

## К ЛИТОГЕОХИМИЧЕСКОЙ РЕКОНСТРУКЦИИ ВОЗМОЖНЫХ “ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ” ТИПОВ ГРАНИТОВ-ИСТОЧНИКОВ ОБЛОМОЧНОГО МАТЕРИАЛА АРКОЗОВ

© 2023 г. А. В. Маслов<sup>а</sup>, \*, В. Н. Подковыров<sup>б</sup>, \*\*

<sup>а</sup>Геологический институт РАН, Пыжевский пер., 7, Москва, 119017 Россия

<sup>б</sup>Институт 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 06.02.2023 г.

После доработки 13.04.2023 г.

Принята к публикации 19.04.2023 г.

Рассмотрен ряд примеров, в которых современные аркозовые пески, а также аркозовые и близкие к ним по составу песчаники (все перечисленное — образования первого седиментационного цикла) различного возраста имеют достаточно определенные источники сноса, сложенные гранитоидами разного “геодинамического” типа. Основная цель работы — анализ того насколько геохимические характеристики гранитоидов транслируются в петрогенные осадочные образования. В результате сопоставления 245 анализов осадочных образований и ~375 анализов предполагаемых прототипов пород-источников обломочного материала для них показано, что литогеохимические характеристики аркозовых и субаркозовых песков и песчаников (главным образом содержание и соотношение высокозарядных элементов) позволяют во многих случаях достаточно уверенно судить о “геодинамической природе” кислых изверженных пород-источников кластики для них.

**Ключевые слова:** аркозы, граниты, прототипы пород-источников сноса, геохимия, “геодинамические” типы гранитоидов

**DOI:** 10.31857/S0016752523110079, **EDN:** ETNNSU

### ВВЕДЕНИЕ

В публикации (Маслов, 2022) была предпринята реконструкция “геодинамических типов” гранитоидов, являвшихся источниками кластики для аркозовых песчаников и ассоциирующих с ними глинистых пород бирьянской подсветы зильмердакской свиты верхнего рифея Южного Урала. На основе анализа систематики редких и рассеянных элементов в ней сделан вывод, что поставщиками обломочного материала для верхнерифейского аркозового комплекса могли выступать граниты вулканических дуг и коллизионные. Возможно, среди них были также и внутриплитные граниты. При этом специально подчеркивалось, что полученная информация хотя и не дает представления о конкретных гранитных массивах/комплексах и районах их бывшего распространения, но позволяет судить о возможной “геодинамической природе” гранитов. Однако весьма небольшое количество использованных аналитических данных, широкий спектр U-Th-U-изотопных возрастов присутствующих в песчаниках обломочных цирконов, и неизбежные трансформации состава кластики на путях переноса (Basu et al.,

1982; Cullers et al., 1987, 1988; Cullers, 1988; и др.), заставляют оценивать сделанные выводы весьма осторожно.

Тем не менее, идея оценки “геодинамической природы” гранитов-источников кислой алюмосиликокластики по литогеохимическим характеристикам аркозов представляется нам достаточно актуальной. Настоящая работа еще один шаг в этом направлении. Как и раньше, мы исходим из того, что аркозы — это песчаники первого седиментационного цикла, состоящие преимущественно из кварца и калиевых полевых шпатов, и предположительно образующиеся при непосредственном разрушении гранитоидов (Brongniart, 1826; Barton, 1916; Швецов, 1958; Pettijohn et al., 1972; Кузнецов, 2011; Япаскерт, 2016). Систематика гранитоидов на геодинамической основе и диаграммы для идентификации их разных “геодинамических” типов предложены в публикации (Pearce et al., 1984), где на обширном фактическом материале показано, что граниты различных геодинамических обстановок имеют различные соотношения редких элементов. В то же время, как подчеркнуто О.М. Туркиной (2014, с. 82), “... основным фактором, определяющим состав гра-



**Рис. 1.** Положение объектов, речь о которых идет в данной работе. Географическая основа заимствована с сайта <https://yandex.ru/maps/?ll=166.992700%2C21.912809&z=2>. Длина масштабной линейки 3000 км. 1 – пески рек к западу от батолита Сьерра-Невада; 2 – пески р. Хурап; 3 – пески Калифорнийского залива; 4 – песчаники формации Куданкулам; 5 – песчаники формации Талчир; 6 – песчаники верхнего карбона–нижней перми, Передовой хребет; 7 – песчаники сакуканской свиты; 8 – песчаники ингашинской свиты.

нитоидов, является состав их источника, а не тектоническая обстановка. Соответственно, предложенные [Дж. Пирсом с соавторами – А.М., В.П.] диаграммы дают скорее области составов источников и тектонические условия их образования, а не геодинамические режимы гранитообразования. Вместе с тем, для синколлизионных, островодужных, внутриплитных гранитоидов и плагиогранитов океанических хребтов источники и тектонические режимы обнаруживают явную корреляцию между собой ..., что позволяет идентифицировать типичные для этих обстановок гранитоиды”.

Далее мы рассмотрим ряд примеров (рис. 1), в которых и современные аркозовые пески и аркозовые и близкие к ним по составу песчаники различного возраста (всего 245 анализов) имеют достаточно определенные источники сноса, сложенные преимущественно гранитоидами. Основная цель – проанализировать насколько геохимические характеристики гранитоидов (всего почти 375 анализов) транслируются в осадочные образования первого седиментационного цикла/аркозовые пески и песчаники. Для этого сопоставлено распределение фигуративных точек тех и других на ряде дискриминантных диаграмм.

Большинство исследований, посвященных анализу взаимосвязи состава дочерних осадков и материнских для них пород, имеют другую направленность, нежели та, что присуща публикации (Маслов, 2022). Так, в работе (Basu et al., 1982) проведен анализ речных песков с целью оценки влияния материнских пород и климата на содержание в них редкоземельных элементов (РЗЭ). Установлено, что, несмотря на различия в составе материнских пород, распределение РЗЭ в песках весьма сходно и определяется, по всей видимости, преобладающими в источниках сноса породами; ни второстепенные породы, ни климат не играют в этом существенной роли.

В публикации (Cullers et al., 1987) рассмотрены минеральный состав и распределение РЗЭ в разноразмерных фракциях почв и речных отложений, образованных за счет эрозии изверженных и метаморфических пород Мокрых гор, штат Колорадо. Основной вывод этой работы – глинисто-алевритовый материал даже вблизи источника содержит, как правило, информацию о составе пород более обширной территории, чем материал песчаный и более крупный. Из сказанного очевидно, что анализ мелкозернистых отложений может дать иную информацию, чем петрографическое и геохимическое исследование песка или гравия. Более полное отражение состава гранитов в алевритовых осадках, нежели в других фракциях речных отложений отмечено и в (Cullers, 1988).

В другой работе Р. Куллерса предпринята попытка определить, в какой степени дочерние пески сохраняют геохимические признаки материнских пород (Cullers et al., 1988) и позволяют установить их состав. Итог исследований – для распознавания состава материнских пород лучше использовать не абсолютные концентрации отдельных элементов, а отношения ряда из них (La/Sc, Th/Sc, La/Co и др.).

И сейчас в различных публикациях мы видим решение примерно таких же задач на основе таких же подходов. Так, например, авторы работы (Papadopoulos et al., 2021) исследовали береговые пески Греции и установили, что они являются продуктом эрозии нескольких источников, включая граниты (обосновано характером распределения РЗЭ) и метаморфические породы (присутствие рутила, ильменита и магнетита).

## ФАКТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ И ЕГО ОБСУЖДЕНИЕ

Материал этого раздела заимствован в основном из литературы разных лет, поэтому полнота

используемых нами аналитических данных, заметно различается. Вначале рассматриваются примеры современных песков аркозового и близкого к ним состава, затем — таких же по составу песчаников широкого возрастного диапазона. Для каждого из объектов есть достаточно обоснованные предположения о породах-источниках кластики. Накопление песчаного материала, слагающего рассматриваемые далее объекты, происходит и происходило преимущественно в континентальных обстановках, только песчаники формаций Куданкулам и Минтурн могут иметь прибрежно-морской генезис. Среднее содержание ряда редких и рассеянных элементов в песках и песчаниках приведено в табл. 1.

**Пески рек к западу от батолита Сьерра-Невада, Калифорния (объект 1).** В работе (van de Kamp, Leake, 1985) проанализированы петрографический состав и геохимические особенности современных осадков небольших рек, дренирующих западные области батолита Сьерра-Невада, Калифорния. Пески и алевроиты сложены кварцем, плагиоклазом и калиевым полевым шпатом. Глинистые минералы в пелитовых осадках — иллит и смектит, подчиненную роль играет хлорит. Основной источник кластики — Батолит Сьерра-Невада — сложен кварцевыми монцонитами и гранодиоритами (Bateman et al., 1963).

Анализ литогеохимических особенностей песков выполнен по аналитическим данным из публикации (van de Kamp, Leake, 1985). Среднее содержание  $\text{SiO}_2$  в них составляет  $69.8 \pm 6.6$  мас. %. Величина  $\text{Al}_2\text{O}_3$  среднее равна  $13.2 \pm 2.0$  мас. %. Параметр  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  среднее составляет  $4.1 \pm 1.8$  мас. %. Среднее содержание  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  равно  $3.5 \pm 1.3$  и  $1.8 \pm 1.2$  мас. %. Параметр  $\text{K}_2\text{O}$  среднее равен  $2.3 \pm 0.7$  мас. %, а  $\text{Na}_2\text{O}$  среднее составляет  $2.8 \pm 0.6$  мас. %. Величина  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  варьирует от 1.3 до 8.1,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O}$  — от 2.0 до 10.1, а  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  изменяется от 0.5 до 2.5.

На диаграмме  $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  (Pettijohn et al., 1972) точки песков сосредоточены преимущественно в полях лититов и граувакк. На диаграмме  $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$  (Heppon, 1988) они тяготеют к полю вакк, относительно небольшая часть точек расположена в поле аркозов. Между модулями ТМ и ЖМ в использованной нами выборке (число образцов  $n = 21$ ) существует статистически значимая положительная корреляция ( $r = 0.91$ ), а модули НКМ и ГМ<sup>1</sup> связаны значимой отрицательной ( $r = -0.58$ ) корреляцией. Это указывает, в соответствии с представлениями

<sup>1</sup> ТМ =  $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ , ЖМ =  $(\text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO})/(\text{TiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ , НКМ =  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ , ГМ =  $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3^* + \text{MnO})/\text{SiO}_2$  (Юдович, Кетрис, 2000). Расчет значений модулей ведется по мас. %.

Я.Э. Юдовича и М.П. Кетрис (2000), на петрогенный характер материала, слагающего речные пески хр. Сьерра-Невада.

По данным (Ague, Brimhall, 1988), породы центральной части батолита относятся к I-типу. Фигуративные точки гранитов батолита Сьерра-Невада, как и расположенного рядом батолита Пенинсула-Рэнджес, локализованы на диаграмме  $(\text{Y} + \text{Nb}) - \text{Rb}$  преимущественно в поле островодужных (VAG) источников (Hildebrand, Whalen, 2014). Для сопоставления с составом дочерних песков использован состав гранитов из работы (Wenner, Coleman, 2004).

На диаграмме  $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  (Шарпенко и др., 2013) фигуративные точки песков расположены в полях кварцевых диоритов, гранодиоритов, гранитов, а также низкощелочных гранодиоритов, гранитов и лейкогранитов (рис. 2а). В последнее поле попадают точки песков, имеющих аркозовый и близкий к нему состав. Фигуративные точки гранитов локализованы в полях граносиенитов, умеренно щелочных гранитов и лейкогранитов, кварцевых диоритов, гранитов и лейкогранитов. Перекрытия между областями точек гранитоидов и песков на этой диаграмме нет. На диаграмме  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$  (Великославинский, 2003) точки гранитов присутствуют во всех трех ее полях, а точки песков, в том числе и аркозовых, в полях гранитов I- и S-типов (рис. 2б). Напротив, на диаграммах  $(\text{Y} + \text{Nb}) - \text{Rb}$  и  $\text{Y} - \text{Nb}$  наблюдается практически полное перекрытие областей точек песков и гранитоидов. На первом графике и те и другие сосредоточены в поле VAG (рис. 2в), на втором — в поле VAG + syn-COLG (рис. 2г). Следовательно, можно считать, что геохимические особенности песков наследуют геохимические характеристики гранитоидов.

