, следовательно, в положении фигуративных точек на рассматриваемых нами диаграммах? Вероятно, вопросов может быть и больше, но прежде всего остановимся на этих.

Реки раннего докембрия

Докембрийские аллювиальные системы, отложения которых накапливались в отсутствие наземной растительности, обычно считаются сходными по своим основным характеристикам с более молодыми по возрасту речными системами аридных зон [Schumm, 1968; Cotter, 1978; Corenblit, Steiger, 2009; Gibling et al., 2014; Santos, Owen, 2016 и др.]. В соответствии с представлениями большинства специалистов, раннедокембрийские аллювиальные системы состояли из множества разветвленных/переплетающихся относительно мелководных русел значительной ширины, которые быстро меняли свое положение в пространстве. Они быстро наполнялись водой и значительно увеличивались в размерах при паводках, так как прочность берега вследствие слабой связанности частиц осадка была весьма небольшая. Это приводило к доминированию поверхностного, или площадного, стока [Bridgland et al., 2014]. Руслу разветвленных речных систем характеризовались высокой величиной отношения ширины к глубине, варьирующей от 200 : 1 до 1000 : 1 [Cotter, 1978; Fuller, 1985; Els, 1990; Bridg-

Рис. 4. Распределение некоторых лантаноидов и Th, нормированных по среднему архейскому аргиллиту [Condie, 1993], и значений $(La/Yb)_N$ и Eu/Eu^* в метатерригенных породах (метаалевропелитах).

а – ассоциации Исуа и Акилиа, Западная Гренландия; б – серия Джордж Крик, блок/кратон Пилбара, Западная Австралия; в – надсерия Витватерсранд, кратон Каапвааль, Южная Африка; г – кольская серия, Балтийский щит; д – парагнейсы Нармес, восток Финляндии; е – серия Гарвиц, Саскачеван, Южная Канада; ж – канский метаморфический комплекс, Канский блок, Восточный Саян; з – пояс Ва-Лавра, Гана; и – ладожская серия, Северное Приладожье.

land et al., 2014; Santos, Owen, 2016]. Отложения подобных речных систем обычно характеризуются незначительным объемом тонкозернистых осадков⁵, а большинство сформировавшихся фациальных ассоциаций контролировались в основном нагруженными обломочным материалом потоками [Winston, 1978; Røe, 1987; Hjellbakk, 1997; Sønderholm, Tirsgaard, 1998; Long, 2006, 2011 и др.; Williams, Foden, 2011; Marconato et al., 2014; Santos et al., 2014; Santos, Owen, 2016]. В то же время в недавних работах [Ielpi et al., 2017, 2018] обосновываются представления о том, что в протерозое, наряду с разветвленными речными системами, существовали и глубокие реки с соотношением ширины и глубины русел таким же, как у фанерозойских аналогов.

Аллювиальные отложения известны в разрезах палеоархея (3.6–3.2 млрд лет назад) [Long, 2019 и ссылки в этой работе]. Так, в Западной Австралии на кратоне Пилбара в нижней части разреза палеоархея описаны по крайней мере четыре интервала, сложенных, предположительно, подобными образованиями [Bridgland et al., 2014]. В Южной Африке на Каапваальском кратоне аллювиальные и сходные с ними образования такого же возраста присутствуют в составе серий Онвервахт и Фиг Три. В активных тектонических обстановках зеленокаменных поясов в это же время и позднее формировались аллювиальные конусы выноса, сложенные конгломератами, или фэново-дельтовые ассоциации [Mueller, Dimroth, 1987; Mueller, Corcoran, 1998; Corcoran, Mueller, 2004 и др.]. Местами такие последовательности переходят в дистальные галечниковые или песчаные отложения разветвленных речных равнин, но более типичными являются переходы от конусов выноса к мелководно-морским отложениям [Eriksson, 1978; Fedo, Eriksson, 1996; Pickett, 2002; Eriksson et al., 2006].

В мезоархее (3.2–2.8 млрд лет назад) количество ядер и размеры их кратонов увеличились. На кратоне Пилбара предположительно аллювиальные образования этого возраста установлены среди отложений серии Джордж Крик, а также в разрезах формаций Лалла Рух, Москито Крик

и др. В Южной Африке они известны в разрезах серии Модис. В составе серий Центрального Ранда, Понгола и ряда других последовательностей выявлены песчаные и конгломератовые отложения разветвленных и/или переплетающихся речных равнин [Els, 1998; Eriksson et al., 2006; Long, 2019 и ссылки в этой работе].

Неоархейские (2.8–2.5 млрд лет назад) аллювиальные образования известны в Южной Африке (надсерия Вентерсдорп, серия Шамвиан и др.), в Северной (формации Бьюли Ривер/Рapidс, Джексон Лейк, Кескарах и др.) и Южной Америке, а также в Австралии (серии Фортескью, Блэк Флэг и др.). Как правило, это отложения конусов выноса и разветвленных и/или переплетенных рек. Накопление их происходило в рифтовых структурах, сдвига-раздвиговых и предгорных бассейнах.

Образование крупных кратонов и суперконтинента Кенорленд в неоархее–палеопротерозое способствовало формированию круглогодичных многорусловых речных систем [Eriksson et al., 2006]. Именно в это время, как полагают многие, окончательно сформировался “типично докембрийский аллювиальный стиль”, характеризовавшийся преобладанием в составе речных систем весьма крупных, обладавших постоянным устойчивым водотоком переплетающихся неглубоких русел [Eriksson et al., 1998]. Ширина таких систем достигала 150 км и более [Schreiber, Eriksson, 1992; Eriksson et al., 2006].

Как было показано в работе [Long, 2011], анализ архитектуры докембрийских последовательностей позволяет идентифицировать в них отложения 12 из 16 типов рек, описанных Э. Майлом [Miall, 1996]. По более поздней оценке Д. Лонга [Long, 2019], в разрезах архея примерно треть всех задокументированных аллювиальных образований приходится на долю отложений “мелководных гравийных рек”, по классификации [Miall, 1996]. Отложения “гравийных рек” с обломочными потоками и постоянных круглогодичных “песчаных рек” составляют в сумме до 36% объема докембрийских аллювиальных образований; примерно 12% приходится на отложения “покровных песчаных аллювиальных систем”, 8% — на долю отложений “глубоких гравийных рек”. Присутствие прослоев тонкозернистых и глинистых пород среди песчано-гравийных отложений является, скорее всего, следствием приливных процессов или результатом накопления осадков в озерных и сходных с ними обстановках и не считается доказательством существования в докембрии меандрирующих рек.

Таким образом, в раннем докембрии одним из основных агентов транспортировки обломочного, в том числе тонкозернистого и глинистого материала с континентов в конечные водоемы стока

⁵ В обзоре додевонских аллювиальных систем [Fuller, 1985] подчеркнута возможность удаления из них глинистого материала эоловыми процессами. Однако значительная мощность тонкозернистых и глинистых осадков, сохранившихся в дистальных частях многих раннедокембрийских бассейнов (например, глинистые интервалы мощностью 1–2 км описаны в бассейне, выполненном отложениями серии Претория, ~2.3–2.1 млрд лет, Южная Африка [Eriksson et al., 2001]), дает основание предполагать, что в области седиментации перемещение реками такого материала преобладало над дефляцией [Eriksson et al., 2006]. По мнению Д. Лонга [Long, 2019], тонкозернистые образования в архейских аллювиальных отложениях — это преимущественно алевроиты, накапливавшиеся в основном в озерных, а не в пойменных обстановках.

выступали реки. На основании анализа некоторых геохимических параметров докембрийских тонкозернистых пород (метапелитов и метаалевропелитов), присутствующих в разрезах аллювиальных или мелководно-морских (а иногда, вероятно, и глубоководных турбидитовых) последовательностей этого возраста, можно попытаться реконструировать категории рек, транспортировавших такой материал.

Здесь важно также иметь в виду, что состав прибрежно- и мелководно-морских осадков в значительной мере сходен с составом донных отложений приустьевых частей рек, поставляющих в море обломочный материал. Названные фациальные области, в соответствии с представлениями А.П. Лисицына [1994 и др.], принадлежат к т.н. маргинальным фильтрам — поясам шириной от сотен метров до сотен километров, в пределах которых происходит смешение речных и морских вод. Изменения уровня океана, приливно-отливные, сгонно-нагонные, вдольбереговые и другие течения способствуют перемещению осадочного материала маргинальных фильтров на шельфы [Гордеев, Лисицын, 2014 и др.]. В результате шельфовые осадки в некоторой (а иногда и в существенной) степени наследуют литогеохимические характеристики транспортируемого реками взвешенного материала.

Питающие провинции раннего докембрия

Авторы многотомной монографии [Магматические ..., 1983—1988] выделяют в истории Земли несколько стадий тектономагматической эволюции: 1) “лунную” (стадия первичной коры), более 3.8 млрд лет назад; 2) нуклеарную, 3.8—2.5 млрд лет назад; 3) кратонную, 2.5—1.5 млрд лет; 4) континентально-океаническую, 1.5 млрд лет назад — настоящее время.

На “лунной” стадии валовый состав коры был близок к базальтовому—андезиобазальтовому. Для нуклеарной стадии характерен ареальный магматизм, изверженные породы нормальной щелочности, широкое развитие коматиитов — пород, принципиально нехарактерных для постархей, гранитогнейсов и “серых гнейсов”, мигматитов и чарнокитов. Авторы указанной монографии предполагают, что на этой стадии появились крупные массивы основных магматических пород, гранитов-рапакиви и щелочных гранитов, но преобладали плагиограниты. Однако данные последних лет показывают, что к концу архея (неоархей) формируются существенные объемы “настоящих калиевых гранитоидов”, в то время как общий объем пород ТТГ-ассоциаций в протерозое, по сравнению с археем, снижается, а величина отношения $(La/Yb)_N$ в протерозойских породах уменьшается [Laurent et al., 2014; Dhuime et al., 2015; Tang et al., 2016; Condie, 2018; Moyen,

Laurent, 2018 и др.]). В конце “лунной” стадии образуются габбро-анортозиты.

Для следующей стадии характерны кратоны с платформенными чехлами и зонами внутрикратонной активизации. Роль гранитогнейсов, мигматитов, чарнокитов, анортозитов и гранитов-рапакиви в течение этой стадии существенно увеличивается, появляются базальт-долеритовые траппы, а в конце стадии — ультраосновные щелочные породы с карбонатитами, кимберлиты, альпинотипные гипербазиты и офиолиты. Для этой стадии значительна роль дифференцированных перидотит-пироксенит-норитовых массивов, а ближе к концу ее заметное распространение получают щелочные граниты и габброиды.

Примерно таких же представлений придерживается и Н.Л. Добрецов [2010], по мнению которого в ранней истории нашей планеты можно выделить следующие интервалы (рис. 5): 1) 4.55—4.0...3.9 млрд лет, соответствующий хадею; 2) 4.0...3.9—2.7 млрд лет, архей⁶; 3) 2.7...2.6—1.8 млрд лет, палеопротерозой; 4) 1.7—0.7 млрд лет, мезопротерозой, первая половина неопротерозоя. В течение первого интервала происходило интенсивное остывание мантии, исчезновение магматического “океана” и начиналось формирование коры, в том числе, возможно, и континентальной. Второй интервал — образование первичной гранитной коры, распространение “серых гнейсов” и пород ТТГ-ассоциаций; к его окончанию сформировалось от 30 до 50% объема континентальной коры. Примерно 2.7 млрд лет назад появились значительные объемы К-гранитов и щелочных пород. Третий интервал на большинстве континентов ознаменовался формированием до 90% объема континентальной коры. Для четвертого интервала, напротив, была характерна низкая эндогенная активность.