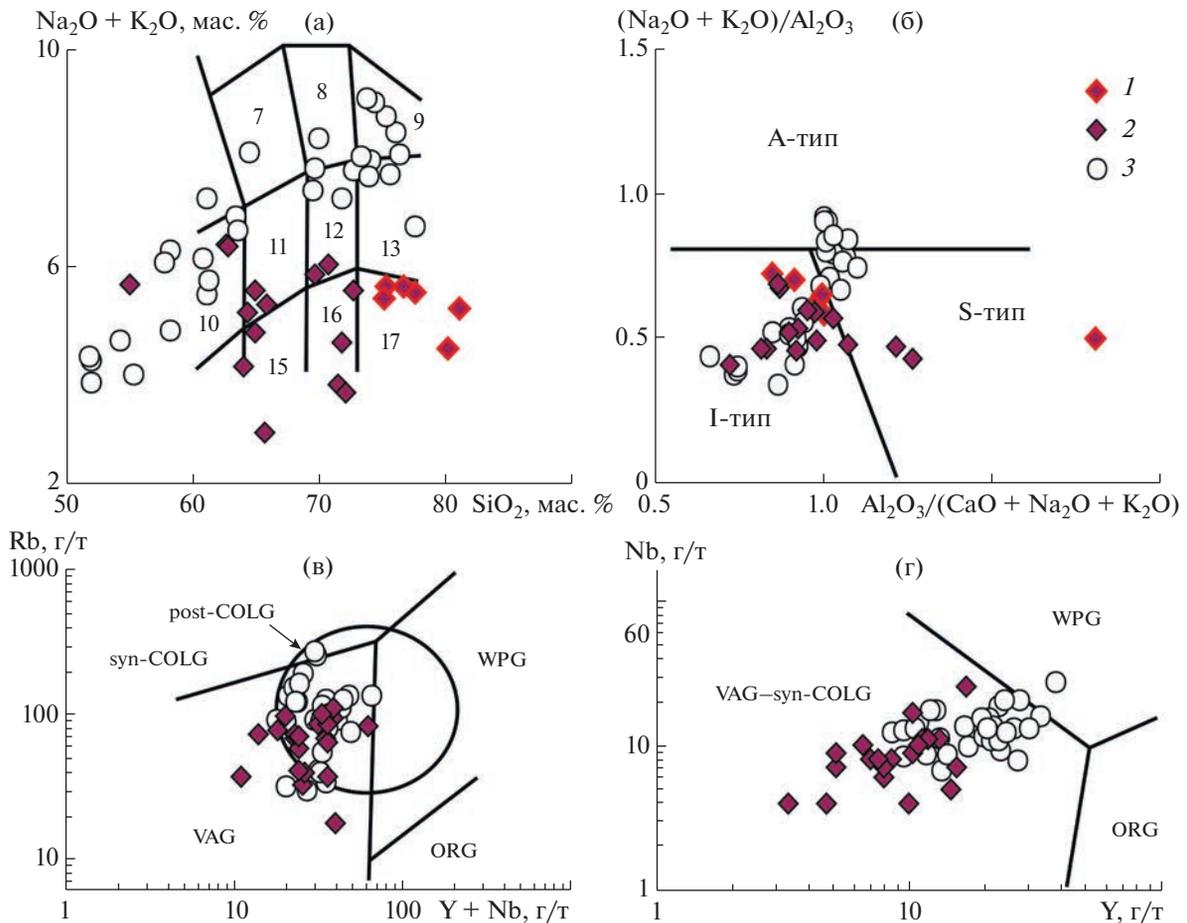
**Аркозовые пески р. Хурар, образованные за счет размыва гранитов Бунделкханского кратона, Индия (объект 2).** Авторы работы (Kanhaiya et al., 2018) проанализировали минералогические и геохимические особенности осадков р. Хурар, шт. Мадхья-Прадеш, Индия, источниками кластики для которых являются породы архейского гранитного комплекса Бунделкхан. Влекомый материал р. Хурар представлен в основном грубой песчаной аркозовой фракцией.

Анализ литогеохимических особенностей песков выполнен по данным из работы (Kanhaiya et al., 2018). Среднее содержание  $\text{SiO}_2$  в песках составляет  $79.8 \pm 3.8$  мас. %. Величина  $\text{Al}_2\text{O}_3$  среднее равна  $9.6 \pm 1.2$  мас. %.  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  среднее составляет  $0.9 \pm 0.4$  мас. %. Среднее содержание  $\text{CaO}$  и  $\text{MgO}$  невелико и равно  $0.5 \pm 0.2$  и  $0.2 \pm 0.2$  мас. %. Параметр  $\text{K}_2\text{O}$  среднее составляет  $4.7 \pm 0.2$  мас. %, тогда как  $\text{Na}_2\text{O}$  среднее почти в два раза меньше ( $2.5 \pm$

Таблица 1. Среднее, минимальное и максимальное содержание (г/г) ряда редких и рассеянных элементов в песках и песчаниках

Компо- ненты	Объекты (номера соответствуют их номерам в тексте)									
	1	2	3	4	5	6			7	8
						Формация Сангре-де-Кристо	Формация Минтурн	Формация Фаунтин		
Sc		$2.1 \pm 1.1$ $1.0-4.0$	$1.4 \pm 0.5$ $0.9-2.6$	$2.7 \pm 1.4$ $1.1-5.2$	$8.5 \pm 3.4$ $3.8-17.1$	$20.0 \pm 6.6$ $10.0-30.0$	$18.0 \pm 4.6$ $7.0-30.0$	$9.2 \pm 5.9$ $2.6-19.2$	$5.9 \pm 3.6$ $2.4-17.6$	$13.2 \pm 10.7$ $3.4-40.0$
Cr	$63.8 \pm 67.5$ $5.0-291.0$	$28.1 \pm 18.6$ $7.0-66.0$	$4.4 \pm 3.4$ $0.9-15.1$	$15.4 \pm 8.5$ $2.4-28.0$	$37.1 \pm 17.2$ $14.2-80.6$	$80.9 \pm 68.6$ $7.0-300.0$	$81.3 \pm 38.2$ $20.0-150.0$	$43.5 \pm 23.0$ $14.0-83.0$	$63.5 \pm 32.3$ $29.6-138.0$	—
Co	$10.3 \pm 6.7$ $1.0-24.0$	$5.9 \pm 1.1$ $3.0-8.0$	$1.5 \pm 0.8$ $0.5-2.7$	$2.8 \pm 1.4$ $1.0-5.4$	$28.0 \pm 12.8$ $9.4-62.2$	$15.6 \pm 9.8$ $5.0-50.0$	$13.4 \pm 4.6$ $3.0-20.0$	—	$7.3 \pm 6.0$ $2.7-29.8$	$12.6 \pm 8.1$ $4.6-36.0$
Ga	$14.0 \pm 3.4$ $9.0-21.0$	$11.0 \pm 1.6$ $9.0-15.0$	—	—	—	—	—	—	$12.3 \pm 4.7$ $8.2-27.1$	—
Rb	$68.6 \pm 25.6$ $18.0-111.0$	$155.7 \pm 8.9$ $142.0-178.0$	$110.9 \pm 24.7$ $70.0-148.0$	$32.7 \pm 50.4$ $5.4-222.6$	$81.6 \pm 31.2$ $36.9-164.9$	—	—	$124.6 \pm 37.4$ $45.0-184.0$	$100.3 \pm 48.3$ $27.6-241.0$	$74.2 \pm 44.8$ $46.8-219.1$
Y	$20.3 \pm 7.8$ $7.0-36.0$	$15.2 \pm 2.8$ $13.0-22.0$	$8.7 \pm 2.3$ $3.6-12.7$	$9.5 \pm 6.6$ $1.8-27.7$	$19.0 \pm 6.9$ $9.2-35.9$	$52.2 \pm 19.0$ $20.0-100.0$	$42.5 \pm 49.8$ $10.0-300.0$	—	$15.1 \pm 6.5$ $5.6-33.1$	$23.5 \pm 6.6$ $13.6-35.2$
Zr	$186.0 \pm 148.8$ $35.0-636.0$	$82.6 \pm 39.1$ $51.0-195.0$	$18.3 \pm 15.2$ $1.0-45.6$	$19.0 \pm 16.0$ $3.0-67.1$	$79.7 \pm 44.8$ $19.5-172.0$	$250.0 \pm 197.0$ $100.0-1000.0$	$243.8 \pm 128.7$ $50.0-500.0$	—	$190.1 \pm 124.4$ $69.5-493.0$	$266.1 \pm 77.5$ $159.9-403.8$
Nb	$9.2 \pm 4.9$ $4.0-26.0$	$5.9 \pm 2.5$ $4.0-12.0$	$4.0 \pm 1.7$ $1.7-7.6$	$4.1 \pm 3.0$ $0.7-9.7$	$8.4 \pm 3.3$ $3.7-17.1$	—	—	—	$10.0 \pm 6.7$ $4.1-32.7$	$12.0 \pm 3.9$ $7.5-21.5$
La	$16.1 \pm 9.3$ $5.0-41.0$	$22.4 \pm 12.7$ $11.2-55.4$	—	$14.7 \pm 8.9$ $3.8-37.1$	$31.6 \pm 15.3$ $16.4-68.1$	$73.3 \pm 47.0$ $50.0-200.0$	$55.9 \pm 28.2$ $30.0-200.0$	$55.9 \pm 28.0$ $25.1-111.0$	$30.4 \pm 16.5$ $9.0-65.3$	$37.8 \pm 6.9$ $24.8-51.8$
Hf	—	—	$0.9 \pm 0.5$ $0.2-1.9$	$1.0 \pm 0.7$ $0.3-3.3$	$2.4 \pm 1.4$ $0.7-5.7$	—	—	$8.6 \pm 5.2$ $2.8-20.4$	$5.2 \pm 3.1$ $2.3-12.9$	$6.8 \pm 1.8$ $4.5-9.9$
Ta	—	—	—	—	—	—	—	—	$0.9 \pm 0.6$ $0.3-3.1$	$0.9 \pm 0.2$ $0.6-1.4$
Th	$8.7 \pm 5.4$ $2.0-27.0$	$13.8 \pm 5.8$ $5.0-24.0$	$4.8 \pm 1.8$ $1.5-8.4$	$5.9 \pm 6.6$ $0.9-27.8$	$11.0 \pm 6.2$ $4.9-26.3$	—	—	$14.1 \pm 5.4$ $4.9-22.4$	$10.3 \pm 5.3$ $4.9-25.4$	$12.5 \pm 3.0$ $7.6-18.8$

Примечание. В числителе — среднее арифметическое и стандартное отклонение, в знаменателе — минимальное и максимальное значение. Прочерк — нет данных. Проведено содержание только тех компонентов, что используются при построении и анализе различных дискриминантных диаграмм, упоминаемых в тексте.



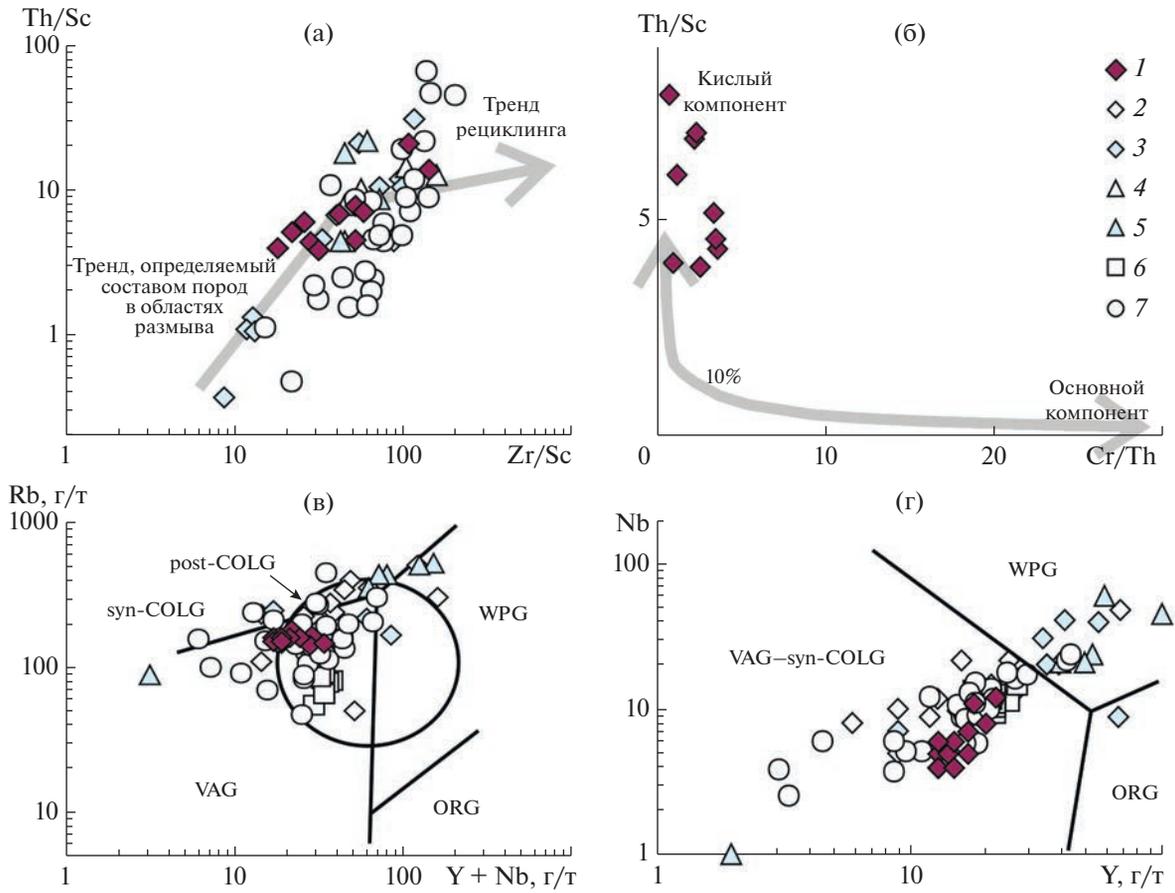
**Рис. 2.** Распределение фигуративных точек песков рек к западу от батолита Сьерра-Невада на диаграммах  $\text{SiO}_2$ – $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  (а),  $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ – $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  (б),  $(\text{Y} + \text{Nb})$ – $\text{Rb}$  (в) и  $\text{Y}$ – $\text{Nb}$  (г). 1 – аркозовые пески; 2 – пески, ассоциирующие с аркозовыми; 3 – гранитоиды батолита Сьерра-Невада. Цифры в полях диаграммы (а): 7 – граносиениты, 8 – умеренно щелочные граниты, 9 – умеренно щелочные лейкограниты, 10 – кварцевые диориты, 11 – гранодиориты, 12 – граниты, 13 – лейкограниты, 15 – низкощелочные гранодиориты, 16 – низкощелочные граниты, 17 – низкощелочные лейкограниты.

$\pm 0.7$  мас. %). Отношение  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  варьирует от 5.3 до 9.8, величина  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O}$  изменяется от 0.1 до 0.4, а параметр  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  отвечает диапазону значений 0.4–0.9.

На диаграммах  $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  и  $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ – $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$  фигуративные точки песков расположены в полях аркозов. Между ТМ и ЖМ в анализируемой выборке ( $n = 16$ ) существует статистически значимая положительная корреляция ( $r = 0.81$ ), а между НКМ и ГМ – значимая отрицательная ( $r = -0.83$ ) корреляция. Это дает основание считать материал, слагающий пески р. Хурар, петрогенным.

Кратон Бунделкхан сложен преимущественно гранитоидами (~90%). Подчиненную роль играют ТТГ-гнейсы, железистые кварциты, кварциты, ультраосновные породы, корундсодержащие кристаллические сланцы и амфиболиты (Saha et al.,

2011; Pati et al., 2015). В поясе Бабина известны кислые вулканиты с возрастом ~2.54 млрд лет (Singh, Slabunov, 2014). На диаграммах  $(\text{Y} + \text{Nb})$ – $\text{Rb}$ ,  $\text{Y}$ – $\text{Nb}$ ,  $(\text{Ta} + \text{Yb})$ – $\text{Rb}$  и  $\text{Yb}$ – $\text{Ta}$  (Pearce et al., 1984) фигуративные точки этих вулканитов соответствуют полям кислых пород надсубдукционных обстановок. В целом же гранитный магматизм в пределах кратона проявился в интервале от 2.58 до 1.9 млрд лет (Kaur et al., 2016; Verma et al., 2016; Joshi et al., 2017; Singh et al., 2019; Pati, 2020). Геохимические и геохронологические исследования различных фаз гранитоидов Бунделкхан позволили установить, что они формировались в островодужных (VAG) обстановках в интервале 2.58–2.49 млрд лет (Kaur et al., 2016; Joshi et al., 2017). В то же время неархейские граниты района Курайча принадлежат, по данным (Ramiz et al., 2020), подгруппе гранитов  $A_2$ . На дискриминантных диаграммах подавляющее большинство их то-



**Рис. 3.** Положение фигуративных точек песков, образованных за счет размытия гранитов кратона Бунделкхан, на диаграммах  $Zr/Sc$ – $Th/Sc$  (а),  $Cr/Th$ – $Th/Sc$  (б),  $(Y + Nb)$ – $Rb$  (в),  $Y$ – $Nb$  (г). 1 – пески р. Хура; 2 – гранодиоритовые гнейсы и граниты (Kaur et al., 2016); 3 – гранодиориты и граниты (Mishra et al., 2018); 4 – гранитоиды (Pati et al., 2015); 5 – граниты и гнейсы района Курайча (Ramiz et al., 2020); 6 – кислые вулканиты (Singh, Slabunov, 2014); 7 – гранитоиды (Ramiz et al., 2022).

чек тяготеет к полю WPG. Для сопоставления геохимических характеристик песков р. Хура и прототипов источников кластики для них использованы аналитические данные, приведенные в публикациях (Singh, Slabunov, 2014; Pati et al., 2015; Kaur et al., 2016; Mishra et al., 2018; Ramiz et al., 2020, 2022).

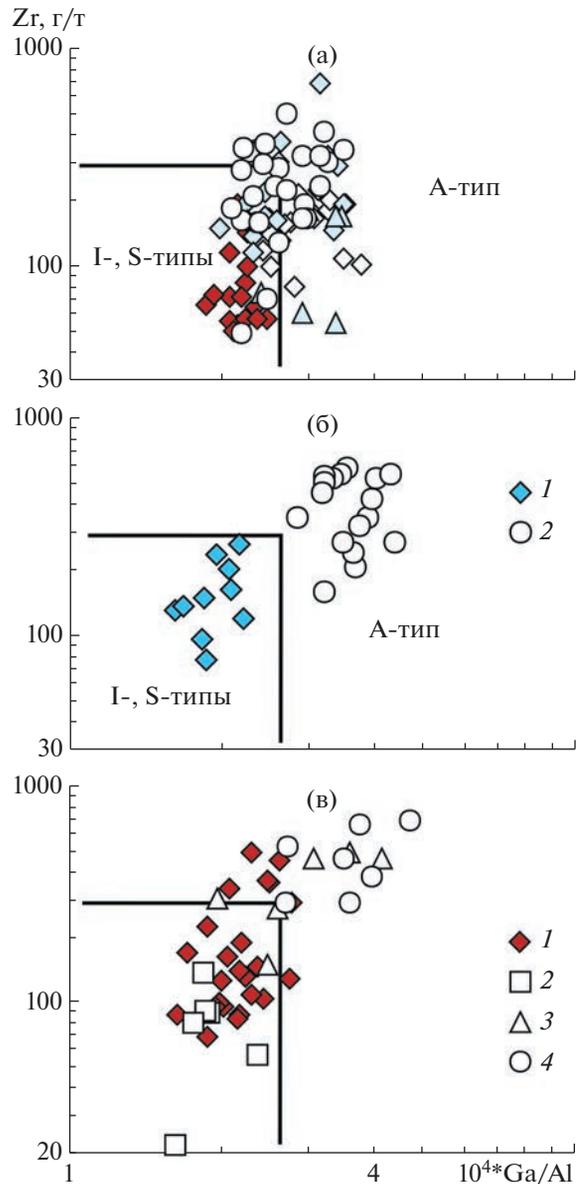
По соотношению  $Zr$ ,  $Sc$  и  $Th$  рассматриваемые пески сложены и петрогенным и рециклированным материалом (рис. 3а). Совокупность их фигуративных точек на диаграмме  $Zr/Sc$ – $Th/Sc$  (McLennan et al., 1993) образует область, практически полностью перекрывающуюся с областью точек гранодиоритов, гранитов, гнейсов и кислых вулканитов кратона Бунделкхан. На доминирование в составе песков продуктов размытия пород кислого состава указывает и распределение их точек на диаграмме  $Cr/Th$ – $Th/Sc$  (рис. 3б). На диаграмме  $(Y + Nb)$ – $Rb$  точки песков локализованы в поле VAG (рис. 3в); здесь же сосредоточена подавляющая часть точек магматических пород предполагаемых прототипов источников класти-

ки для них. На графике  $Y$ – $Nb$  точки состава песков расположены в поле VAG + syn-COLG. В нем же в основном находятся фигуративные точки гранодиоритовых гнейсов, описанных в публикации (Kaur et al., 2016), гранитоидов кратона Бунделкхан из работы (Pati et al., 2015), кислых вулканитов (Singh, Slabunov, 2014) и неоархейских гранитоидов (Ramiz et al., 2022). Это дает основание считать, что сходные с ними по составу образования и являлись источниками кластики для песков р. Хура. В то же время фигуративные точки гранодиоритов (Mishra et al., 2018) и неоархейских гранитов А-типа из района Курайча (Ramiz et al., 2020) локализованы на графике в основном в поле WPG, где точки песков отсутствуют (рис. 3г). На диаграмме  $10^{4*}Ga/Al$ – $Zr$  (Whalen et al., 1987) точки песков расположены в поле I- и S-типов гранитов, тогда как точки возможных прототипов источников кластики для них можно видеть и в названных полях и в поле гранитов А-типа. Приуроченности определенных объектов к определенным полям данного графика не наблюдается

(рис. 4а). Это позволяет сделать вывод, что состав аркозовых песков р. Хурар достаточно хорошо отражает геохимические особенности прототипов источников кластики, которыми выступали гранитоиды надсубдукционных и синколлизийных обстановок.

**Пески пляжей Калифорнийского залива, северо-запад Мексики (объект 3).** Современные пески близкого к аркозовому составу распространены на пляжах восточного побережья Калифорнийского залива на северо-западе Мексики. Характеристика их минерального и химического состава дана в работе (Madhavaraju et al., 2016). Пески пляжей в районах Пуэрто-Пеньяско и Баия Кино имеют зернистость от грубой до тонкой, а в окрестностях Десембок они являются тонкозернистыми. Состав минералов тяжелой фракции, соотношение редких и рассеянных элементов (La/Sc, Th/Sc, La/Co и др.), а также распределение РЗЭ свидетельствуют о преобладании в областях размыва кислых магматических пород. Это подтверждается сходством спектров РЗЭ в песках и в потенциальных материнских породах. Так, распределение РЗЭ в песках Пуэрто-Пеньяско сопоставимо с характеристиками лантаноидов в гранитоидах перми и триаса (Arvizu et al., 2009). Распределение РЗЭ в песках Десембок и Баия Кино сходно с распределением их в ларамийских гранитах и гранодиоритах (Valencia-Moreno et al., 2001).

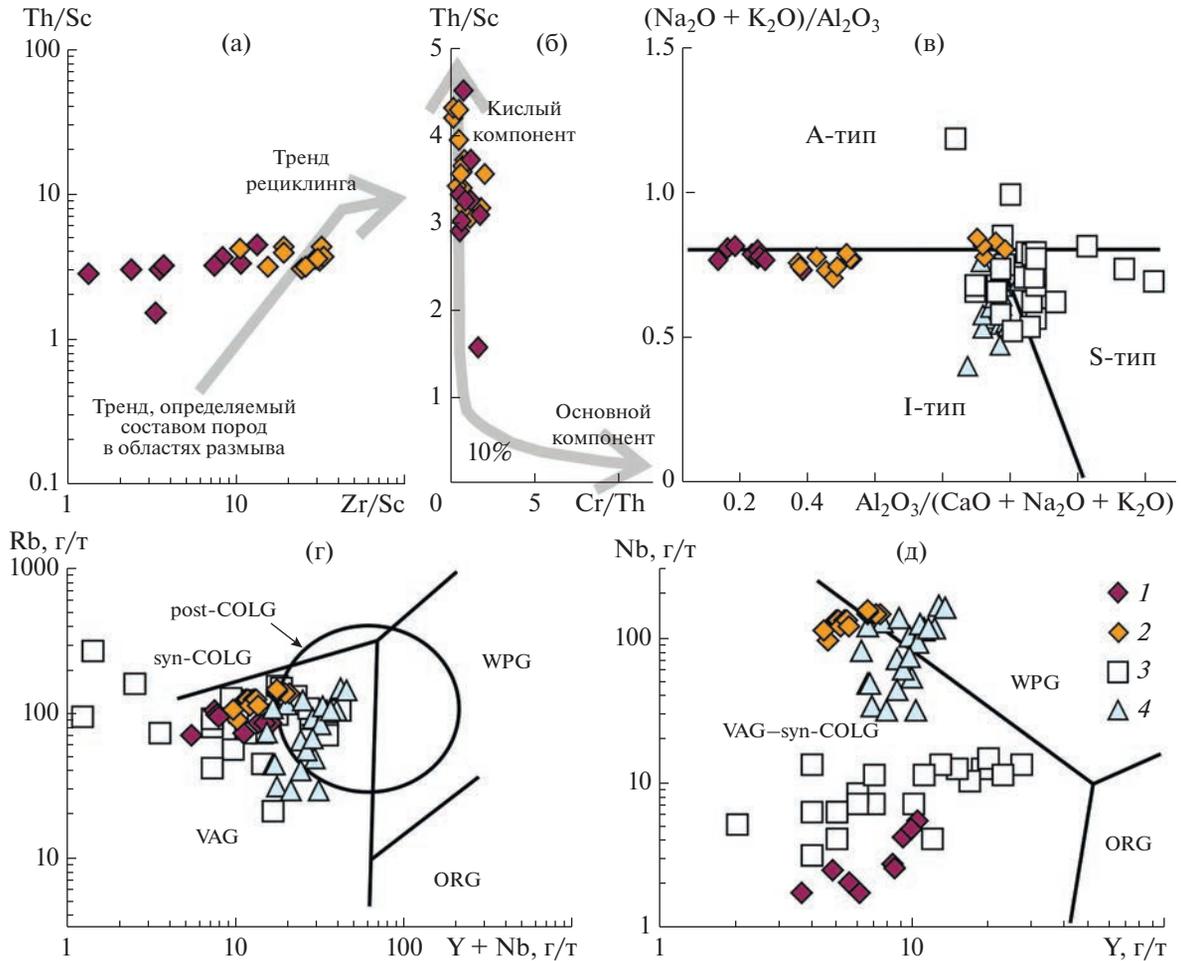
Анализ литогеохимических особенностей песков выполнен по данным о содержании основных породообразующих оксидов, а также редких и рассеянных элементов в 23 пробах из публикации (Madhavaraju et al., 2016). Среднее содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в песках Пуэрто-Пеньяско ( $n = 9$ ) составляет  $56.9 \pm 6.2$  и  $7.8 \pm 0.9$  мас. %. Параметр  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  среднее равен  $0.5 \pm 0.2$  мас. %. Среднее содержание CaO –  $16.2 \pm 4.3$  мас. %. Среднее содержание MgO составляет  $0.4 \pm 0.1$  мас. %. Параметр  $\text{K}_2\text{O}$  среднее равен  $2.5 \pm 0.4$  мас. %, а  $\text{Na}_2\text{O}$  среднее –  $2.0 \pm 0.3$  мас. %. Величина  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  среднее равна  $7.3 \pm 0.2$ . Параметр  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O}$  варьирует от 0.1 до 0.3, а  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  находится в диапазоне от 0.5 до 1.0. В песках Десембок и Баия Кино  $\text{SiO}_2$  среднее заметно выше ( $70.0 \pm 5.9$  мас. %,  $n = 14$ ), чем в песках Пуэрто-Пеньяско. Это же характерно для  $\text{Al}_2\text{O}_3$  среднее ( $10.5 \pm 0.7$  мас. %) и  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  среднее ( $1.3 \pm 0.3$  мас. %). Среднее содержание CaO, напротив, примерно в три раза ниже ( $5.8 \pm 3.6$  мас. %). Выше также среднее содержание  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  ( $3.6 \pm 0.4$  и  $2.5 \pm 0.3$  мас. %). Средние значения  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  с учетом погрешностей не отличаются от тех, что характерны для песков Пуэрто-Пеньяско.



**Рис. 4.** Распределение точек состава песков бассейна р. Хурар (а), песчаников верхнего карбона–нижней перми Передового хребта (б) и сауканской свиты (в) и предполагаемых прототипов источников кластики для них на диаграмме  $10^4 \text{Ga/Al} - \text{Zr}$ . (а): условные обозначения см. рис. 3. (б): 1 – аркозы Передового хребта, по (van de Kamp, Leake, 1994); 2 – гранитоиды батолита Пайкс Пик; (в): 1 – песчаники сауканской свиты; 2 – породы олекминского комплекса; 3 – гранитоиды 1 типа; 4 – нелюкинские гранитоиды.