В соответствии со сказанным выше, в отечественной литературе традиционно считается, что относительная распространенность петрографически различных пород континентального блока изменяется от докембрия к настоящему времени [Холодов, 1975, 2006 и др.]. Предполагается также, что геохимические особенности континентального стока, контролируемые соотношением объемов и площадей распространения различных магматических пород в пределах водосборных бассейнов, также во времени менялись. Это позволяет наметить несколько этапов эволюции состава пород питающих провинций (см. рис. 5). На первом (~4.0—3.0 млрд лет назад) в областях

⁶ Следует отметить, что граница архея и протерозоя принимается Н.Л. Добрецовым иначе, чем это установлено в Общей стратиграфической шкале России (2.5 млрд лет, [Общая стратиграфическая ..., 2002]) и Международной стратиграфической шкале (<https://stratigraphy.org/icschart/ChronostratChart2020-03.pdf>, дата обращения 03.08.2020).

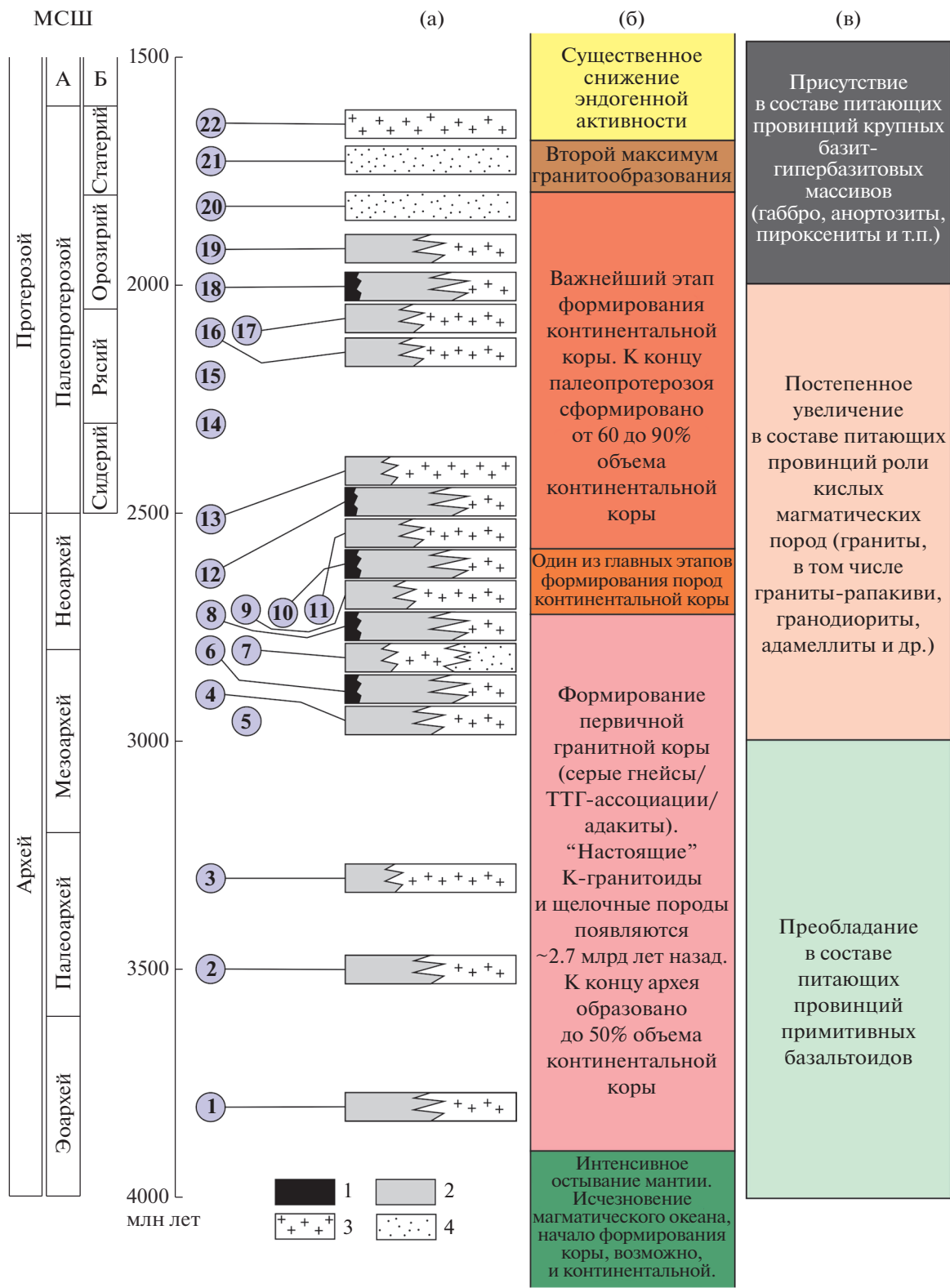


Рис. 5. Положение рассмотренных в настоящей работе объектов в Международной стратиграфической шкале докембрия и возможный состав протолитов (а), основные события архея–палеопротерозоя (б), по [Добрецов, 2010], и предполагаемая эволюция состава питающих провинций (в), по [Холодов, 1975, 2006]. Состав протолитов: 1 – ультрамафиты; 2 – основные вулканиты; 3 – гранитоиды; 4 – осадочные образования. Цифры в кружках – объекты исследования, те же, что на рис. 3. МСШ – Международная стратиграфическая шкала, А – мезопротерозой, Б – калимий.

сноса преобладали примитивные базальтоиды. Второй этап (3.0–2.0 млрд лет) характеризовался преобладанием на палеоводосборах гранитоидов⁷ (гранитов, аляскитовых их разновидностей, гранитов-рапакиви и ассоциирующих с ними базит-гипербазитовых пород, гранодиоритов/тоналитов/трондьемитов, адамеллитов и др.). В протерозое на континентах зародилась осадочная оболочка, и кроме разнообразных магматических и метаморфических пород с его начала в осадконакопление вовлекаются и продукты эрозии осадочных пород (появляются и постепенно начинают преобладать т.н. породы литогенные/“second cycle”). Третий этап (2.0–1.0 млрд лет) ознаменован формированием крупных массивов гранитов-рапакиви, габбро, анортозитов, пироксенитов и других основных магматических пород на фоне в целом снижения магматической активности в пределах кратонов.

При анализе приведенных выше данных важно иметь в виду, что, как отмечено и В.Н. Холодовым [2006, с. 594], с течением времени происходит усложнение строения и состава питающих провинций, при этом “...каждая последующая фаза магматизма добавляет новую порцию минералого-геохимических компонентов к прежней совокупности минералов и химических элементов, но в корне не меняет ее [разрядка авторов данной статьи]. Поэтому и состав суммарного континентального стока на каждом новом этапе развития, по-видимому, не менял свою структуру коренным образом, а только приобретал новый минералого-геохимический акцент”. По всей видимости, из представлений об отсутствии коренных изменений континентального стока на каждом новом этапе развития нашей планеты правомерен вывод о том, что, например, гранито/гнейсо-зеленокаменные области/пояса (ультраосновные и основные вулканы, вулканогенно-осадочные образования и гранитные интрузивы), возникнув и играя громадную роль в архее, на всем протяжении последующей истории при выведении на дневную поверхность и размытые (неважно — в конце протерозоя или в девоне, а также в юре) поставляли в области осадконакопления достаточно однотипную алюмосиликокластику. Иными словами, подвергаясь в какое-то время эрозии, такие области, или области доминирования гранито-гнейсов, генерировали обломочный ма-

териал, основные геохимические характеристики которого принципиально не отличались.

По представлениям А.Б. Ронова [1993], эволюция состава питающих провинций от архея до настоящего времени выражена в последовательном сокращении площади выходов основных эффузивов и росте площади осадочных пород. Площадь выходов гранитов на дневную поверхность достигла максимума в конце среднего протерозоя. Затем она постепенно сокращалась вследствие перекрытия кристаллического фундамента платформенным чехлом. В соответствии с этим, с течением времени определенным образом менялся и состав терригенных продуктов выветривания, поступавших из областей эрозии континентов в конечные водоемы стока.

В результате анализа обширных аналитических данных А.Б. Роновым было показано, что химический состав основных и ультраосновных пород, а также гранитоидов в дофанерозое последовательно меняется от более древних к более молодым. Во всех типах магматических пород наблюдается снижение концентраций MgO и содержания Ni, Co и Cr. Уменьшается также величина Ni/Co, но имеет место рост содержания K₂O и накопление Rb, легких лантаноидов (и вообще РЗЭ), Th, U, Hf, Nb, Pb и ряда других элементов. В то же время концентрация Na, Ca, Sr, Ba, Al, Ti, Fe и V в разных типах магматических пород меняется противоположным образом (так, например, среднее содержание Na₂O в базальтах от раннего архея к концу протерозоя растет, а в глинистых породах этот параметр растет от раннего архея до раннего протерозоя, а затем снижается; в гранитах величина Na₂O_{среднее} снижается от раннего архея к раннему протерозою, а в гранитах среднего и позднего протерозоя она примерно сопоставима с той, что характерна для среднего и позднего архея). Величина La/Yb в гранитоидах с течением времени уменьшается, а в базальтах — увеличивается. По мнению А.Б. Ронова [1993, с. 98], “...величина La/Yb в базальтах и гранитах со временем сближается. Это происходит в условиях сокращения площади выходов первых и роста площади вторых в областях сноса”.

Эволюция состава магматических пород и положение фигуративных точек продуктов их размытия на диаграммах (La/Yb)_N–Eu/Eu и (La/Yb)_N–Th*

По приведенным в работе А.Б. Ронова [1993, табл. 25] средним содержаниям лантаноидов в коматиитах, основных эффузивах и гранитоидах раннего архея (3.80–3.40 млрд лет), среднего и позднего архея (3.40–2.50 млрд лет), а также раннего протерозоя (2.50–1.60 млрд лет) мы рассчитали значения (La/Yb)_N и Eu/Eu* и нанесли фигу-

⁷ На основании вариаций величины Cr/Th и ряда других индикаторных отношений редких и рассеянных элементов в докембрийских пелитах кратона Каапвааль, авторы работы [Condie, Wronkiewicz, 1990] показали, что в его ранне-докембрийской истории было как минимум четыре этапа гранитоидного магматизма (3.55–3.45, 3.30–3.20, ~3.00 и 2.80–2.55 млрд лет назад). В то же время некоторые исследователи считают формирование столь древних гранитоидов спецификой этого континентального блока и не склонны распространять выявленную закономерность на другие раннедокембрийские кратоны.

ративные точки названных магматических пород на диаграмму $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$, на которой оконтурены области составов алевропелитовой взвеси различных категорий современных рек (рис. 6а)⁸. Это позволило увидеть, что точки с усредненными составами средне-позднеархейских и раннепротерозойских коматиитов, а также основных пород архея и раннего протерозоя локализованы в области составов поверхностных донных осадков приустьевых частей современных рек категории 4, т.е. тех, которые питаются продуктами эрозии вулканических областей. Исключением являются только коматииты раннего архея, но их средний состав достаточно близок к указанной области. Точки со средними составами гранитоидов среднего—позднего архея и раннего протерозоя тяготеют к области донных осадков приустьевых частей современных рек категории 3 (реки, дренирующие метаморфические и/или магматические террейны). Несколько выше, но довольно близко к этой области, располагается и точка со средним составом гранитоидов раннего архея.

Данные о содержании РЗЭ в коматиитах архея, известково-щелочных базальтах, андезитах и кислых вулканитах раннего и позднего архея, раннего, среднего и позднего протерозоя, а также в гранитах и породах тоналит-трондьемит-гранитных ассоциаций архея и протерозоя можно найти также в публикации [Condie, 1993]. Однако фигуративные точки с составами гранитоидов и пород ТТГ-ассоциаций архея и протерозоя, взятые из указанной сводки, на диаграмме $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ располагаются вне области, соответствующей алевропелитовой взвеси современных рек категории 3 (см. рис. 6б). В то же время подавляющее большинство (за исключением кислых вулканитов позднего протерозоя и андезитов раннего протерозоя) точек со средним составом базальтов, андезитов и кислых вулканитов тяготеет к области алевропелитовых осадков рек категории 4 (см. рис. 6б, в). Примерно так же распределены точки с усредненными составами всех перечисленных магматических пород-источников тонкой алюмосиликокластики на диаграмме $(La/Yb)_N - Th$ (см. рис. 6г, д). Архейские и раннепротерозойские коматииты и основные эффузивы (данные А.Б. Ронова) тяготеют к области 4, а фигуративные точки средне-позднеархейских и

раннепротерозойских гранитов располагаются в зоне перекрытия областей 1 и 3, при этом содержание Th в этих гранитах заметно выше, чем в раннеархейских гранитоидах. В поле 4 на диаграмме $(La/Yb)_N - Th$ локализованы и точки со средними составами коматиитов и известково-щелочных базальтов архея и раннего протерозоя (данные К. Конди); точки гранитов архея и протерозоя, а также ТТГ-ассоциаций протерозоя располагаются в зоне перекрытия областей 1 и 3 (и только точка со средним составом ТТГ-ассоциаций архея не относится ни к одной области данного графика). Показательно также, что точки со средними составами архейских и раннепротерозойских андезитов, кислых вулканитов и/или фельзитов, взятыми по К. Конди, на рассматриваемой диаграмме попадают в область 4 тонкозернистых осадков, образованных за счет размыва пород вулканических террейнов.

На основании результатов проведенного анализа можно считать, что изменения Th-РЗЭ-систематики основных типов магматических пород архея и раннего протерозоя, по-видимому, не влияют на особенности расположения фигуративных точек с составами продуктов их размыва на диаграммах $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ и $(La/Yb)_N - Th$, а также на других диаграммах, на которых показаны области составов поверхностных донных осадков приустьевых участков современных рек различных категорий. Другими словами — если питающие провинции сложены базальтами (или кислыми вулканитами) раннего архея, базальтами раннего протерозоя или андезитами позднего протерозоя (т.е. размыв будет затрагивать некие “вулканические террейны”), то фигуративные точки продуктов размыва таких палеоводосборов (алевропелитовой взвеси) будут локализованы преимущественно или исключительно в области составов тонкой взвеси рек категории 4.

*Распределение фигуративных точек
метатерригенных пород на диаграммах
 $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ и $(La/Yb)_N - Th$*

Фигуративные точки метатерригенных пород нашей выборки (всего 22 объекта) на диаграмме $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ располагаются во всех классификационных областях, в том числе в области 3, соответствующей тонкой алевропелитовой взвеси рек, питающихся продуктами размыва пород магматических и метаморфических террейнов (рис. 7а). Некоторая часть точек не попадает ни в одну из четырех областей диаграммы.

Индивидуальные точки эоархейских метапелитов Западной Гренландии распределяются преимущественно в области составов тонкой алевропелитовой взвеси рек категории 4, дренирующих

⁸ Здесь мы основываемся на представлениях о том, что ряд редких и рассеянных элементов, в том числе и РЗЭ, слабо растворимы в воде и вследствие этого почти без потерь перемещаются из областей сноса в бассейны осадконакопления [Taylor, McLennan, 1985; McLennan, 1989; Condie, Wronkiewicz, 1990; Cullers, 1995; Inorganic..., 2003 и др.], и что разные магматические породы характеризуются разными ассоциациями редких и рассеянных элементов и их отношениями [Интерпретация ..., 2001; Юдович, Кетрис, 2011 и др.].

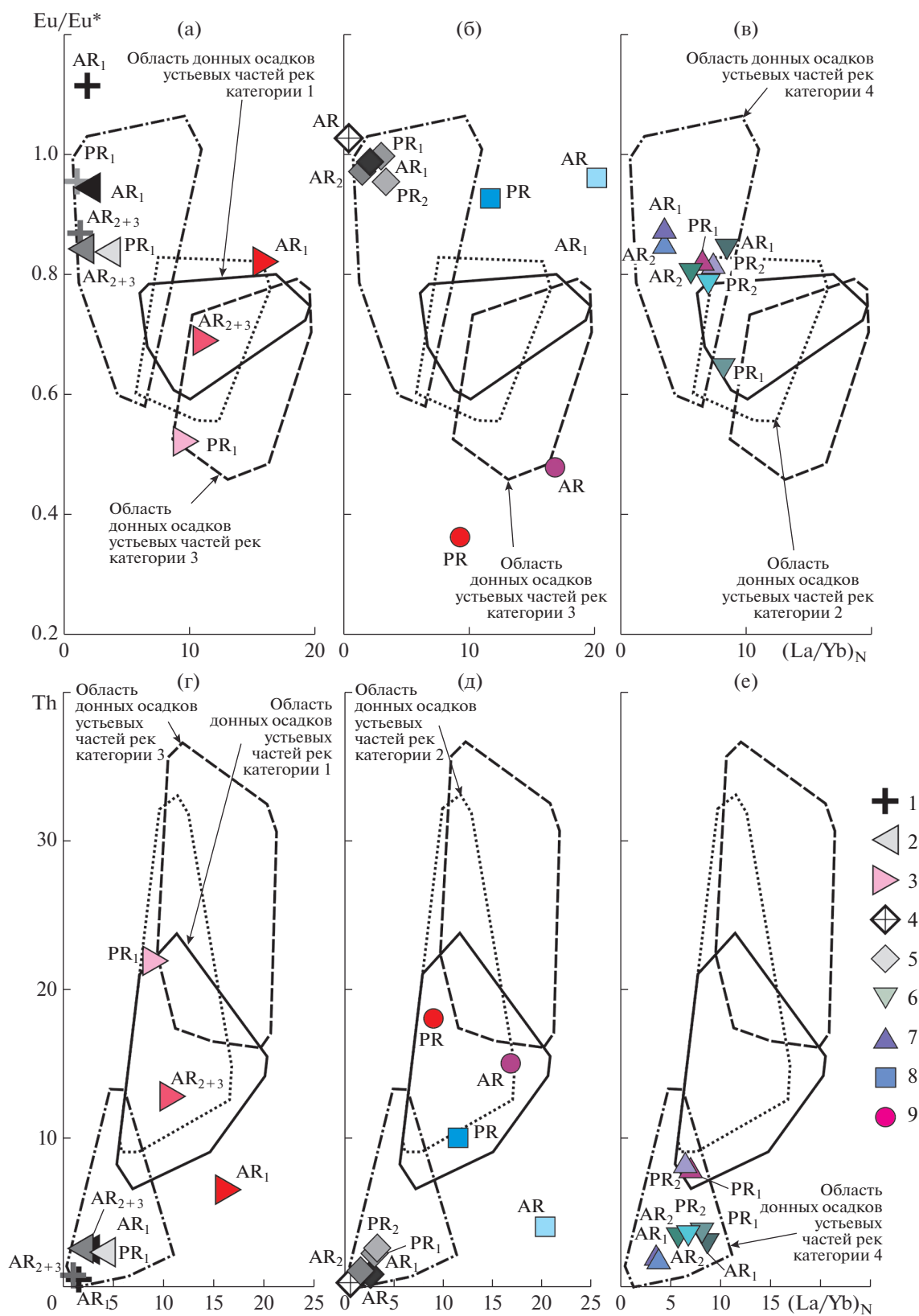


Рис. 6. Распределение точек с усредненным составом магматических пород архея и протерозоя на диаграммах $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ и $(La/Yb)_N - Th$. а, г — средние составы, по данным [Ронов, 1993]: 1 — коматииты; 2 — основные эффузивы; 3 — гранитоиды. AR_1 — ранний архей (3.8–3.4 млрд лет назад); AR_{2+3} — средний и поздний архей (3.4–2.5 млрд лет); PR_1 — ранний протерозой (2.5–1.6 млрд лет); б, в, д, е — то же, по данным [Condie, 1993]: 4 — коматииты; 5 — базальты известково-щелочные; 6 — андезиты; 7 — кислые вулканииты; 8 — породы ТТГ-ассоциаций; 9 — граниты. AR_1 — ранний архей (>3.5 млрд лет); AR_2 — поздний архей (3.5–2.5 млрд лет); PR_1 — ранний протерозой (2.5–1.8 млрд лет); PR_2 — средний протерозой (1.8–1.6 млрд лет).

водосборы с преобладанием вулканических пород. Часть точек с составами, показывающими значения $Eu/Eu^* > 1.05$, тем не менее, также могут быть отнесены к этой области, поскольку в них значения $(La/Yb)_N < 8.00$.

Палеоархейские метатерригенные породы комплекса Бит Бридж (пояс Лимпопо) на диаграмме характеризуются значительным разбросом фигуративных точек, располагающихся в областях взвеси рек категорий 1, 2 и 4 или вне их.