На диаграмме  $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  точки состава песков всех пляжей сосредоточены в поле лититов. На диаграмме  $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$  они расположены, напротив, в поле аркозов.

Из-за малого числа проанализированных авторами работы (Madhavaraju et al., 2016) проб со-



**Рис. 5.** Положение фигуративных точек песков Калифорнийского залива и предполагаемых прототипов источников кластики для них на диаграммах  $Zr/Sc$ – $Th/Sc$  (а),  $Th/Sc$ – $Cr/Th$  (б),  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ – $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$  (в),  $(Y + Nb)$ – $Rb$  (г) и  $Y$ – $Nb$  (д). 1 – пески района Пуэрто-Пеньяско; 2 – пески окрестностей Десембок и Баия Кино; 3 – гранитоиды, лейкократовые гранитоиды и пегматиты-аплиты (Gutiérrez, 2012); 4 – ларамийские гранитоиды (Valencia-Moreno et al., 2001).

отношения между модулями ТМ и ЖМ, а также НКМ и ГМ не являются статистически достоверными при 5% уровне значимости. Тем не менее, другие аргументы (см. ниже) дают основание предполагать, что пески являются осадками первого цикла.

По данным, приведенным в работе (Gutiérrez, 2012), пермо-триасовые гранитоиды в северо-западной части шт. Сонора представлены преимущественно гранодиоритами и кварцевыми монцодиоритами, встречаются также монцограниты, монцодиориты, кварцевые сиениты и монцониоты. На диаграмме  $Y$ – $Nb$  (Pearce et al., 1984) их точки состава локализованы в поле VAG (Arvizu et al., 2009; Gutiérrez, 2012). На диаграмме  $10^4 Ga/Al$ – $Zr$  (Whalen et al., 1987) они расположены в полях М-, I- и S-гранитов. Ларамийские гранитоиды – это кварцевые диориты, граниты и гранодиориты (преобладают). На диаграмме  $(Y + Nb)$ – $Rb$  их фи-

гуративные точки локализованы в поле VAG (Valencia-Moreno et al., 1999; González-Vesuar et al., 2017). Для сравнения геохимических особенностей пляжевых песков и прототипов источников слагающего их материала привлечены аналитические данные из работ (Valencia-Moreno et al., 2001; Gutiérrez, 2012).

Соотношение в пляжевых песках таких индикаторных отношений как  $Zr/Sc$  и  $Th/Sc$  показывает, что они сложены материалом первого седиментационного цикла (рис. 5а). Источниками его являлись кислые магматические породы, что следует из характерных для песков высоких величин  $Th/Sc$  и низких значений  $Cr/Th$  (рис. 5б). На диаграмме  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ – $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$  точки состава песков расположены вдоль границы полей А- и I-типа гранитоидов, тогда как фигуративные точки прототипов источников кластики для них тяготеют к области со-

членения всех трех полей гранитоидов (рис. 5в). В то же время точки песков пляжа в окрестностях Десембок локализованы практически также как и основная масса фигуративных точек прототипов источников. Это показывает, что использовать данный график для наших целей нельзя, так как варьирующее содержание СаО в песках существенно меняет положение точек на нем. На диаграмме (Y + Nb)–Rb точки состава и песков и предполагаемых прототипов источников слагающей их кластики сосредоточены в поле VAG (рис. 5г), но можно заметить, что между областями точек песков и такими возможными источниками как гранитоиды, лейкократовые гранитоиды и пегматиты-аплиты лейкократовые, описанными в работе (Gutiérrez, 2012), существует почти полное перекрытие, тогда как между областями точек песков и “северными”, “центральными” и “южными” гранитами ларамийского пояса северо-западной Мексики (Valencia-Moreno et al., 2001) оно отсутствует. Еще более интересную картину можно видеть на графике Y–Nb. Здесь, как и отмечено в публикации (Madhavaraju et al., 2016), распределение точек пляжевых песков окрестностей Пуэрто-Пеньяско существенно не отличается от распределения фигуративных точек пермо-триасовых гранитоидов, тогда как точки пляжевых песков из районов Десембок и Баия Кино тяготеют к области точек ларамийских гранитоидов (рис. 5д). Подавляющее большинство точек состава и песков и гранитоидов сосредоточено в поле VAG + syn-COLG, а часть точек ларамийских магматических образований есть и в поле WPG. Все это показывает, что геохимические характеристики аркозовых и близких к ним песков пляжей Калифорнийского залива хорошо отражают специфику предполагаемых прототипов-источников слагающей их кластики.

**Аркозовые и субаркозовые песчаники формации Куданкулам, верхний миоцен, Южная Индия (объект 4).** Аркозовые, субаркозовые, литаренитовые и сублитаренитовые песчаники присутствуют в верхах верхнемиоценовой формации Куданкулам Южной Индии. Среднее содержание кварца в песчаниках составляет ~87%, количество полевого шпата (преобладают калиевые разновидности) не превышает 7–15% (Armstrong-Altrin et al., 2004). Лититовые обломки (~3%) представлены преимущественно осадочными породами. Во всех песчаниках есть кальцитовый цемент.

Среднее содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в песчаниках, рассчитанное по данным из работы (Armstrong-Altrin et al., 2004), составляет  $53.0 \pm 6.6$  и  $5.2 \pm 2.0$  мас. %. Параметр  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  среднее равен  $1.2 \pm 0.5$  мас. %. Среднее содержание СаО достигает  $19.0 \pm 5.3$  мас. %, а  $\text{MgO}$  среднее составляет  $0.9 \pm 0.3$  мас. %. Параметр  $\text{K}_2\text{O}$  среднее равен  $1.8 \pm 0.6$  мас. %, а  $\text{Na}_2\text{O}$  среднее –  $0.8 \pm 0.3$  мас. %. Отно-

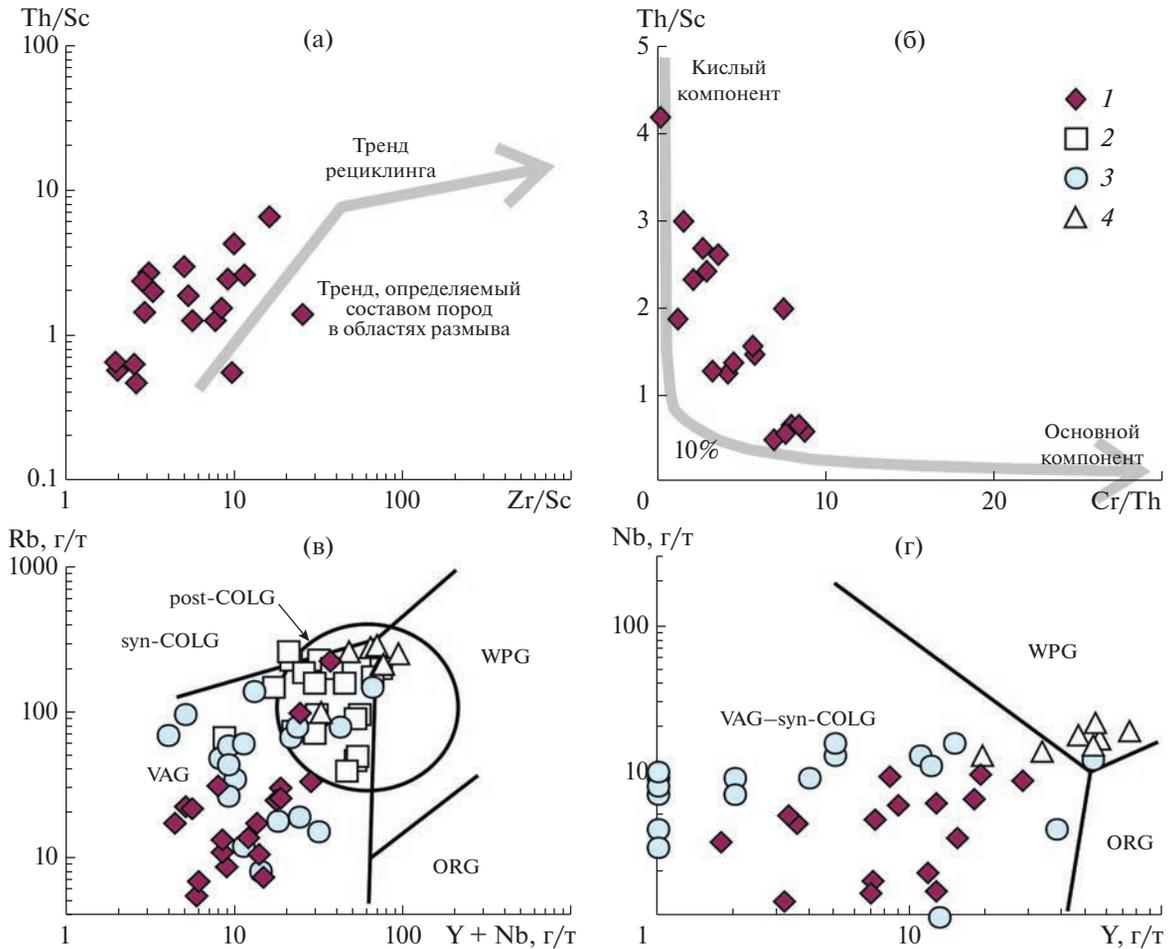
шение  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  варьирует от 6.5 до 26.4,  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O}$  – от 0.4 до 1.1, значения  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  находятся в пределах от 0.2 до 0.8.

На диаграммах  $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O})$  и  $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Fe}_2\text{O}_3^*/\text{K}_2\text{O})$  точки состава песчаников локализованы в полях аркозов и субаркозов. Модули ТМ и ЖМ в проанализированной выборке ( $n = 34$ ) связаны статистически значимой положительной корреляцией ( $r = 0.34$ ), а модули НКМ и ГМ – значимой отрицательной ( $r = -0.43$ ). Следовательно, песчаники формации Куданкулам сложены петрогенным материалом.

Породы формации Куданкулам залегают на протерозойских чарнокитах, кварц-полевошпатовых гнейсах и гранито-гнейсах Хондалитового пояса Кералы, рассматривающихся как источники обломочного материала для них (Armstrong-Altrin et al., 2004). Для сопоставления литогеохимических характеристик песчаников и прототипов источников кластики мы привлекли данные из публикаций (Chacko et al., 1992; Ravindra Kumar, Sreejith, 2016; Remya et al., 2020).

Керальский хондалитовый пояс сложен в основном гнейсами, хондалитами (графитовые гранат-биотит-силлиманитовые-кордиерит-шпинель гнейсы) и кордиеритовыми гнейсами (Chacko et al., 1992). Существенную роль в нем играют чарнокиты, встречаются также основные гранулиты, известково-силикатные породы и кварциты. Кислые/гранитные чарнокиты и очковые гнейсы напоминают по валовому химическому составу граниты I-типа (Sreejith, Ravindra Kumar, 2013; Ravindra Kumar, Sreejith, 2016). На диаграмме (Y + Nb)–Rb их точки тяготеют к полю WPG, частично присутствуя и в поле VAG (Ravindra Kumar, Sreejith, 2016; Remya et al., 2020). Точки тоналитовых чарнокитов в основном расположены в поле VAG. На диаграмме Nb–Y точки состава последних локализованы в поле VAG + syn-COLG, а точки кислых разновидностей – в полях ORG и WPG; некоторые из них есть и в поле VAG + syn-COLG.

На диаграмме Zr/Sc–Th/Sc точки состава песчаников формации Куданкулам расположены в области тренда, определяемого составом пород в источниках сноса (рис. 6а). Соответственно это песчаники первого седиментационного цикла. Как следует из распределения их точек на диаграмме Cr/Th–Th/Sc, доля продуктов размыва кислых магматических пород в них в значительном числе случаев превышает 90% (рис. 6б). На графике (Y + Nb)–Rb точки состава песчаников, как и точки прототипов источников обломочного материала для них, в основном сконцентрированы в поле VAG. Область точек песчаников имеет существенное перекрытие с областью точек супракрустальных пород и чарнокитов Хондалитового пояса Керала, описанных в работе (Chacko et al.,



**Рис. 6.** Особенности локализации точек песчаников формации Куданкулам и предполагаемых прототипов источников кластики для них на диаграммах  $Zr/Sc$ – $Th/Sc$  (а),  $Cr/Th$ – $Th/Sc$  (б),  $(Y + Nb)$ – $Rb$  (в) и  $Y$ – $Nb$  (г). 1 – песчаники формации Куданкулам; 2 – разнообразие гнейсы (Chacko et al., 1992); 3 – тоналитовые и гранитные чарнокиты и их очковые разности (Ravindra Kumar, Sreejith, 2016); 4 – чарнокиты и гнейсы (Remya et al., 2020).

1992) (рис. 6в). Это же характерно и для распределения точек песчаников на графике  $Y$ – $Nb$  (рис. 6г).

**Аркозовые и близкие к ним песчаники формации Талчир, нижняя пермь, Индия (объект 5).** Осадочные последовательности пермо-триасового возраста в центральной части п-ва Индостан выполняют ряд интракратонных бассейнов. Самым западным из них является Бассейн Сатпура. Его осадочное выполнение расчленяется на несколько формаций (Талчир, Мотур, Биджори и др.). Породы формации Талчир (нижняя пермь) залегают несогласно непосредственно на докембрийских гранитах и гранитогнейсах (Suttner, Dutta, 1986; Ghosh et al., 2012). Формация Талчир объединяет конгломераты и аркозовые, лититоаркозовые и субаркозовые песчаники, подчиненную роль играют глинистые породы и известняки. Песчаники характеризуются значительной структурной и минералогической незрелостью, что предполагает принадлежность их к образованиям первого седиментационного цикла (Ghosh et al., 2012). Со-

держание кварца в них варьирует от 53 до 69, полевых шпатов – от 17 до 46, обломков пород – от 1 до 17%. На диаграмме  $\lg(SiO_2/Al_2O_3)$ – $\lg(Na_2O/K_2O)$  фигуративные точки песчаников локализованы в полях аркозов и литаренитов (Zaidi et al., 2020). Обломки пород представлены гнейсами и гранитами (преобладают), сланцами, амфиболитами, кремнистыми породами, кварцитами, филлитами и др. Состав плагиоклаза в песчаниках и в гранитах и кислых вулканитах докембрийского фундамента сопоставимы. Возможными источниками кластики для песчаников формации Талчир считаются граниты комплекса Чхотанагпур. На основе анализа моделей смешения предполагается, что вклад их составлял 90, а диоритов и габбро по 5% (Zaidi et al., 2020).