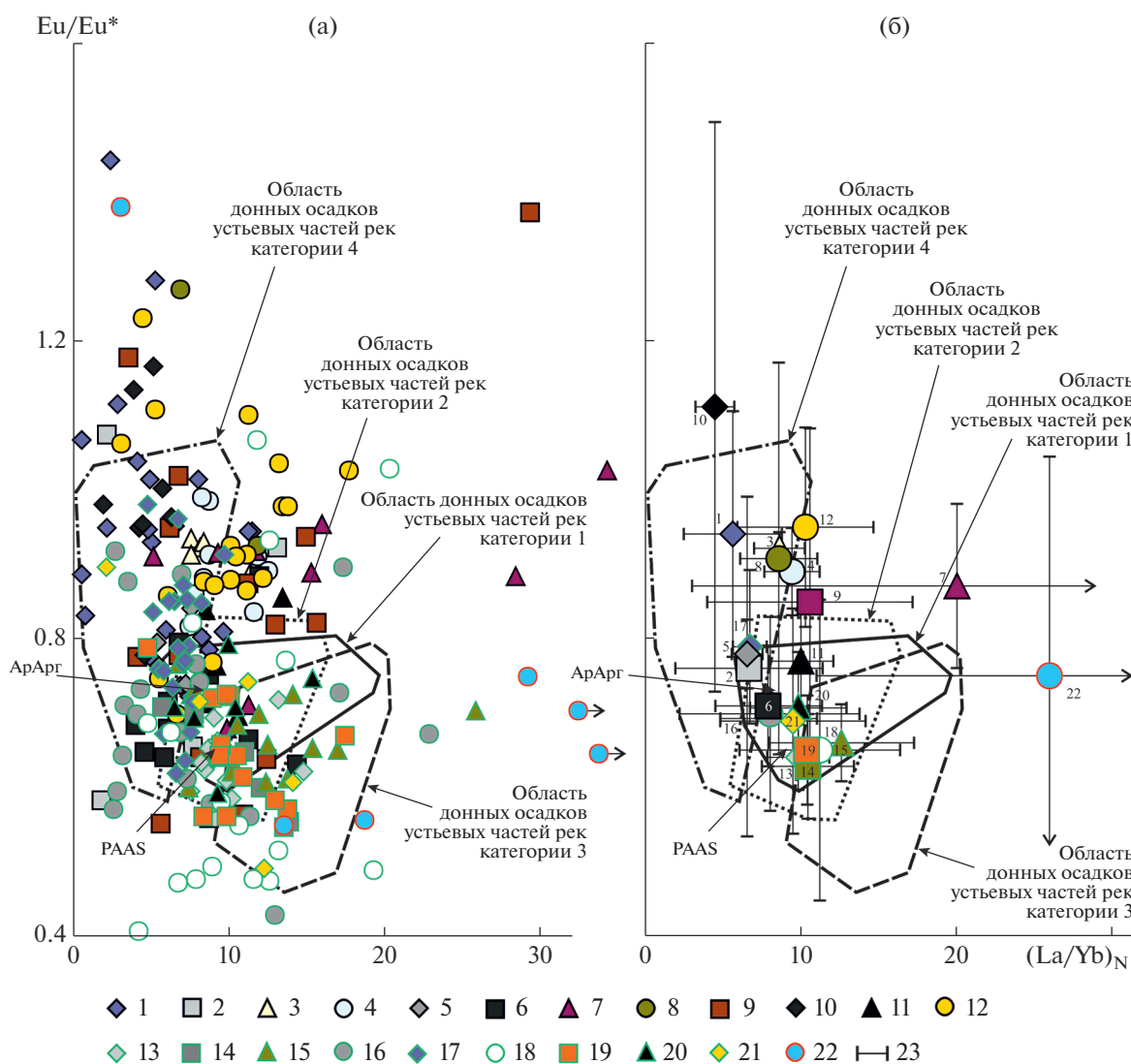


Рис. 7. Распределение фигуративных точек с составами индивидуальных образцов (а) и точек с усредненным составом (б) метатерригенных пород (метаалевропелитов) различных объектов на диаграмме $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$. ArArg — средний архейский аргиллит, по [Condie, 1993], PAAS — средний постархейский австралийский сланец, по [Taylor, McLennan, 1985]. Условные обозначения 1–22 см. рис. 3; 23 — величины стандартного отклонения.

Точки с составами метаосадочных пород серии Модис (палеоархей) в основном локализованы в области взвеси рек категории 4. Метатерригенные породы мезоархейской серии Джордж Крик блока Пилбара находятся в этой же области или рядом с ней. Примерно так же распределены на диаграмме $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ фигуративные точки метапелитов мезоархейской серии Мозаан, однако некоторые из них располагаются в зоне перекрытия областей, соответствующих взвесям рек категорий 1, 2 и 4.

Преобладающая часть точек метаосадочных пород надсерии Витватерсранд (мезоархей) сосредоточена в области 4. В то же время одна (из десяти точек метапелитов) располагается в зоне перекрытия взвесей рек категорий 1 и 2, две — в зоне перекрытия взвесей рек категорий 1, 2 и 3, а одна не соответствует ни одной из классификационных областей диаграммы $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$.

Распределение фигуративных точек высокоглиноземистых гнейсов мезо-неоархейской (?) кольской серии на диаграмме имеет бессистемный характер. Неоархейские метатерригенные породы Западной Карелии распределены во всех четырех областях данной диаграммы, а также находятся за их пределами. Сходный характер распределения имеют и точки с составами высокоглиноземистых гнейсов Нармес (неоархей) Восточной Финляндии.

Метаосадочные породы неоархея района Камбалда (Западная Австралия), напротив, в основном тяготеют к области взвеси рек категории 4; так же ведут себя фигуративные точки палеопротерозойских метапелитов пояса Ва-Лавра.

Метатерригенные породы неоархейского Онтского зеленокаменного пояса (Юго-Восточное Присянье) на диаграмме $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ тяготеют преимущественно к зоне перекрытия областей 1 и 2. К этой же зоне тяготеют и точки состава неоархейских метапелитов серии Рампур.

Большая часть фигуративных точек метаосадочных пород (преимущественно тонкообломочных турбидитов, сформированных вблизи континентального склона) неоархейской серии Йеллоунайф не принадлежит какой-либо определенной области. То же характерно и для высокоглиноземистых гнейсов палеопротерозойского (орозирий) комплекса Конглинг, кратон Янцзы.

Примерно половина точек с составами метапелитов серии Претория (палеопротерозой, рясий) располагается в зоне перекрытия областей 1 и 2, другая их часть — в зоне перекрытия областей 1, 2 и 3, а также в области тонкой взвеси рек категории 3 (реки, дренирующие магматические и/или метаморфические террейны).

Около двух третей общего количества точек с составами палеопротерозойских (рясий) метапелитов серии Гарвиц Южной Канады сосредото-

чено в зоне перекрытия областей 1, 2 и 3, а остальные точки тяготеют к зоне перекрытия областей 1, 2 и 4.

Фигуративные точки метатерригенных пород палеопротерозойского (рясий) канского метаморфического комплекса (Восточный Саян) в основном расположены в области составов взвеси рек категории 4. Заметно меньшее количество точек не принадлежат ни одной из областей диаграммы $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$, единичные — присутствуют в области взвеси рек категории 2 или в зонах перекрытия областей 1 и 3, а также областей 2 и 3.

Точки с составами метатерригенных пород палеопротерозойской (орозирий) ладожской серии распределяются примерно поровну и присутствуют в зоне перекрытия областей 1 и 2, а также в области взвеси рек категории 3 — дренирующих магматические и метаморфические комплексы.

Метатерригенные породы нижней амфиболит-мрамор-парагнейсовой толщи енисейского метаморфического комплекса Енисейского кряжа (палеопротерозой, орозирий) не образуют на графике $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$ какой-либо определенной локализации. Точки гнейсов и сланцев четвертой (парагнейсовой) толщи данного комплекса в основном тяготеют к зоне перекрытия областей с составами взвеси рек категорий 1 и 2.

Две из пяти фигуративных точек палеопротерозойских (статерий) метатерригенных пород кратона Гавлер (Южная Австралия) на диаграмме принадлежат взвеси рек категории 4, однако реальность подобной ситуации вызывает большие сомнения, поскольку для рассматриваемых образований в целом характерны наиболее высокое среднее содержание тория и самое высокое значение $(La/Yb)_N$ (см. табл. 1). Три оставшиеся фигуративные точки не принадлежат ни одной из классификационных областей диаграммы $(La/Yb)_N - Eu/Eu^*$.

Точки с усредненным составом метатерригенных пород и метапелитов различных объектов нашей выборки на диаграмме в основном тяготеют к области 4 (тонкой взвеси рек, дренирующих вулканические области), а также к зонам перекрытия областей 1 и 2, а также 1, 2 и 3 (см. рис. 7б). Точки со средними составами метаосадочных пород кольской серии и пород кратона Гавлер не попадают ни в одну классификационную область.

На диаграмме $(La/Yb)_N - Th$ точки с составами образцов метатерригенных пород также присутствуют во всех классификационных областях, и относительно небольшое их число располагается вне этих областей (рис. 8а). Точки эоархейских метапелитов ассоциаций Исуа и Акилиа Западной Гренландии на данном графике, так же как и

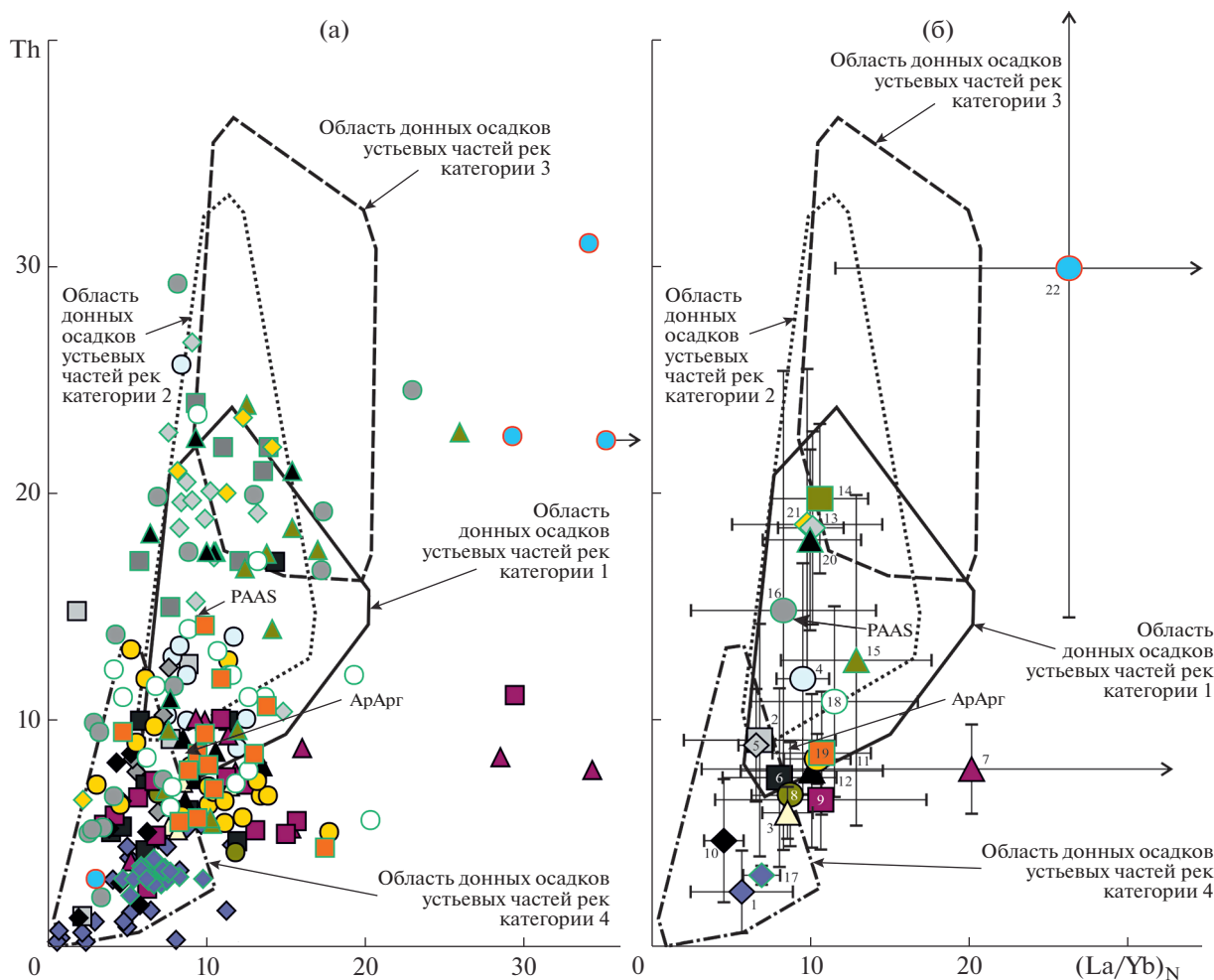


Рис. 8. Распределение фигуративных точек с составами индивидуальных образцов (а) и точек с усредненным составом (б) метатерригенных пород (метаалевропелитов) различных объектов на диаграмме $(La/Yb)_N$ -Th. Условные обозначения см. рис. 3, 7.