Среднее содержание  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  в песчаниках, рассчитанное по данным (Ghosh et al., 2012), составляет  $78.0 \pm 3.2$  и  $10.8 \pm 1.6$  мас. %. Параметр  $Fe_2O_3^*$  среднее равен  $3.6 \pm 1.0$  мас. %. Среднее содер-

жание СаО и MgO не превышает 1.2 мас. %. Параметр  $K_2O_{\text{среднее}}$  равен  $2.5 \pm 0.4$  мас. %, а  $Na_2O_{\text{среднее}}$  составляет  $1.7 \pm 0.5$  мас. %. Величина  $SiO_2/Al_2O_3$  варьирует от 5.1 до 13.1,  $Fe_2O_3^*/K_2O$  изменяется от 0.5 до 2.3, а  $Na_2O/K_2O$  – от 0.5 до 1.3.

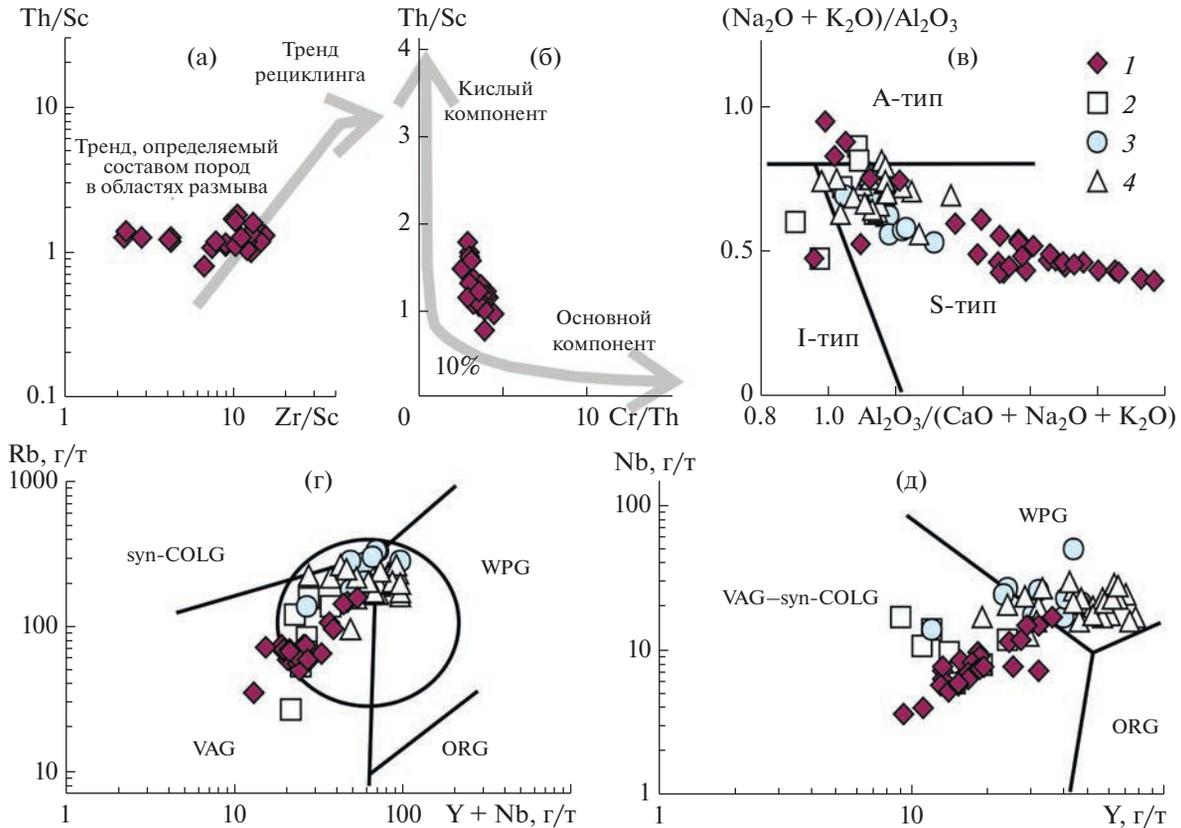
На диаграмме  $lg(SiO_2/Al_2O_3) - lg(Na_2O/K_2O)$  точки песчаников расположены в поле литов; несколько точек находится в полях аркозов и субаркозов. На диаграмме  $lg(SiO_2/Al_2O_3) - lg(Fe_2O_3^*/K_2O)$  они локализованы в полях вакк и литаренитов, существенно меньше их в поле аркозов. Между модулями ТМ и ЖМ в исследованной выборке ( $n = 33$ ) наблюдается статистически значимая положительная корреляция ( $r = 0.78$ ), а между модулями НКМ и ГМ – значимая отрицательная ( $r = -0.67$ ). Это позволяет считать, что песчаники формации Талчир сложены петрогенным материалом.

Гнейсовый комплекс Чхотанагпур, породы которого считаются возможными источниками кластики для песчаников формации Талчир (Zaidi et al., 2020), представляет гранит-гранодиорит-габбрультрамафитовую ассоциацию (Chakraborty, Roy, 2013). Он включает кислые гнейсы и мигматиты, гранулиты, кристаллические сланцы и метадоломиты, прорванные метагаббро, метадолеритами, амфиболитами, гранитоидами, сиенитами и др. (Yadav et al., 2016). Положение точек магматических пород комплекса на дискриминантных диаграммах для кислых пород различно. Так, биотитовые граниты и гранодиориты плутона Нимчак, Восточная Индия, на диаграмме  $(Y + Nb) - Rb$  концентрируются в поле VAG (Gogoi, 2022). Протерозойские серые и розовые граниты, а также порфириовидные их разности северной периферии комплекса Чхотанагпур принадлежат преимущественно к гранитам А-типа (Yadav et al., 2016). На диаграмме  $(Y + Nb) - Rb$  большинство точек состава гранитов расположено в поле WPG, тогда как точки порфириовидных их разностей локализованы у сочленения полей WPG, VAG и syn-COLG. На диаграмме  $Y - Nb$  большинство их точек сосредоточено в поле WPG, однако некоторые из них присутствуют в поле VAG + syn-COLG (Yadav et al., 2016). Для сопоставления литогеохимических характеристик песчаников и прототипов источников кластики использованы данные из публикаций (Ghosh et al., 2012; Chakraborty, Roy, 2013; Yadav et al., 2016; Zaidi et al., 2020; Gogoi, 2022).

Исходя из положения фигуративных точек песчаников на графике  $Zr/Sc - Th/Sc$  (рис. 7а) они сложены материалом первого седиментационного цикла, т.е. состав их достаточно близок к составу пород-источников кластики. Доля продуктов размыва кислых магматических пород в песчаниках весьма существенная (80–90%, рис. 7б). На диаграмме  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O) - (Na_2O +$

$+ K_2O)/Al_2O_3$  точки состава и песчаников и прототипов пород-источников обломочного материала для них сосредоточены преимущественно в поле гранитов S-типа (рис. 7в). На графике  $(Y + Nb) - Rb$  фигуративные точки песчаников формации Талчир расположены в поле VAG и образуемая ими область имеет заметное перекрытие с областью точек биотитовых гранитов и гранодиоритов-тоналитов южной части комплекса Чхотанагпур, описанных в работе (Chakraborty, Roy, 2013). Точки состава других возможных прототипов пород-источников расположены в области сочленения основных полей графика (рис. 7г). На диаграмме  $Y - Nb$  перекрытие областей точек песчаников, биотитовых гранитов и гранодиоритов-тоналитов выражено еще ярче (рис. 7д). Все сказанное позволяет считать, что геохимические характеристики песчаников достаточно корректно отражают аналогичные характеристики пород-источников кластики.

**Аркозовые песчаники верхнего карбона–нижней перми, Передовой хребет, Колорадо и Юта (объект 6).** Аркозовые песчаники широко распространены среди отложений верхнего карбона и нижней перми запада США (штаты Колорадо и Юта, Передовой хребет, Мокрые горы, хр. Сангре-де-Кристо и др.). Они слагают формации Фаунтин, Катлер, Минтурн, Сангре-де-Кристо и др. (Suttner, Dutta, 1986; van de Kamp, Leake, 1994; Lindsey, 2000). Средний состав песчаников формации Фаунтин, по данным авторов работы (Suttner, Dutta, 1986), кварц – 65%, полевой шпат – 26%, обломки пород – 9%. Содержание глинистого цемента/матрикса (каолинит, смектит и хлорит) варьирует от 5 до 36%. Присутствующие в составе формации Фаунтин конгломераты сложены гальками пегматитов, мусковитовых и лейкогранитов, тоналитовых гнейсов, гранито-гнейсов и метаморфогенного кварца (Cullers, Stone, 1991). В ряде районов песчаники формации Фаунтин терпели переработку гидротермальными флюидами, сопровождавшуюся почти полным исчезновением обломочных плаггиоклазов и притоком калия (van de Kamp, Leake, 1994). Песчаники формации Катлер содержат ~49% кварца, 44% полевых шпатов и 7% обломков пород; достаточно близкий состав имеют и песчаники формации Минтурн. Большинство обломочных зерен в песчаниках формаций Минтурн и Сангре-де-Кристо обладает угловатой формой, что предполагает образование их в первом седиментационном цикле за счет эрозии пород докембрийского фундамента. Обломки пород в песчаниках формаций Минтурн и Сангре-де-Кристо представлены гранитами, гнейсами, сланцами и песчаниками. Доля кальцитового цемента не превышает нескольких процентов. Метаморфизм пород отвечает зеленосланцевой фации (Lindsey, 2000). Источниками кластики для песчаников формации Фаунтин считаются породы террейна Явапай-Мазатцаль, но



**Рис. 7.** Положение фигуративных точек песчаников формации Талчир и предполагаемых прототипов источников кластики для них на графиках  $Zr/Sc$ – $Th/Sc$  (а),  $Cr/Th$ – $Th/Sc$  (б),  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ – $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$  (в),  $(Y + Nb)$ – $Rb$  (г) и  $Y$ – $Nb$  (д). 1 – песчаники формации Талчир; 2 – биотитовые и тоналитовые граниты (Chakraborty, Roy, 2013); 3 – кислые породы массива Нимчак (Gogoi, 2022); 4 – гранитоиды северной периферии гнейсового комплекса Чхотанангуп (Yadav et al., 2016).

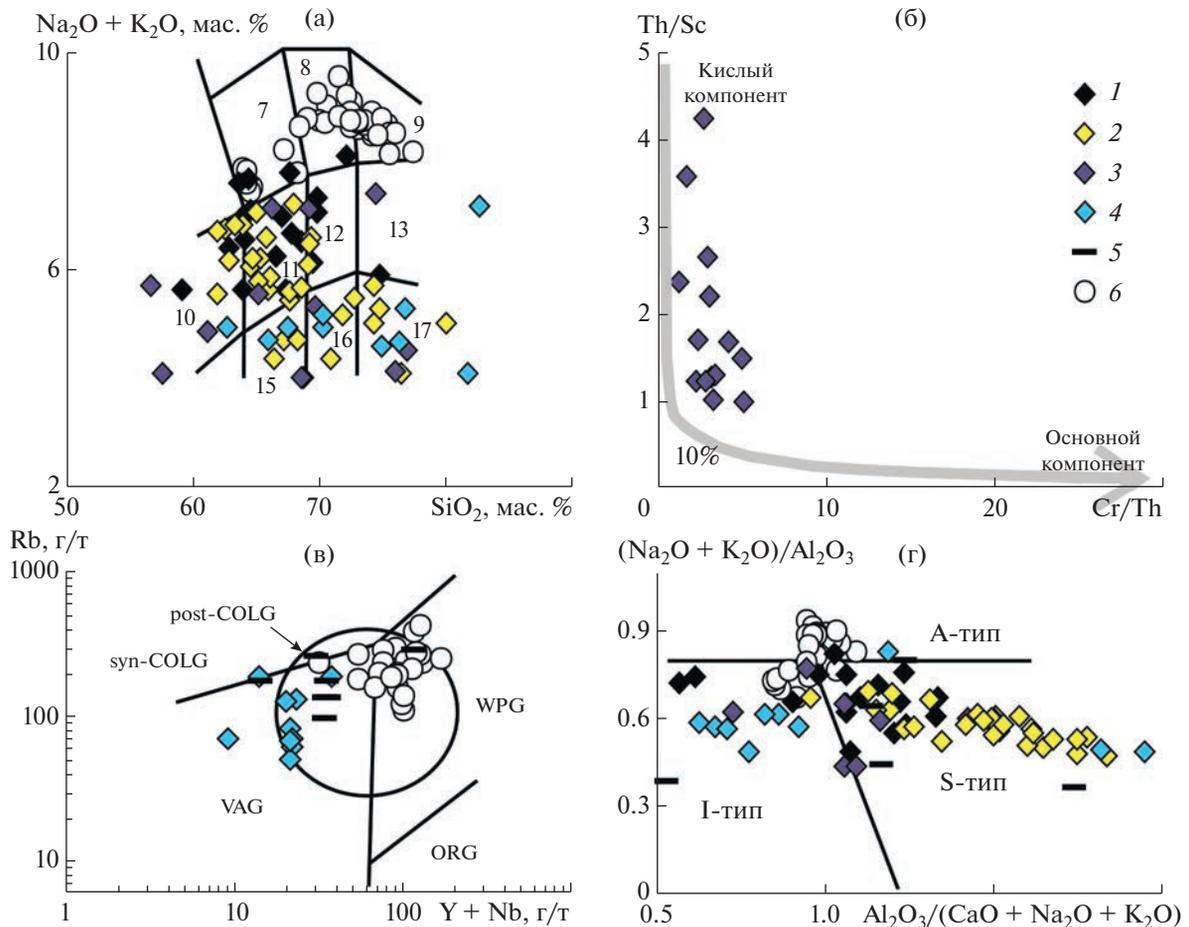
главным ее поставщиком рассматриваются граниты, тоналитовые гнейсы и пегматиты батолита Пайкс Пик (Suttner, Dutta, 1986; Lindsey, 2000).