на диаграмме $(La/Yb)_N$ -Eu/Eu*, тяготеют к области составов тонкой взвеси рек категории 4. Метатерригенные породы пояса Лимпопо на диаграмме $(La/Yb)_N$ -Th не имеют какого-либо определенного распределения.

Фигуративные точки метатерригенных пород палеоархейской серии Модис на рассматриваемом графике в основном тяготеют к области донных осадков рек категории 4 (дренирующих вулканические области).

Метатерригенные породы серии Джордж Крик (мезоархей) на данном графике, в отличие от диаграммы $(La/Yb)_N$ -Eu/Eu*, располагаются в зоне перекрытия областей 1 и 2 (реки крупные и реки, питающиеся продуктами размыва преимущественно осадочных пород).

Точки метапелитов серии Мозаан (мезоархей) тяготеют к области 4 или располагаются рядом с ней. Примерно так же на диаграмме $(La/Yb)_N$ -Th

распределены точки метаосадочных пород надсерии Витватерсранд (мезоархей) и Западной Карелии (неоархей).

Примерно треть точек с составами высокоглиноземистых гнейсов кольской серии (мезо-неоархей?) локализована в зоне перекрытия областей 1 и 2. Из оставшихся (9 точек) одна — находится в области 4, а положение остальных пяти не соответствует ни одной из классификационных областей.

Практически все точки с составами высокоглиноземистых гнейсов Нармес Восточной Финляндии по содержанию Th соответствуют классификационной области 4, однако большинство их характеризуется более высокими, а не типичными для данной области значениями $(La/Yb)_N < 10$. В области 4 сосредоточены и все точки метаосадочных пород района Камбалда; то же, как было показано выше, характерно для этих точек на диаграмме $(La/Yb)_N$ -Eu/Eu*.

Неоархейские метатерригенные породы Онтского зеленокаменного пояса по уровню содержания Th и значениям $(La/Yb)_N$ тяготеют в основном к области состава тонкой взвеси крупных рек, и только одна из пяти точек находится в области 4.

Примерно треть всего количества точек с составами метатерридитов неоархейской серии Йеллоунайф на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Th располагается в области составов тонкой взвеси рек категории 4. Остальные точки не принадлежат какому-либо классификационным областям.

Метапелиты серии Рампур (неоархей) локализованы преимущественно в зоне перекрытия областей 1 – тонкая взвесь крупных рек и 2 – взвесь рек, питающихся продуктами размыва осадочных образований; та же картина, как было показано выше, наблюдается на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Eu/Eu*.

Примерно так же распределяются на графике $(La/Yb)_N$ –Th фигуративные точки метапелитов палеопротерозойских серий Претория и Гарвиц.

Точки с составами метатерригенных пород канского комплекса (рясий) в основном расположены в области 4, а также в зоне перекрытия областей 1 и 2. Примерно так же ведут себя точки с составами высокоглиноземистых гнейсов палеопротерозойского комплекса Конглинг. Преобладающая часть точек метатерригенных пород ладожской серии (орозирий) также тяготеет к зоне перекрытия областей 1 и 2, и несколько точек попадает в область 4.

Метапелиты палеопротерозойского пояса Вавла на графике $(La/Yb)_N$ –Th, так же как и на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Eu/Eu*, сосредоточены исключительно в области алевропелитовой взвеси рек категории 4.

Метатерригенные породы первой (амфиболит-мрамор-парагнейсовой) и четвертой (парагнейсовой) толщ палеопротерозойского енисейского метаморфического комплекса на графике $(La/Yb)_N$ –Th в основном сосредоточены в зоне перекрытия областей 1, 2 и 3. Такое распределение точек с составами пород данного комплекса является близким их распределению на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Eu/Eu*.

В распределении фигуративных точек метатерригенных пород кратона Гавлер (палеопротерозой, статерий) на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Th какой-либо определенной закономерности не наблюдается. Большая часть точек не попадает ни в одну классификационную область (рис. 9).

Точки с усредненным составом метатерригенных пород из различных объектов нашей выборки на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Th в основном располагаются в области 4, в зонах перекрытия этой области с областями 1 и 2 и собственно в зоне перекрытия областей 1 и 2. В область составов

алевропелитовой взвеси современных рек категории 3 (дренирующих магматические и/или метаморфические террейны) не попадает ни одна точка со средним составом. Фигуративная точка со средним составом метатерригенных пород кратона Гавлер располагается, так же как на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Eu/Eu*, вне контуров какой-либо классификационной области (см. рис. 8б).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На диаграммах $(La/Yb)_N$ –Eu/Eu* и $(La/Yb)_N$ –Th фигуративные точки с индивидуальными и усредненными составами изученных нами метаалевропелитов архея и раннего протерозоя в основном располагаются в пределах классификационных полей. Это позволяет думать, что субстраты-источники слагающей их тонкой алюмосиликокластики принципиально не отличались от тех, которые мы видим на поверхности нашей планеты сегодня⁹. Некоторая часть фигуративных точек индивидуальных образцов метаалевропелитов на диаграммах находится вне классификационных полей, однако это может быть связано как с метаморфической трансформацией первоначального распределения тория и лантаноидов, так и со спецификой палеоводосборов далекого геологического прошлого (о чем, на наш взгляд, свидетельствуют составы с высокими величинами Eu/Eu*).

Подавляющее большинство фигуративных точек как индивидуальных образцов, так и точек с усредненным составом метаосадочных пород в изученных нами объектах тяготеет к областям: 1 (тонкая алевропелитовая взвесь крупных рек), 2 (тонкая алевропелитовая взвесь рек, дренирующих в основном осадочные субстраты) и 4 (тонкая алевропелитовая взвесь рек, текущих по районам развития вулканических пород), а также к зоне перекрытия областей 1, 2 и 3. Собственно в области 3 (тонкая алевропелитовая взвесь рек, протекающих по магматическим и/или метаморфическим террейнам) фигуративных точек метаалевропелитов немного. Возможно, питающие провинции, в составе которых (скорее всего) заметную роль играли калиевые граниты, возникли только после формирования глобальной системы палеопротерозойских коллизионных орогенов – глобального события, связанного со становлени-

⁹ В самом общем виде этот вывод предполагает следующее: если в конце архея в определенном участке поверхности Земли реками размывался типичный набор архейских пород (коматииты, плагиограниты, кислые вулканы и др.), то начиная с конца протерозоя и по настоящее время на этом же или на каком-то другом участке земной поверхности мог размываться тот же набор архейских пород, но с “добавлением” иных, более молодых породных ассоциаций. Естественно, наиболее важны указанные соображения для тонкозернистых осадков рек категорий 3 и 4.

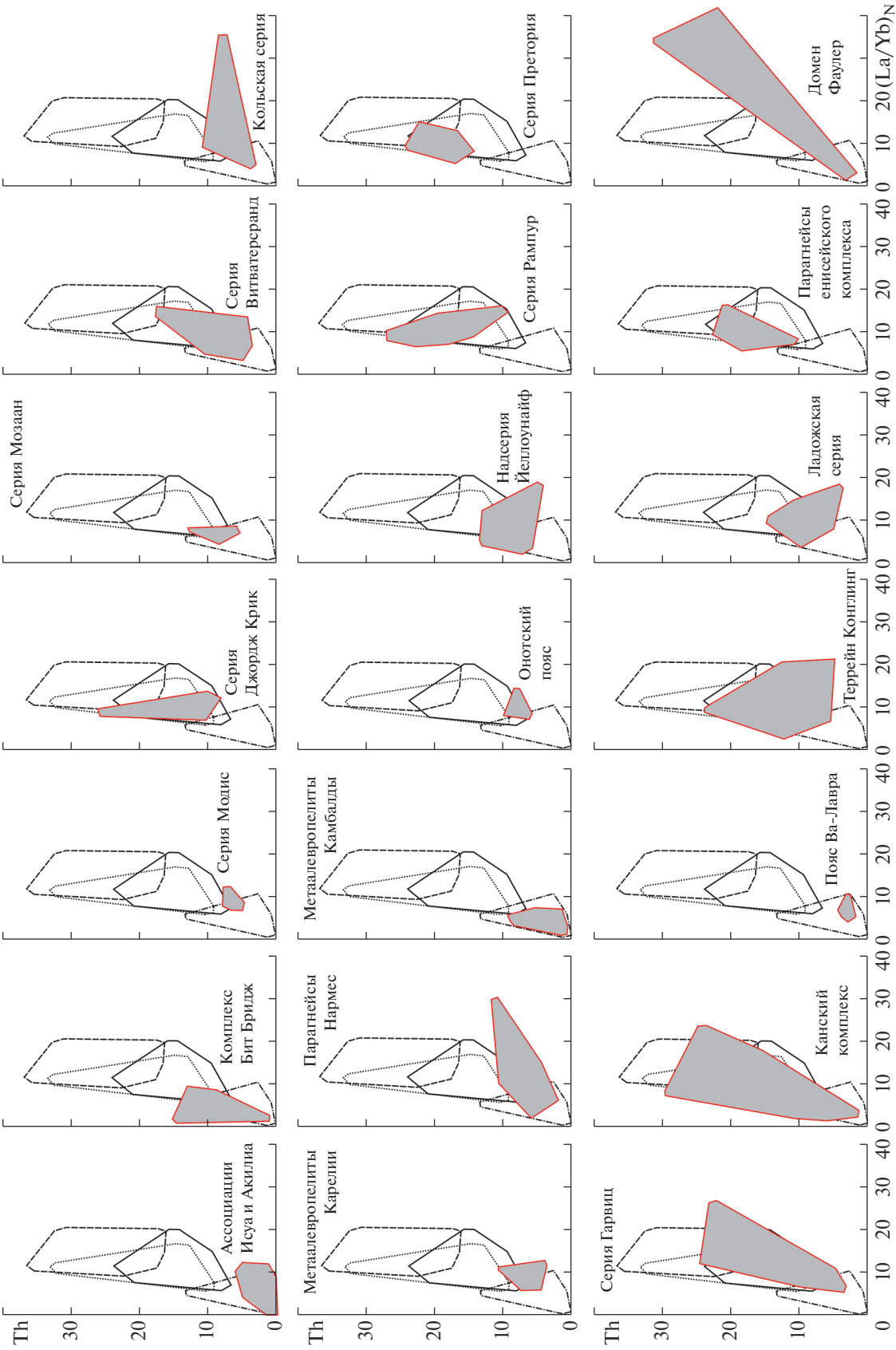


Рис. 9. Поля составов метатерригенных пород некоторых рассмотренных объектов на диаграмме $(La/Yb)_N$ –Th. Контуры областей осадков рек различных категорий те же, что на рис. 2.

ем первого суперконтинента (Коламбия) около 2.0–1.8 млрд лет назад. В нашей выборке к объектам такого типа могут принадлежать метапелиты кратона Гавлер с очень высокими величинами $(\text{La/Yb})_N$, а также, возможно, метапелиты енисейской серии. Это предположение, однако, нуждается в дополнительном обосновании фактическим материалом. В значительной мере оно подтверждается представлениями А.Б. Ронova о максимальном развитии гранитов на поверхности Земли в конце среднего протерозоя (понятно, однако, что основная масса тонкой алюмосиликокластики — продуктов размыва таких субстратов была вовлечена в осадочные циклы в позднем протерозое, который не рассматривается в данной работе).

Точки с составами пород из рассмотренных нами объектов с возрастом более 2.8 млрд лет на диаграмме $(\text{La/Yb})_N$ — Eu/Eu^* сосредоточены преимущественно в области 4. Это позволяет считать (при условии корректности всех наших предшествующих предположений), что до указанного времени крупных рек и рек, питавшихся продуктами эрозии осадочных образований, скорее всего, не существовало, а процессы рециклирования тонкой алюмосиликокластики были редуцированы.

Очевидно, существенное увеличение размера ядер кратонов к концу мезоархея (т.е. примерно к рубежу 2.8 млрд лет назад) должно было привести и, по-видимому, привело к заметному росту площадей водосборных бассейнов рек¹⁰, а соответственно, и к появлению отложений, тяготеющих на обеих рассматриваемых нами диаграммах к областям 1 и 2. Таким образом, наши результаты в первую очередь позволяют предполагать изменение с течением времени размеров водосборов речных систем. При достижении определенных размеров, вероятно появились и условия для накопления осадков определенного типа (например, отложений крупных рек и/или рек категории 1). Так же, как известно, с течением времени на поверхности планеты возросла доля осадочных образований, что позволило формироваться речным отложениям, представленным преимущественно или исключительно продуктами размыва осадочных пород.

¹⁰В публикации [Rainbird, Young, 2009], посвященной “колоссальным рекам прошлого” отмечено, что тектонический стиль и, соответственно, речные системы существенно эволюционировали к концу архея. Примерно между 2.8 и 2.5 млрд лет назад интенсивная магматическая активность привела к формированию крупных и стабильных кратонов, на поверхности которых появились речные системы существенно более масштабные, чем современная Амазонка. Эти системы были образованы многочисленными мелководными переплетающимися руслами. Реки такого типа брали начало из “точечных источников”, расположенных вдоль огромных горных систем, и, сливаясь водоем, формировали сложный узор на громадных по своей площади территориях.

Эволюция состава размывавшейся на протяжении истории Земли континентальной коры давно является объектом повышенного интереса специалистов разного профиля. В начале 1980-х гг. эта проблема была детально исследована в работах С. МакЛеннана и С. Тейлора, К. Конди и ряда других авторов [Taylor, McLennan, 1985, 1995 и др.; McLennan, 1989; McLennan, Taylor, 1991; Condie, 1993 и др.]. В частности, в монографии [Taylor, McLennan, 1985] на основе анализа ряда редких и рассеянных элементов в тонкозернистых осадочных породах показано, что картина их распределения в отложениях архея отличается от особенностей распределения в более молодых отложениях. По мнению названных авторов [Taylor, McLennan, 1985], это обусловлено тем, что валовой состав архейской коры был менее дифференцированным и более фемическим по сравнению с корой протерозоя и фанерозоя. Тонкозернистые и/или глинистые породы архея характеризуются, по данным С. Тейлора и С. МакЛеннана [Taylor, McLennan, 1985], заметно меньшими значениями таких параметров, как отношение легких лантаноидов к тяжелым ($\text{LP3Э}/\text{TP3Э}$), Th/Sc , La/Sc и Eu/Eu^* , по сравнению с более молодыми осадочными образованиями. Однако в некоторых последующих публикациях (например, [Gibbs et al., 1986; Jahn, Condie, 1995]) представления о резком изменении величин названных параметров на границе архея и протерозоя были подвергнуты сомнению. Заметно снижается в кратонных тонкозернистых обломочных породах от архея к фанерозою также содержание Sc и Cr , а от архея к протерозою — Sc , V , Cr , Co и Ni (редких и рассеянных элементов, характерных для ультраосновных и основных магматических пород) [Condie, 1993], что также рассматривается многими исследователями как свидетельство эволюции состава размывавшейся в течение раннего докембрия верхней континентальной коры. Надо помнить, однако, что со времени опубликования работы С. Тейлора и С. МакЛеннана прошло почти 30 лет, и следует, несомненно, вернуться к обсуждению этой проблемы с учетом накопленного в эти годы обширного фактического материала.

После некоторого перерыва в начале 2000-х гг. интерес исследователей к этой проблеме вновь вырос. Так, например, авторами работы [Tang et al., 2016] установлено, что величины отношений Ni/Co и Cr/Zn в тонкозернистых терригенных породах в течение архея снижались, и значений, свойственных современной верхней континентальной коре, они достигли только к концу архея. Выявленная тенденция отражает становление с течением времени — от мезоархея (3.5...3.0 млрд лет) к неоархею (3.0...2.5 млрд лет) — все более кислой и зрелой низкомagneзиальной верхней коры. В работе [Greber, Dauphas, 2019] для анализа “химических” и “литологических” изме-

нений, происходивших с течением времени на континентах и в источниках сноса обломочного материала, также использовался ряд индикаторных отношений — показателей присутствия в источниках сноса коматиитов, основных и кислых магматических пород. Авторами было показано, что величины $Al_2O_3/TiO_{2\text{среднее}}$ в тонкозернистых терригенных породах постепенно снижались от 26.2 ± 1.3 в архее и до 22.1 ± 1.1 в фанерозое. Расчет баланса масс позволил авторам установить, что геохимические особенности (Al_2O_3/TiO_2 , Zr/TiO_2 , La/Sc , Th/Sc , Ni/Co и Cr/Sc) фанерозойских тонкозернистых образований лучше всего соответствуют присутствию на поверхности континентов в этот отрезок времени следующих пород: кислых изверженных — 76 ± 8 мас. % пород, островодужных базальтов — 14 ± 6 мас. %, внутриплитных базальтов — 10 ± 2 мас. %. Для палеоархей соотношение магматических образований в областях размыва было, соответственно, несколько иным: кислых — 65 ± 7 мас. %, основных — 25 ± 6 мас. % коматиитов — 11 ± 3 мас. %).

Мы не склонны подвергать это сомнению. Наш анализ касался несколько иной стороны проблемы и был выполнен с использованием другого инструментария. Однако нам представляется, что сопоставление полученных данных, выяснение связей между ними и их интерпретация, несомненно, являются интересными и многообещающими. Все это побуждает нас двигаться в этом направлении. Если позволит будущее, то мы хотели бы этим в определенной мере заняться.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы искренне признательны О.М. Туркиной, В.П. Чекулаеву и Н.А. Арестовой за помощь в подборе литературных источников. Предложения и замечания анонимных рецензентов были крайне полезными при завершающей работе над рукописью. Иллюстрации к статье как всегда отлично выполнены Н.С. Глушковой.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проведены в соответствии с темами госзаданий ИГГ УрО РАН, ГИН РАН и ИГГД РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ветрин В.Р., Чупин В.П., Яковлев Ю.Н. Метаосадочные породы фундамента палеопротерозойской Печенгской структуры: источники терригенного материала, палеогеодинамические условия формирования // Литосфера. 2013. № 5. С. 3–25.

Гордеев В.В., Лисицын А.П. Геохимическое взаимодействие пресноводной и морской гидросфер // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 5–6. С. 721–744.

Дмитриева Н.В., Туркина О.М., Ножкин А.Д. Петрогеохимические особенности метатерригенных пород

Канского блока Восточного Саяна: реконструкция источников сноса и условий образования // Литология и полез. ископаемые. 2008. № 2. С. 186–201.

Добрецов Н.Л. Глобальная геодинамическая эволюция Земли и глобальные геодинамические модели // Геология и геофизика. 2010. Т. 51. № 6. С. 761–784.

Интерпретация геохимических данных / Отв. ред. Е.В. Скляров. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 288 с.

Котова Л.Н., Глебовицкий В.А., Котов А.Б. и др. Ладжская серия калевия: геологическое положение, состав, возраст, источники и области сноса // Геодинамика, магматизм, седиментогенез и минерализация северо-запада России. Петрозаводск: Карельский НЦ РАН, 2007. С. 190–193.

Котова Л.Н., Котов А.Б., Глебовицкий В.А. и др. Источники и области сноса метатерригенных пород ладожской серии (Свекофеннский складчатый пояс, Балтийский щит): результаты геохимических и Sm–Nd изотопно-геохимических исследований // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2009. Т. 17. № 1. С. 3–22.

Котова Л.Н., Подковыров В.Н., Граунов О.В. Геохимия терригенных и туфогенных метасадков калевия Ладожского региона // Материалы VII Всероссийского литологического совещания. Новосибирск: ИНГ СО РАН, 2013. С. 72–75.

Лисицын А.П. Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.

Магматические горные породы / Отв. ред. О.А. Богатиков. М.: Наука, 1983. Т. 1. 768 с.; 1984. Т. 2. 416 с.; 1985. Т. 3. 488 с.; 1986. Т. 4. 480 с.; 1988. Т. 5. 508 с.; 1987. Т. 6. 438 с.

Маслов А.В., Козина Н.В., Шевченко В.П. и др. Систематика редкоземельных элементов в современных донных осадках Каспийского моря и устьевых зон рек Мира: опыт сопоставления // Докл. АН. 2017. Т. 475. № 2. С. 195–201.

Маслов А.В., Шевченко В.П. Систематика редких земель и Th во взвеси и донных осадках устьевых зон разных категорий/классов рек мира и ряда крупных рек Российской Арктики // Геохимия. 2019. Т. 64. № 1. С. 59–78.

Мысцова Т.А., Милькевич Р.И. Глиноземистые гнейсы кольской серии Балтийского щита (геохимия, первичная природа и возраст протолита) // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. № 10. С. 34–62.

Мысцова Т.А., Милькевич Р.И., Львов П.А. U–Pb геохронология цирконов из метасадков ладожской серии (Северное Приладожье, Балтийский щит) // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2012. Т. 20. № 2. С. 55–67.

Ножкин А.Д. Докембрий юго-западной окраины Сибирского кратона // Известия Томского политехнического университета. 2009. Т. 314. № 1. С. 5–16.

Ножкин А.Д., Туркина О.М. Геохимия гранулитов канского и шарыжалгайского комплексов. Новосибирск: ОИГГМ СО РАН, 1993. 219 с.

Ножкин А.Д., Туркина О.М., Бибикина Е.В., Пономарчук В.А. Состав, строение и условия формирования метасадочно-вулканогенных комплексов Канского зеленокаменного пояса // Геология и геофизика. 2001а. Т. 42. № 7. С. 1058–1078.