Среднее содержание  $SiO_2$  в песчаниках формаций Фаунтин, Сангре-де-Кристо и Минтурн, рассчитанное по данным, приведенным в публикациях (Cullers, Stone, 1991; van de Kamp, Leake, 1994; Lindsey, 2000), составляет соответственно  $68.0 \pm 9.1$ ,  $66.3 \pm 3.2$  и  $68.0 \pm 4.5$  мас. %. Среднее содержание  $Al_2O_3$  равно  $13.5 \pm 4.3$ ,  $13.8 \pm 0.7$  и  $13.5 \pm 1.7$  мас. %. Величина  $Fe_2O_3^*$  составляет  $5.7 \pm 4.0$ ,  $5.1 \pm 1.6$  и  $4.9 \pm 1.3$  мас. %. Значения  $CaO_{\text{среднее}}$  и  $MgO_{\text{среднее}}$  не превышают 3.0 мас. %. Параметр  $K_2O_{\text{среднее}}$  для песчаников формации Фаунтин равен  $4.4 \pm 1.8$  мас. % (максимум – 6.8 мас. %), а  $Na_2O_{\text{среднее}}$  составляет  $0.4 \pm 0.4$  мас. % (минимум – 0.1, максимум – 1.1 мас. %). Для песчаников формации Сангре-де-Кристо среднее содержание  $K_2O$  равно  $3.4 \pm 0.5$ , формации Минтурн –  $3.2 \pm 0.7$  мас. %. Параметр  $Na_2O_{\text{среднее}}$  для песчаников двух последних формаций равен  $3.5 \pm 0.6$  и  $2.6 \pm 1.0$  мас. %. Величина  $SiO_2/Al_2O_3$  варьирует от 2.5 до 12.7 для песчаников формации Фаунтин, а для

песчаников формаций Сангре-де-Кристо и Минтурн – от 3.8 до 5.4 и от 3.9 до 8.6. Параметр  $Fe_2O_3^*/K_2O_{\text{среднее}}$  для названных формаций равен соответственно  $2.0 \pm 2.6$  (без разборокки анализов),  $1.5 \pm 0.4$  и  $1.6 \pm 0.6$ , а  $Na_2O/K_2O_{\text{среднее}}$  составляет  $0.1 \pm 0.1$ ,  $1.1 \pm 0.2$  и  $0.9 \pm 0.5$ .

На диаграмме  $\lg(SiO_2/Al_2O_3)$ – $\lg(Fe_2O_3^*/Na_2O)$  точки песчаников формаций Сангре-де-Кристо и Минтурн сосредоточены в поле вакк, значительно меньше их в полях лититов и аркозов (Lindsey, 2000). На диаграмме  $\lg(SiO_2/Al_2O_3)$ – $\lg(Na_2O/K_2O)$  все фигуративные точки располагаются в узком диапазоне значений  $\lg(SiO_2/Al_2O_3)$ , но обладают широким диапазоном величин  $\lg(Na_2O/K_2O)$ . Это предполагает преимущественное разрушение плагиоклаза в породах-источниках кластики, содержащих и К- и Na-Ca-полевые шпаты.

Исходя из соотношений модулей ТМ, ЖМ, НКМ и ГМ, песчаники формаций Минтурн ( $n = 32$ ) и Сангре-де-Кристо ( $n = 18$ ) являются породами первого цикла, а формации Фаунтин ( $n = 14$ ) могут



**Рис. 8.** Распределение точек состава песчаников верхнего карбона–нижней перми Передового хребта и предполагаемых прототипов источников кластики для них на диаграммах  $\text{SiO}_2$ – $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  (а),  $\text{Cr}/\text{Th}$ – $\text{Th}/\text{Sc}$  (б),  $(\text{Yb} + \text{Nb})$ – $\text{Rb}$  (в) и  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ – $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$  (г). 1–4 – песчаники: (1 – формация Сангре-де-Кристо, 2 – формация Минтурн, 3 – формация Фаунтин, по (Lindsey, 2000), 4 – формации Фаунтин, Минтурн и Катлер, по (van de Kamp, Leake, 1994)); 5 – глинистые породы формаций Фаунтин, Минтурн и Катлер, по (van de Kamp, Leake, 1994); 6 – гранитоиды батолита Пайкс Пик.

быть литогенными или преобразованы вторичными процессами.

Батолит Пайкс-Пик (~1.08 млрд лет), считающийся авторами публикаций (Suttner, Dutta, 1986; Lindsey, 2000) основным источником кластики для аркозовых и ассоциирующихся с ними песчаников верхнего карбона–нижней перми Передового хребта, сложен биотит-амфиболовыми сиеногранитами, подчиненную роль играют монцограниты. Батолит образован двумя петрогенетически различными типами гранитов, обладающими характеристиками А-типа (Smith et al., 1999).

Для сопоставления литогеохимических особенностей песчаников формаций Фаунтин, Катлер, Минтурн и Сангре-де-Кристо с породами батолита Пайкс Пик нами использованы аналитические данные из работ (Cullers, Stone, 1991; van de Kamp, Leake, 1994; Smith et al., 1999; Lindsey, 2000). На диаграмме  $\text{SiO}_2$ – $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  точки

состава песчаников названных формаций тяготеют к полям граносиенитов, кварцевых диоритов, гранодиоритов, гранитов и низкощелочных гранодиоритов, гранитов и лейкогранитов, тогда как фигуративные точки гранитоидов Пайкс Пик расположены в полях умеренно щелочных гранитов и лейкогранитов (рис. 8а). Доля продуктов размыва кислых магматических пород в песчаниках формации Фаунтин может быть оценена как составляющая более 90% (рис. 8б). На графике  $(\text{Yb} + \text{Nb})$ – $\text{Rb}$  точки состава аркозов формаций Фаунтин, Катлер и Минтурн сосредоточены в поле VAG, тогда как фигуративные точки гранитоидов Пайкс Пик находятся в основном в поле WPG (рис. 8в). На диаграмме  $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ – $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$  точки песчаников присутствуют как в поле гранитов I-типа (песчаники формаций Фаунтин и Сангре-де-Кристо), так и в поле гранитов S-типа (аркозы Фаунтин, Минтурн и Сангре-де-Кристо). В последнем поле

в основном сосредоточены и точки ассоциирующихся с аркозами глинистых пород (рис. 8г). В то же время фигуративные точки пород батолита Пайкс Пик локализованы в основном в поле гранитов А-типа и меньше в поле гранитов I-типа. Это же следует и из анализа положения точек состава аркозов и гранитоидов батолита Пайкс Пик на диаграмме  $10^{4*}Ga/Al-Zr$  (рис. 4б). Таким образом, породы батолита Пайкс Пик трудно рассматривать как основной или преобладающий источник кластики для аркозовых и ассоциирующихся с ними песчаников верхнего карбона—нижней перми Передового хребта.

**Аркозовые и лититовые песчаники сакуканской свиты удоканского комплекса (объект 7).** Аркозовые и близкие к ним по составу песчаники характерны также и для сакуканской свиты кеменской серии, завершающей разрез нижнепротерозойского удоканского комплекса (Федоровский, 1972; Сочава, 1981). В составе свиты преобладают песчаники, сложенные угловатыми или полуокатанными зернами кварца (28–65%), полевых шпатов (20–45%, преобладает плагиоклаз) и обломками пород (8–30%). Среди последних есть микрокварциты, кремнистые и карбонатные породы, аргиллиты и алевролиты (Сочава, 1981). Метаморфизм пород соответствует мусковит-хлоритовой субфации. Основными источниками кластики для песчаников являлись, по всей видимости, метаморфиты и гранитоиды архея и раннего протерозоя (Подковыров и др., 2006; Великославинский и др., 2018; Котов и др., 2018). Расчеты О.В. Граунова с соавторами (2023) показывают, что к таковым могли относиться тоналит-трондьемитовые гнейсы и лейкократовые гранито-гнейсы олекминского комплекса (~70 и 17%), кристаллосланцы, гиперстен-биотитовые плагио- и гранито-гнейсы федоровской толщи, а также гранитоиды куандинского комплекса.

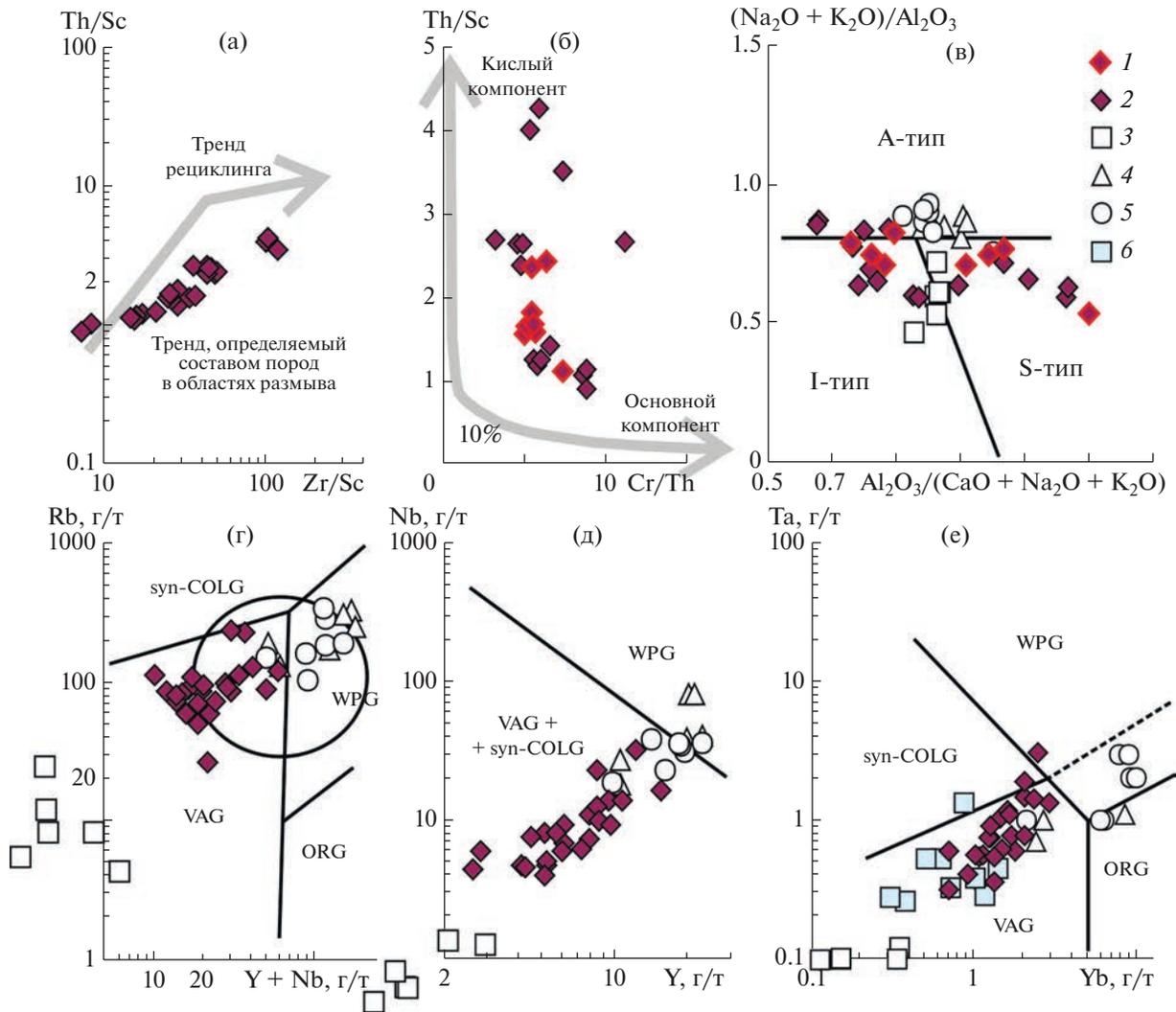
Литогеохимические особенности песчаников сакуканской свиты рассмотрены нами для образцов, отобранных В.П. Ковачем и Е.В. Адамской в бассейнах рек Читканда, Сакукан, Наминга и др. Среднее содержание  $SiO_2$  в песчаниках составляет  $73.4 \pm 6.4$  мас. %. Величина  $Al_2O_3$  среднее равна  $10.5 \pm 3.1$  мас. %. Параметр  $Fe_2O_3^*$  среднее составляет  $4.2 \pm 2.2$  мас. %. Среднее содержание  $CaO$  и  $MgO$  —  $2.0 \pm 1.2$  и  $1.2 \pm 1.2$  мас. %. Параметр  $K_2O$  среднее равен  $3.3 \pm 1.0$  мас. %, а  $Na_2O$  среднее —  $2.3 \pm 0.9$  мас. %. Величина  $SiO_2/Al_2O_3$  варьирует от 3.0 до 12.5,  $Fe_2O_3^*/K_2O$  изменяется от 0.5 до 2.9, а  $Na_2O/K_2O$  — от 0.1 до 3.1.

На диаграмме  $lg(SiO_2/Al_2O_3) - lg(Na_2O/K_2O)$  фигуративные точки песчаников сосредоточены в полях аркозов и субаркозов, лититов и граувакк. Примерно также распределены они и на диаграмме  $lg(SiO_2/Al_2O_3) - lg(Fe_2O_3^*/K_2O)$ . Между модуля-

ми ТМ и ЖМ в нашей выборке ( $n = 24$ ) существует статистически значимая положительная корреляция ( $r = 0.75$ ); модули НКМ и ГМ связаны значимой отрицательной ( $r = -0.47$ ) корреляцией. Это, как и микропетрографические наблюдения, указывает на петрогенный характер материала, слагающего песчаники.