Ножкин А.Д., Туркина О.М., Бобров В.А., Киреев А.Д. Амфиболит-гнейсовые комплексы зеленокаменных

- поясов Канской глыбы: геохимия, реконструкция протолитов и условия их образования (Восточный Саян) // Геология и геофизика. 1996. Т. 37. № 12. С. 30–41.
- Ножкин А.Д., Туркина О.М., Лиханов И.И., Савко К.А. Палеопротерозойские метавулканогенно-осадочные толщи енисейского метаморфического комплекса на юго-западе сибирского кратона (Ангаро-Канский блок): расчленение, состав, U–Pb возраст цирконов // Геология и геофизика. 2019. Т. 60. № 10. С. 1384–1406.
- Ножкин А.Д., Туркина О.М., Мельгунов М.С. Геохимия метаосадочно-вулканогенных толщ и гранитоидов Онотского зеленокаменного массива // Геохимия. 20016. № 1. С. 31–50.
- Общая стратиграфическая шкала нижнего докембрия России. Объяснительная записка. Апатиты: КНЦ РАН, 2002. 13 с.
- Ранний докембрий Балтийского щита. СПб.: Наука, 2005. 711 с.
- Ронов А.Б. Стратисфера, или осадочная оболочка Земли (количественное исследование). М.: Наука, 1993. 144 с.
- Сиротин В.И., Войцеховский Г.В., Бондаренко С.В. Протолиты позднеархейских гнейсов кольско-беломорского нерасчлененного комплекса северо-восточной части Балтийского щита (участок “Губа Печенга”) // Вестник Воронежского университета. Геология. 2005. № 1. С. 113–123.
- Туркина О.М., Сергеев С.А., Капитонов И.Н. U–Pb возраст и Lu–Hf изотопные характеристики детритовых цирконов из метаосадков онотского зеленокаменного пояса (Шарыжалгайский выступ, юг Сибирского кратона) // Геология и геофизика. 2014. Т. 55. № 11. С. 1581–1597.
- Холодов В.Н. Геохимия осадочного процесса. М.: ГЕОС, 2006. 608 с.
- Холодов В.Н. Об эволюции состава питающих провинций в истории Земли // Проблемы литологии и геохимии осадочных пород и руд. М.: Наука, 1975. С. 191–209.
- Чекулаев В.П., Арестова Н.А. Архейские метатерригенные породы Карельской провинции: геологическое положение, геохимия, источники сноса // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2020. Т. 28. № 4. С. 3–25.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.
- 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.
- Batemann R., Costa S., Swe T., Lambert D. Archaean mafic magmatism in the Kalgoorlie area of the Yilgarn Craton, Western Australia: a geochemical and Nd isotopic study of the petrogenetic and tectonic evolution of a greenstone belt // *Precambrian Res.* 2001. V. 108. P. 75–112.
- Bavinton O.A., Taylor S.R. Rare earth element geochemistry of Archaean metasedimentary rocks from Kambalda, Western Australia // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1980. V. 44. P. 639–648.
- Bayon G., Toucanne S., Skonieczny C. et al. Rare earth elements and neodymium isotopes in world river sediments revisited // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 2015. V. 170. P. 17–38.
- Bhat M.I., Ghosh S.K. Geochemistry of the 2.51 Ga old Rampur group pelites, western Himalayas: implications for their provenance and weathering // *Precambrian Res.* 2001. V. 108. P. 1–16.
- Bolhar R., Kamber B.S., Moorbath S. et al. Characterisation of early Archaean chemical sediments by trace element signatures // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2004. V. 222. P. 43–60.
- Bolhar 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.
- Bridgland D.R., Bennett J.A., McVicar-Wright S.E., Scrivenner R.C. Rivers through geological time: the fluvial contribution to understanding of our planet // *Proc. Geol. Ass.* 2014. V. 125. P. 503–510.
- Condie K.C. A Planet in Transition: the Onset of Plate Tectonics on Earth between 3 and 2 Ga? // *Geosci. Front.* 2018. V. 9(1). P. 51–60.
- 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., 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.
- Corcoran P.L., Mueller W.U. Archaean sedimentary sequences // *The Precambrian Earth: Tempos and Events* / Eds P.G. Eriksson, W. Altermann, D.R. Nelson, W.U. Mueller, O. Catuneanu. Amsterdam: Elsevier, 2004. P. 613–625.
- Corenblit D., Steiger J. Vegetation as a major conductor of geomorphic changes on the Earth surface: toward evolutionary geomorphology // *Earth Surf. Process. Landf.* 2009. V. 34. P. 891–896.
- Cotter E. The evolution of fluvial style, with special reference to the central Appalachian Palaeozoic // *Fluvial Sedimentology* / Ed. A.D. Miall // *Mem. Can. Soc. Petrol. Geol.* 1978. V. 5. P. 361–384.
- Cullers R.L. The control on the major- and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, U.S.A. // *Chem. Geol.* 1995. V. 123. P. 107–131.
- Dhuime B., Wuestefeld A., Hawkesworth C.J. Emergence of modern continental crust about 3 billion years ago // *Nat. Geosci.* 2015. V. 8. № 7. P. 552–555.
- Els B.G. Determination of some palaeohydraulic parameters for a fluvial Witwatersrand succession // *South Afr. J. Geol.* 1990. V. 93. P. 531–537.
- Els B.G. The auriferous Late Archaean sedimentation systems of South Africa: unique palaeoenvironmental conditions? // *Sediment. Geol.* 1998. V. 120. P. 205–224.
- Eriksson K.A. Alluvial and destructive beach facies from the Archaean Moodies Group, Barberton Mountain Land, South Africa and Swaziland // *Fluvial Sedimentology* / Ed. A.D. Miall. *Can. Soc. Petrol. Geol. Mem.* 1978. V. 5. P. 287–311.

- Eriksson K.A.* Archean pladbrm-to-trough sedimentation, east Pilbara Block, Australia // *Spec. Publ. Geol. Soc. Aust.* 1981. V. 7. P. 235–244.
- Eriksson K.A.* Marginal marine depositional processes from the Archaean Moodies Group, Barberton Mountain Land, South Africa: evidence and significance // *Precambrian Res.* 1979. V. 8. P. 153–182.
- Eriksson K.A.* Sedimentation patterns in the Barberton Mountain Land, South Africa, and the Pilbara Block, Australia: evidence for Archean rifted continental margins // *Tectonophysics.* 1982. V. 81. P. 179–193.
- Eriksson K.A., Kidd W.S.F.* Sedimentologic and tectonic aspects of the Archean Limpopo Belt // *Geol. Soc. Amer. Abstr. Prog.* 1985. V. 17. P. 575.
- Eriksson P.G., Altermann W., Catuneanu O. et al.* Major influences on the evolution of the 2.67–2.1 Ga Transvaal basin, Kaapvaal craton // *Sediment. Geol.* 2001. V. 141–142. P. 205–231.
- Eriksson P.G., Bumby A.J., Brüner J.J., van der Neut M.* Precambrian fluvial deposits: Enigmatic palaeohydrological data from the c. 2–1.9 Ga Waterberg Group, South Africa // *Sediment. Geol.* 2006. V. 190. P. 25–46.
- Eriksson P.G., Condie K.C., Tirsgaard H. et al.* Precambrian clastic sedimentation systems // *Sediment. Geol.* 1998. V. 120. P. 5–53.
- Fedo C.M., Eriksson K.A.* Stratigraphic framework of the ~3.0 Ga Buhwa greenstone belt: a unique stable shelf succession in the Zimbabwe Archean craton // *Precambrian Res.* 1996. V. 77. P. 161–178.
- Ferguson M.E., Waldorn J.W.F., Bleeker W.* The Archean deep-marine environment: turbidite architecture of the Burwash Formation, Slave Province Northwest Territories // *Can. J. Earth Sci.* 2005. V. 42. P. 935–954.
- Fuller A.O.* A contribution to the conceptual modelling of pre-Devonian fluvial systems // *Geol. Soc. South Afr. Transactions.* 1985. V. 88. P. 189–194.
- Gao S., Ling W., Qiu Y. et al.* Contrasting geochemical and Sm–Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1999. V. 63. P. 2071–2088.
- Gibbs A.K., Montgomery C.W., O'Day P.A., Erslev E.A.* The Archean-Proterozoic transition: evidence from the geochemistry of metasedimentary rocks of Guyana and Montana // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1986. V. 50. P. 2125–2141.
- Gibling M.R., Davies N.S., Falcon-Lang H.J. et al.* Palaeozoic coevolution of rivers and vegetation: a synthesis of current knowledge // *Proc. Geol. Assoc.* 2014. V. 125. P. 524–533.
- Greber N.D., Dauphas N.* The chemistry of fine-grained terrigenous sediments reveals a chemically evolved Paleoarchean emerged crust // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2019. V. 255. P. 247–264.
- Groves D.I., Barley M.E., Shepherd J.M.* Overviews: Geology and mineralisation of Western Australia // *ASEG Extended Abstracts.* 1994. V. 1. P. 1–28.
- Harper C.T.* Overview of the geochemistry of Archean and Proterozoic rocks of the Phelps Lake region, Mudjatik Domain, Hearne Province // *Summary of Investigations* 2004. V. 2. Saskatchewan Geol. Surv. Sask. Industry Resources, Misc. Rep. 2004-4.2. 2004. Paper A-7. 24 p.
- Hessler A.M., Lowe D.R.* Weathering and sediment generation in the Archean: An integrated study of the evolution of siliciclastic sedimentary rocks of the 3.2 Ga Moodies Group, Barberton Greenstone Belt, South Africa // *Precambrian Res.* 2006. V. 151. P. 185–210.
- Hicks N., Hofmann A.* Stratigraphy and provenance of the auriferous–uraniferous, fluvial to shallow-marine Sinqeni formation, Mozaan group, Northern Kwazulu-Natal, South Africa // *South Afr. J. Geol.* 2012. V. 115. P. 327–344.
- Hjellbakk A.* Facies and fluvial architecture of a high-energy braided river: the Upper Proterozoic Seglodd Member, Varanger Peninsula, northern Norway // *Sediment. Geol.* 1997. V. 114. P. 131–161.
- Howard K.E., Hand M., Barovich K.M. et al.* U–Pb, Lu–Hf and Sm–Nd isotopic constraints on provenance and depositional timing of metasedimentary rocks in the western Gawler Craton: Implications for Proterozoic reconstruction models // *Precambrian Res.* 2011. V. 184. P. 43–62.
- Ielpi A., Ghinassi M., Rainbird R.H., Ventura D.* Planform sinuosity of Proterozoic rivers: A craton to channel-reach perspective // *Int. Assoc. Sedimentol. Spec. Publ.* 2018. V. 48. P. 81–118.
- Ielpi A., Rainbird R.H., Ventura D., Ghinassi M.* Morphometric convergence between Proterozoic and post-vegetation rivers // *Nat. Commun.* 2017. V. 8. P. 15250. <https://doi.org/10.1038/ncomms15250>
- Inorganic Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments* / Ed. D.R. Lentz // *Geol. Ass. Canada.* 2003. *GeoText* V. 4. 184 p.
- Jahn B.-M., Condie K.C.* Evolution of the Kaapvaal Craton as viewed from geochemical and Sm–Nd isotopic analyses of intracratonic pelites // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1995. V. 59. P. 2239–2258.
- Jenner G.A., Fryer B.J., McLennan S.M.* Geochemistry of the Archean Yellowknife Supergroup // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1981. V. 45. P. 111–1129.
- Kontinen A., Kapyaho A., Huhma H. et al.* Nurmes paragneisses in eastern Finland, Karelian craton: provenance, tectonic setting, and implications for Neoarchean craton correlation // *Precambrian Res.* 2007. V. 152. P. 119–148.
- Laurent O., Martin H., Moyen J.-F., Doucelance R.* The diversity and evolution of late-Archean granitoids: Evidence for the onset of “modern-style” plate tectonics between 3.0 and 2.5 Ga // *Lithos.* 2014. V. 205. P. 208–235.
- Long D.G.F.* Archean fluvial deposits: A review // *Earth-Sci. Rev.* 2019. V. 188. P. 148–175.
- Long D.G.F.* Architecture and depositional style of fluvial systems before landplants: a comparison of Precambrian, early Paleozoic modern river deposits // *From River to Rock Record: the Preservation of Fluvial Sediments and their Subsequent Interpretation* / Eds S. Davidson, S. Leleu, C. North. *SEPM Spec. Pub.* 2011. V. 97. P. 37–61.
- Long D.G.F.* Architecture of pre-vegetation sandy-braided perennial and ephemeral river deposits in the Paleoproterozoic Athabasca Group, northern Saskatchewan, Canada as