При сопоставлении состава песчаников сакуканской свиты и прототипов источников кластики для них мы используем сведения о химическом составе гранитоидов олекминского и нелюкинско-го комплексов и гранитогнейсов I типа, распространенных в западной части Западно-Алданского мегаблока и в зоне сочленения Чара-Олекминского и Алданского геоблоков (Котов и др., 2004; Великославинский и др., 2011; Вовна, 2016). Гранито-гнейсы сложены калиевым полевым шпатом (10–50%), плагиоклазом (20–40%) и кварцем (20–40%). Спектры распределения редких и рассеянных элементов в них сопоставимы с теми, что характерны для внутриплитных гранитоидов. Гранитоиды нелюкинского комплекса являются анорогенными (Котов и др., 2004) и принадлежат подгруппе  $A_2$ . На дискриминантных диаграммах точки состава гранитоидов тяготеют к полю WPG.

Песчаники сакуканской свиты, исходя из распределения их точек на диаграмме  $Zr/Sc-Th/Sc$  (рис. 9а), являются породами первого седиментационного цикла. Источниками кластики для них являлись кислые магматические породы, что хорошо видно по распределению фигуративных точек как собственно аркозов, так и песчаников близкого к ним состава, на графике  $Cr/Th-Th/Sc$  (рис. 9б). На диаграмме  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O) - (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$  точки песчаников присутствуют в полях гранитов I- и S-типа. Фигуративные точки гранитоидов олекминского и нелюкинского комплексов, а также гранитогнейсов I типа на этом графике тяготеют к линии, разделяющей указанные поля, а также к полю гранитов А-типа (рис. 9в). На диаграмме  $(Y + Nb) - Rb$  точки состава песчаников расположены в поле VAG. Они практически не имеют перекрытий ни с областью точек пород олекминского комплекса, расположенной также в поле VAG, но в области более низких, чем в песчаниках, содержаний  $Y + Nb$  и  $Rb$ , ни с областями точек гранитогнейсов I типа (Великославинский и др., 2011) и гранитоидов нелюкинского комплекса (рис. 9г). На графике  $Y-Nb$  точки состава песчаников локализованы в поле VAG + syn-COLG. Точки возможных прототипов пород-источников обломочного материала для них присутствуют здесь и в названном поле и в поле WPG (рис. 9д). Наконец, на графике  $Yb-Ta$  (Pearce et al., 1984) точки состава песчаников, как и точки пород олекминского комплекса (Великославинский и др., 2011; Вовна, 2016), расположены в поле VAG, тогда как точки других возмож-



**Рис. 9.** Положение фигуративных точек песчаников сакуканской свиты и предполагаемых прототипов источников кластики для них на графиках  $Zr/Sc-Th/Sc$  (а),  $Cr/Th-Th/Sc$  (б),  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)-(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$  (в),  $(Y + Nb)-Rb$  (г),  $Y-Nb$  (д) и  $Yb-Ta$  (е). 1 – аркозы (выделены не на всех графиках); 2 – ассоциирующие с ними песчаники; 3 – породы олекминского комплекса (Великославинский и др., 2011); 4 – то же (Вовна, 2016) 5 – гранитогнейсы I типа; 6 – нелюкинские гранитоиды.

ных прототипов пород-источников кластики можно видеть в полях ORG и WPG (рис. 9е). Все сказанное дает основание считать, что основной вклад в формирование песчаников вносили продукты размыва пород олекминского комплекса. Такой же вывод можно сделать и при анализе диаграммы  $10^{4*}Ga/Al-Zr$  (рис. 4в), где наблюдается перекрытие областей точек составов песчаников и пород олекминского комплекса.

**Литовые и ассоциирующие с ними аркозовые песчаники нижнего протерозоя Бирюсинского выступа Сибирского кратона (объект 8).** В Бирюсинском Присяянье аркозовые песчаники известны в разрезах нижнепротерозойской ингашинской свиты Урикско-Ийского грабена (Гладкочуб и др., 2014; Мотова и др., 2022). Названная свита слож-

на разнозернистыми песчаниками и алевросланцами, среди которых можно видеть прослои карбонатных пород. Породы метаморфизованы в условиях зеленосланцевой фации. В каркасе песчаников преобладают кварц (20–42%) и полевые шпаты (10–40%). Среди обломков пород (5–30%) ведущая роль принадлежит гранитоидам и гранитогнейсам, встречаются фрагменты кварцитов. Химический состав песчаников, как отмечено в публикации (Мотова и др., 2022), отвечает аркозам и субаркозам.

Среднее содержание  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$  в песчаниках по аналитическим данным, заимствованным из публикации (Мотова и др., 2022), равно  $76.2 \pm 4.7$  и  $11.1 \pm 2.1$  мас. %. Параметр  $Fe_2O_3^{*}$  среднее составляет  $3.1 \pm 1.0$  мас. %. Среднее содержание CaO и

MgO весьма невелико —  $0.5 \pm 0.3$  и  $1.4 \pm 0.7$  мас. %. Параметр  $K_2O_{\text{среднее}}$  равен  $2.0 \pm 0.7$  мас. %, а  $Na_2O_{\text{среднее}}$  —  $2.3 \pm 0.8$  мас. %. Величина  $SiO_2/Al_2O_3$  варьирует от 3.7 до 9.7,  $Fe_2O_3^*/K_2O$  изменяется от 0.9 до 2.5, а  $Na_2O/K_2O$  — от 0.2 до 2.6.

На диаграмме  $lg(SiO_2/Al_2O_3) - lg(Na_2O/K_2O)$  фигуративные точки большинства песчаников сосредоточены в поле литинитов; по две точки расположены в полях аркозов и граувакк. На диаграмме  $lg(SiO_2/Al_2O_3) - lg(Fe_2O_3^*/K_2O)$  состав песчаников соответствует в основном литаренитам. Между модулями ГМ и ЖМ в используемой нами выборке ( $n = 13$ ) существует статистически незначимая положительная корреляция ( $r = 0.35$ ). Модули НКМ и ГМ связаны незначимой отрицательной ( $r = -0.53$ ) корреляцией. Это показывает, что песчаники сложены литогенным материалом или доля его в их составе существенна.

Диапазон возрастов обломочного циркона, выделенного из песчаников ингашинской свиты, составляет 2788–1909 млн лет (Гладкочуб и др., 2014). При этом более 40% их зерен образуют максимум с возрастом 1963 млн лет; другие максимумы имеют возраст 1909, 2093, 2177, 2317, 2487, 2526 и 2597 млн лет. Исходя из сказанного Д.П. Гладкочуб с соавторами (2014, с. 22) считают, что “...накопление ингашинской свиты происходило после 1.90 млрд лет, но до внедрения гранитоидов саянского комплекса (1.87–1.83 млрд лет)”. Авторы указанной работы полагают также, что источником слагающей песчаники кластики являлись породы фундамента Сибирского кратона, а “...основной объем материала в бассейне седиментации поступал, по-видимому, за счет разрушения и сноса вещества с западного (в современных координатах), “Бирюсинского” берега бассейна” (там же, с. 25). Nd модельный возраст песчаников ингашинской свиты составляет 2.5–2.3 млрд лет, таким образом источниками слагающего их материала являлись породы неоархейского и раннепротерозойского возраста. Предполагается, что в качестве таковых могли выступать мигматиты и ортогнейсы хайламинского комплекса/толщи Бирюсинского выступа (Мотова и др., 2022). Указанный комплекс/толща сложен в основном биотитовыми и гранат-биотитовыми гнейсами при подчиненной роли амфибол-биотитовых ортогнейсов и амфиболитов (Галимов и др., 2012; Дмитриева, Ножкин, 2012). Nd модельный возраст гнейсов (2.6–2.8 млрд лет) предполагает, что формирование гранулит-гнейсового основания Бирюсинского блока происходило в позднем архее (Туркина, 2005; Туркина и др., 2007).

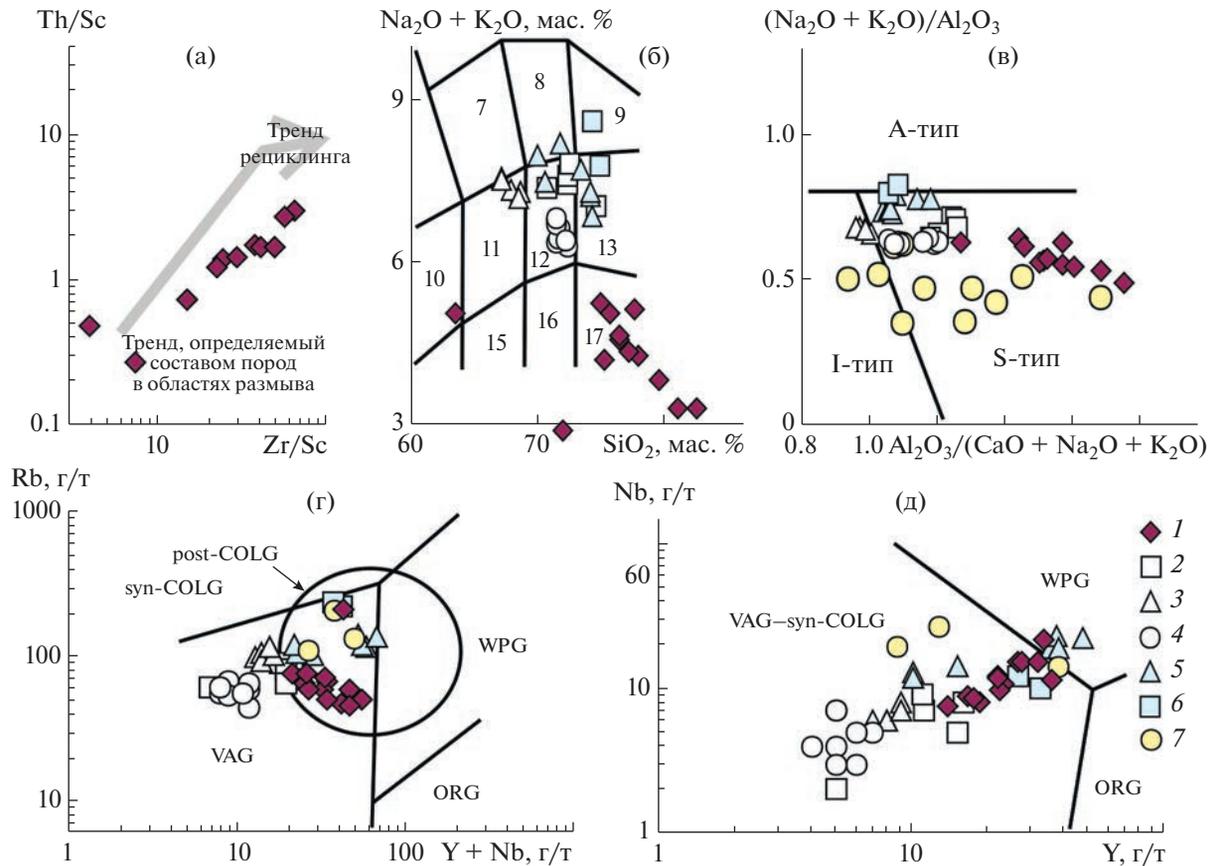
Вместе с тем с учетом преобладания среди обломочного циркона ингашинской свиты, кристаллов с возрастом ~1.96 млрд лет мы предполагаем, что существенная часть кластики поступала

в бассейн и за счет размыва надсубдукционных и коллизионных гранитоидов с временным диапазоном формирования ~2.07–1.95 млрд лет (Донская, 2020). В Бирюсинском блоке такие гранитоиды не известны, поэтому для сравнения состава песчаников ингашинской свиты с составом возможных прототипов источников кластики мы использовали аналитические данные для гранитов Хомутского и Еловского массивов, а также кутимского комплекса, трондьемитов чуйского комплекса и гранитогнейсов Голоуспенского блока (Донская, 2019).

Соотношение Zr, Th и Sc в песчаниках ингашинской свиты (рис. 10а) дает основание считать их сложенными материалом первого седиментационного цикла, что не согласуется с выводами, сделанными на основе анализа соотношений основных пороодообразующих оксидов. На диаграмме  $SiO_2 - (Na_2O + K_2O)$  фигуративные точки песчаников сосредоточены преимущественно в поле низкщелочных лейкогранитов, тогда как точки состава предполагаемых прототипов пород-источников обломочного материала для них сконцентрированы в полях гранодиоритов, собственно гранитов и лейкогранитов (рис. 10б). На графике  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O) - (Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$  точки состава песчаников локализованы в поле гранитов S-типа. В нем же присутствует большинство точек прототипов источников, хотя некоторые из них можно видеть и в поле I-гранитов (рис. 10в). На графике  $(Y + Nb) - Rb$  точки состава песчаников и предполагаемых прототипов источников кластики расположены в поле VAG (рис. 10г). При этом точки песчаников отвечают и полю post-COLG, что характерно не для всех прототипов источников. На диаграмме  $Y - Nb$  точки состава и песчаников и прототипов источников кластики расположены в основном в поле VAG + syn-COLG (рис. 10д); как и на диаграмме  $(Y + Nb) - Rb$ , область точек песчаников здесь почти не имеет перекрытия с областью точек трондьемитов чуйского комплекса. Следовательно, породы такого состава источниками обломочного материала для песчаников ингашинской свиты, скорее всего, быть не могли.