- indicators of Precambrian fluvial style // *Sediment. Geol.* 2006. V. 190. P. 71–95.
- Marconato A., Almeida R.P., Turra B., Fragoso-Cesar A.R.S.* Prevegetation fluvial floodplains and channel-belts in the Late Neoproterozoic-Cambrian Santa Bárbara group (Southern Brazil) // *Sediment. Geol.* 2014. V. 300. P. 49–61.
- McGregor V.R., Mason B.* Petrogenesis and geochemistry of metabasaltic and metasedimentary enclaves in the Amitsoq gneisses, West Greenland // *Am. Mineral.* 1977. V. 62. P. 887–904.
- McLennan S.M.* Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes // *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements* / Eds B.R. Lipin, G.A. McKay. Reviews in Mineralogy. 1989. V. 21. P. 169–200.
- McLennan S.M., Taylor S.R.* Geochemical evolution of Archean shales from South Africa. I. The Swaziland and Pongola Supergroups // *Precambrian Res.* 1983. V. 22. P. 93–124.
- McLennan S.M., Taylor S.R.* Geochemistry of Archean metasedimentary rocks from West Greenland // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1984. V. 48. P. 1–13.
- McLennan S.M., Taylor S.R.* Sedimentary rocks and crustal evolution: tectonic setting and secular trends // *J. Geol.* 1991. V. 99. P. 1–21.
- McLennan S.M., Taylor S.R., Eriksson K.A.* Geochemistry of Archean shales from the Pilbara Supergroup, Western Australia // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1983. V. 47. P. 1211–1222.
- Miall A.D.* The Geology of Fluvial Deposits: Sedimentary Facies, Basin Analysis and Petroleum Geology. Berlin: Springer-Verlag, 1996. 582 p.
- Moyen J.-F., Laurent O.* Archean tectonic systems: A view from igneous rocks // *Lithos.* 2018. V. 302–303. P. 99–125.
- Mueller W.U., Corcoran P.L.* Characteristics of pre-vegetational, late orogenic basins: examples from the Archean Superior Province, Canada // *Sediment. Geol.* 1998. V. 120. P. 177–203.
- Mueller W.U., Dimroth E.* A terrestrial-shallow marine transition in the Archean Opemiska Group East of Chapis, Quebec // *Precambrian Res.* 1987. V. 37. P. 29–55.
- Pickett C.* A sedimentary facies analysis of the >2.8 Ga Beniah and Bell Lake Formations, Slave Province, Northwest Territories. MSc thesis. Université du Québec à Chicoutimi. 2002. 136 p.
- Qiu X.-F., Zhao X.-M., Yang H.-M. et al.* Geochemical and Nd isotopic compositions of the Palaeoproterozoic metasedimentary rocks in the Kongling complex, nucleus of Yangtze craton, South China block: implications for provenance and tectonic evolution // *Geol. Mag.* 2018. V. 155. P. 1263–1276.
- Rainbird R.H., Young G.M.* Colossal Rivers, Massive Mountains and Supercontinents // *Earth.* 2009. V. 54. № 4. P. 52–61.
- Røe S.-L.* Cross-strata and bedforms of probable transitional dune to upper-stage planebed origin from a Late Precambrian fluvial sandstone, northern Norway // *Sedimentology.* 1987. V. 34. P. 89–101.
- Santos M.G.M., Almeida R.P., Godinho L.P.S. et al.* Distinct styles of fluvial deposition in a Cambrian rift basin // *Sedimentology.* 2014. V. 61. P. 881–914.
- Santos M.G.M., Owen G.* Heterolithic meandering-channel deposits from the Neoproterozoic of NW Scotland: Implications for palaeogeographic reconstructions of Precambrian sedimentary environments // *Precambrian Res.* 2016. V. 272. P. 226–243.
- Schreiber U.M., Eriksson P.G.* An Early Proterozoic braid-delta system in the Pretoria Group, Transvaal Sequence, South Africa // *J. Afr. Earth Sci.* 1992. V. 15. P. 111–125.
- Schumm S.A.* Speculations concerning the palaeo-hydraulic controls of terrestrial sedimentation // *Geol. Soc. Am. Bull.* 1968. V. 79. P. 1573–1588.
- Sønderholm M., Tirsgaard H.* Proterozoic fluvial styles: responses to changes in accommodation space (Rivieradal Sandstones, eastern North Greenland) // *Sediment. Geol.* 1998. V. 120. P. 257–274.
- Sorjonen-Ward P., Luukkonen E.J.* Archean rocks // *Precambrian Geology of Finland – Key to the Evolution of the Fennoscandian Shield* / Eds M. Lehtinen, P.A. Nurmi, O.T. Ramo. Amsterdam: Elsevier B.V., 2005. P. 19–99.
- Squire R.J., Cas R.A.F., Clout J.M.F., Behets R.* Volcanology of the Archean Lunnon Basalt and its relevance to nickel sulfide-bearing trough structures at Kambalda, Western Australia // *Austr. J. Earth Sci.* 1998. V. 45. P. 695–715.
- Tang M., Chen K., Rudnick R.L.* Archean upper crust transition from mafic to felsic marks the onset of plate tectonics // *Science.* 2016. V. 351. Iss. 6271. P. 372–375.
- Tankard A.J., Jackson M.P.A., Eriksson K.A. et al.* Crustal Evolution of Southern Africa – 3.8 billion Years of Earth History. N. Y.: Springer, 1982. 523 p.
- Taylor S.R., McLennan S.M.* The chemical evolution of the continental crust // *Rev. Geophys.* 1995. V. 33. P. 241–265.
- 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.
- Taylor S.R., Rudnick R.L., McLennan S.M., Eriksson K.A.* Rare earth element patterns in Archean high-grade metasediments and their tectonic significance // *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1986. V. 50. P. 2267–2279.
- Van Kranendonk M.J.* Volcanic degassing, hydrothermal circulation and the flourishing of early life on Earth: A review of the evidence from c. 3490–3240 Ma rocks of the Pilbara Supergroup, Pilbara Craton, Western Australia // *Earth-Sci. Rev.* 2006. V. 74. P. 197–240.
- Verma S. P., Armstrong-Altrin J. S.* New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins // *Chem. Geol.* 2013. V. 355. P. 117–133.
- Watchorn M.B.* Fluvial and tidal sedimentation in the 3000 Ma Mozaan Basin, South Africa // *Precambrian Res.* 1980. V. 13. P. 27–42.
- Williams G.E., Foden J.* A unifying model for the Torridon Group (early Neo-proterozoic) NW Scotland: product of post-Grenvillian extensional collapse // *Earth-Sci. Rev.* 2011. V. 108. P. 34–49.

Winston D. Fluvial systems of the Precambrian belt supergroup, Montana and Idaho // *Fluvial Sedimentology* / Ed. A. Miall // Can. Soc. Petrol. Geol. Memoir. 1978. V. 5. P. 343–359.

Yamashita K., Creaser R.A. Geochemical and Nd isotopic constraints for the origin of Late Archean turbidites from

the Yellowknife area, Northwest Territories, Canada // *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1999. V. 63. P. 2579–2598.

Yin C.Q., Lin S.F., Davis D.W. et al. 2.1–1.85 Ga tectonic events in the Yangtze Block, South China: petrological and geochronological evidence from the Kongling Complex and implications for the reconstruction of supercontinent Columbia // *Lithos*. 2013. V. 182–183. P. 200–210.

Early Precambrian Metaaleuropelites: REE-Th-Systematics as a Key to Reconstruction of Sources of Thin-Grained Aluminosiliciclastics for Them

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

¹Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, acad. Vonsovsky str., 15, Yekaterinburg, 620016 Russia

²Geological Institute, Russian Academy of Sciences, Pyzhevsky lane, 7, bld. 1, Moscow, 119017 Russia

³Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, Makarov emb., 2, St.-Petersburg, 199034 Russia

*e-mail: amas2004@mail.ru

**e-mail: vpodk@mail.ru

The article analyzes the position of individual and average data points of the Archean and Early Proterozoic metaaleuropelites (Isua and Akilia associations, West Greenland, Beit Bridge complex, Limpopo province, South Africa, Moodies, Mozaan and Pretoria groups, Barberton Mountain Land, South Africa, Kola Group, Baltic Shield, Narmes paragneisses, Eastern Finland, Onot greenstone belt, South-East Sayan region, Russia, Rampur Group, Lesser Himalaya, India, Kansk metamorphic complex, East Sayan, Russia, Ladoga Group, Northern Ladoga region, Russia, Yenisei metamorphic complex, Russia etc.) on the $(La/Yb)_N$ –Eu/Eu* and $(La/Yb)_N$ –Th diagrams with classification fields constructed from data on the content of lanthanides and Th in fine grained clastic/aleuropelitic sediments near the mouth of different categories of modern rivers, according to [Bayon et al., 2015]. It has been shown that the vast majority of individual and average data points of metaaleuropelites localized on fields 1 (a particulate suspended matter of world's major rivers), 2 (a particulate suspended matter of rivers draining sedimentary substrates) and 4 (a particulate suspended matter of rivers flowing through areas of development of volcanic rocks), as well as the zone overlapping fields 1, 2 and 3 (a particulate suspended matter of rivers feeding on erosion products of magmatic/metamorphic terranes). The data points of all the objects we have examined with an age of more than 2.8 billion years on the $(La/Yb)_N$ –Eu/Eu* diagram are concentrated mainly in the field 4. This (assuming that all our assumptions are correct) allows us to assume that, until the indicated time, large rivers and most likely, rivers feeding on erosion products of sedimentary formations did not exist, and the processes of recycling thin aluminosiliciclastics were reduced.

Keywords: metaaleuropelites, Archean, Early Proterozoic, distribution of lanthanides and Th, paleoprovenances, types of rivers/river systems.