## ВЫВОДЫ

Все сказанное выше позволяет думать, что литогеохимические характеристики аркозовых и субаркозовых песчаников/пород первого седиментационного цикла, позволяют в большинстве случаев достаточно уверенно судить о возможной “геодинамической природе” кислых изверженных пород, являвшихся источниками кластики для них. Очевидно, что более достоверные выводы мы получаем при анализе свойств аркозам и субаркозам содержаний и соотношений высокозарядных элементов, тогда как содержания и



**Рис. 10.** Распределение точек состава песчаников ингашинской свиты и предполагаемых прототипов источников кластики для них на диаграммах  $Zr/Sc$ – $Th/Sc$  (а),  $SiO_2$ – $(Na_2O + K_2O)$  (б),  $Al_2O_3/(CaO + Na_2O + K_2O)$ – $(Na_2O + K_2O)/Al_2O_3$  (в),  $(Yb + Nb)$ – $Rb$  (г) и  $Y$ – $Nb$  (д). 1 – песчаники ингашинской свиты; 2 – граниты Хомутского массива; 3 – граниты Еловского массива; 4 – трондьемиты чуйского комплекса; 5 – граниты кутинского комплекса; 6 – гранитогнейсы Голоуспенского блока, все по (Донская, 2019); 7 – хайламинская толща, неопубликованные данные О.М. Туркиной.

соотношения основных породообразующих оксидов дают менее корректную информацию в силу известных трансформаций кластики на путях переноса и влияния свойственных им в определенных ситуациях повышенных концентраций оксидов кальция и магния. Таким образом, можно считать, что сделанные нами ранее (Маслов, 2022) выводы о возможной природе гранитов-источников обломочного материала для песчаников верхнерифейского аркозового комплекса Южного Урала имеют право на существование.

Авторы признательны О.М. Туркиной за неопубликованные аналитические данные по хайламинской толще и консультации по ряду вопросов, В.П. Ковачу за неопубликованные данные по песчаникам сакуканской свиты, и М.В. Лучицкой, предоставившей нам ряд необходимых публикаций. Советы и замечания анонимных рецензентов в существенной степени помогли более точному изложению и обсуждению авторами приведенного в работе фактического материала. Мы благодарны также научному редактору

В.Ю. Русакову, во многом способствовавшему тщательному рассмотрению этой работы.

Исследования проведены в рамках госзадания ГИН РАН и ИГГД РАН (темы FMMG-2023-0004 и FMUW-2021-0003).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Великославинский С.Д. (2003) Геохимическая типизация кислых магматических пород ведущих геодинамических обстановок. *Петрология*. **11**(4), 363–380.

Великославинский С.Д., Котов А.Б., Толмачева Е.В., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Ларин А.М. (2011) Раннедокембрийские гранитогнейсовые комплексы центральной части Алданского щита. *Петрология*. **19**(4), 399–416.

Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Кузнецов А.Б., Ковач В.П., Попов Н.В., Толмачева Е.В., Анисимова И.В., Плоткина Ю.В. (2018) Новые данные о возрасте тоналит-трондьемитовых ортогнейсов олекминского комплекса центральной части Чара-Олекминского геоблока Алданского щита. *ДАН*. **482**(5), 547–552.

- Вовна Г.М. (2016) *Геохимия, происхождение и возраст метаматматических пород ранней сиалической коры Алданского щита*. Дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Владивосток: ДВГИ ДВО РАН, 219 с.
- Галимова Т.Ф., Пашкова А.Г., Поваринцева С.А., Перфильев В.В., Намолова М.М., Андрющенко С.В., Денисенко Е.П., Пермьяков С.А., Миرونюк Е.П., Тимашков А.Н., Плеханов А.О. (2012) *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1: 1000000 (третье поколение). Серия Ангаро-Енисейская. Лист N-47 – Нижнеудинск. Объяснительная записка*. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 652 с.
- Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Станевич А.М., Донская Т.В., Мотова З.Л., Ванин В.А. (2014) Возрастные уровни и геодинамические режимы накопления докембрийских толщ Урикско-Ийского грабена, юг Сибирского кратона. *Геотектоника*. (5), 17-31.
- Граунов О.В., Подковыров В.Н., Ковач В.П., Котов А.Б., Великославинский С.Д., Сквитина Т.М., Адамская Е.В., Горовой В.А. (2023) Идентификация источников терригенных осадочных пород на основе геохимических данных с использованием модели линейного программирования. *ДАН*. **509**(2), 230-236.
- Дмитриева Н.В., Ножкин А.Д. (2012) Геохимия палеопротерозойских метатерригенных пород Бирюсинского блока юго-западной части Сибирского кратона. *Литология и полезные ископаемые*. (2), 156-179.
- Донская Т.В. (2019) *Раннепротерозойский гранитоидный магматизм Сибирского кратона*. Дис. ... докт. геол.-минерал. наук. Иркутск: ИЗК СО РАН, 410 с.
- Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ларин А.М., Ковач В.П., Саватенков В.М., Яковлева С.З., Бережная Н.Г., Плоткина Ю.В. (2004) Раннепротерозойские гранитоиды зоны сочленения Олекминской гранит-зеленокаменной и Алданской гранулитогнейсовой областей, Алданский щит: возраст, источники и геодинамические обстановки формирования. *Петрология*. **12**(1), 46-67.
- Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Великославинский С.Д., Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П., Ларин А.М., Толмачева Е.В., Федосеев А.М., Плоткина Ю.В. (2018) Верхняя возрастная граница формирования протолитов метаосадочных пород нижней части разреза удоканской серии (Алданский щит). *ДАН*. **479**(4), 412-416.
- Кузнецов В.Г. (2011) *Литология. Основы общей (теоретической) литологии*. М.: Научный мир, 360 с.
- Маслов А.В. (2022) Источники кластики для верхнерифейского аркозового комплекса Южного Урала: некоторые геохимические ограничения. *Геохимия*. **67**(11), 1124-1141.
- Maslov A.V. (2022) Clastic Sources for the Upper Riphean Arkose Complex of the Southern Urals: Some Geochemical Constraints. *Geochem. Int.* **60**(11), 1136-1152.
- Мотова З.Л., Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Демонтерова Е.И. (2022) Геохимия и источники сноса раннепротерозойских терригенных пород Урикско-Ийского грабена (юг Сибирского кратона). *Геология и геофизика*. **63**(1), 49-67.
- Подковыров В.Н., Котов А.Б., Ларин А.М., Котова Л.Н., Ковач В.П., Загорная Н.Ю. (2006) Источники и области сноса раннепротерозойских терригенных пород удоканской серии южной части Кодаро-удоканского прогиба: результаты Sm-Nd изотопно-геохимических исследований. *ДАН*. **408**(2), 223-227.
- Сочава А.В. (1981) Литология и петрохимия рудовмещающих комплексов Удоканского месторождения медистых песчаников. *Металлогения докембрия*. Л.: Наука, 155-167.
- Туркина О.М. (2014) *Лекции по геохимии магматического и метаморфического процессов*. Новосибирск: РИЦ НГУ, 118 с.
- Туркина О.М. (2005) Протерозойские тоналиты и трондемиты юго-западной окраины Сибирского кратона: изотопно-геохимические данные о нижнекоревых источниках и условиях образования расплавов в коллизионных обстановках. *Петрология*. **13**(1), 41-55.
- Туркина О.М., Ножкин А.Д., Баянова Т.Б., Дмитриева Н.В. (2007) Изотопные провинции и этапы роста докембрийской коры юго-западной окраины Сибирского кратона и его складчатого обрамления. *ДАН*. **413**(6), 810-815.
- Федоровский В.С. (1972) *Стратиграфия нижнего протерозоя хребтов Кодар и Удокан*. М.: Наука, 130 с.
- Шарпенюк Л.Н., Костин А.Е., Кухаренко Е.А. (2013) TAS-диаграмма сумма щелочей–кремнезем для химической классификации и диагностики плутонических пород. *Региональная геология и металлогения*. (56), 40-50.
- Швецов М.С. (1958) *Петрография осадочных пород*. Изд. третье. М.: Госгеолтехиздат, 416 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2000) *Основы литохимии*. СПб.: Наука, 479 с.
- Япаскурт О.В. (2016) *Литология*. М.: ИНФРА-М, 359 с.
- Ague J.J., Brimhall G.H. (1988) Magmatic arc asymmetry and distribution of anomalous plutonic belts in the batholiths of California: Effects of assimilation, crustal thickness, and depth of crystallization. *Geol. Soc. Am. Bull.* **100**(6), 912-927.
- Armstrong-Altrin J.S., Lee Y.I., Verma S.P., Ramasamy S. (2004) Geochemistry of sandstones from the Upper Miocene Kudankulam formation, Southern India: implications for provenance, weathering, and tectonic setting. *J. Sed. Res.* **74**(2), 285-297.
- Arvizu H.E., Iriando A., Izaguirre A., Chávez-Cabello G., Kamenov G.D., Solís-Pichardo G., Foster D.A., Lozano-Santa Cruz R. (2009) Rocas graníticas pérmicas en la Sierra Pinta, NW de Sonora, México: Magmatismo de subducción asociado al inicio del margen continental activo del SW de Norteamérica. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. **26**(3), 709-728.
- Barton D.C. (1916) The geological significance and genetic classification of arkose deposits. *J. Geol.* **24**, 417-449.
- Basu A., Blanchard D.P., Brannon J.C. (1982) Rare earth elements in the sedimentary cycle: a pilot study of the first leg. *Sedimentology*. **29**, 737-742.
- Bateman P.C., Clark L.D., Huber N.K., Moore J.G., Rinehart C.D. (1963) The Sierra Nevada batholiths – a synthesis of recent work across the central part. *U.S. Geological Survey Prof. Pap.* **414-D**, 46 p.
- Brongniart A. (1826) De l'arkose, caracteres mineralogiques et histoire geonostique de cette roche. *Ann. Sci. Nat.* **8**, 113-163.

- Chacko T., Ravindra Kumar G.R., Meen J.K., Rogers J.J.W. (1992) Geochemistry of high-grade supracrustal rocks from the Kerala Khondalite Belt and adjacent massif charnockites, South India. *Precambrian Res.* **55**, 469-489.
- Chakraborty K., Roy A. (2013) Petrogenesis of ultramafic-mafic to felsic plutonic rock associations from southern portion of Chhotanagpur gneissic complex in central India. *J. Geol. Soc. India.* **81**, 309-329.
- Cullers R. (1988) Mineralogical and chemical changes of soil and stream sediment formed by intense weathering of the Danburg granite, Georgia, U.S.A. *Lithos.* **21**, 301-314.
- Cullers R.L., Barrett T., Carlson R., Robinson B. (1987) Rare-earth element and mineralogical changes in Holocene soil and stream sediment: A case study in the Wet Mountains, Colorado, U.S.A. *Chem. Geol.* **63**, 275-297.
- Cullers R.L., Basu A., Suttner L.J. (1988) Geochemical signature of provenance in sand-size material in soils and stream sediments near the Tobacco Root batholith, Montana, U.S.A. *Chem. Geol.* **70**, 335-348.
- Cullers R.L., Stone J. (1991) Chemical and mineralogical comparison of the Pennsylvanian Fountain Formation, Colorado, U.S.A. (an uplifted continental block) to sedimentary rocks from other tectonic environments. *Lithos.* **27**, 115-131.
- Donskaya T.V. (2020) Assembly of the Siberian Craton: Constraints from Paleoproterozoic Granitoids. *Precambrian Res.* **348**, 105869.
- Ghosh S., Sarkar S., Ghosh P. (2012) Petrography and major element geochemistry of the Permo-Triassic sandstones, central India: Implications for provenance in an intracratonic pull-apart basin. *J. Asian Earth Sci.* **43**, 207-240.
- Gogoi B. (2022) Late Paleoproterozoic bimodal magmatic rocks in the Nimchak Granite Pluton of the Bathani volcano-sedimentary sequence, Eastern India: implications for the Columbia supercontinent formation with respect to the Indian landmass. *Periodico di Mineralogia.* **91**, 1-20.
- González-Becuar E., Pérez-Segura E., Vega-Granillo R., Solari L., González-León C.M., Solé J., López Martínez M. (2017) Laramide to Miocene syn-extensional plutonism in the Puerta del Sol area, central Sonora, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas.* **34**(1), 45-61.
- Gutierrez H.E.A. (2012) *Magmatismo permo-triasico en el NW de Sonora, Mexico: Inicio de la subduccion y maduracion de un margen continental active*. Thesis de Maestría. Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autonoma de Mexico, Juriquilla, Queretaro, 242 p.
- Herron M.M. (1988) Geochemical classification of terrigenous sands and shales from core or log data. *J. Sediment. Petrol.* **58**, 820-829.
- Hildebrand R.S., Whalen J.B. (2014) Arc and slab-failure magmatism in Cordilleran batholiths II – The Cretaceous Peninsular Ranges batholith of Southern and Baja California. *Geosci. Canada.* **41**, 399-458.
- Joshi K.B., Bhattacharjee J., Rai G., Halla J., Ahmad T., Kurhila M.I., Heilimo E., Choudhary A.K. (2017) The diversification of granitoids and plate tectonic implications at the Archaean-Proterozoic boundary in the Bundelkhand craton, Central India. *Geol. Soc. London. Spec. Publ.* **449**, 123-157.
- Kanhaiya S., Singh B.P., Singh S. (2018) Mineralogical and Geochemical Behavior of Sediments Solely Derived from Bundelkhand Granitic Complex, Central India: Implications to Provenance and Source Rock Weathering. *Geochem. Int.* **56**(12), 1245-1262.
- Kaur P., Zeh A., Chaudhri N., Eliyas N. (2016) Unravelling the record of Archaean crustal evolution of the Bundelkhand Craton, northern India using U-b zircon-monzonite ages, Lu-Hf isotope systematics, and whole rock geochemistry of granitoids. *Precambrian Res.* **281**, 384-413.
- Lindsey D.A. (2000) Petrology of Arkosic Sandstones, Pennsylvanian Minturn Formation and Pennsylvanian and Permian Sangre de Cristo Formation, Sangre de Cristo Range, Colorado – Data and Preliminary Interpretations. *U.S. Department of the interior. U.S. Geological survey. Open-file report 00-0474.* 45 p.
- Madhavaraju J., Tom M., Lee Y.I., Balaran V., Ramasamy S., Carranza-Edwards A., Ramachandran A. (2016) Provenance and tectonic settings of sands from Puerto Penasco, Desemboque and Bahia Kino beaches, Gulf of California, Sonora, Mexico. *J. South Am. Earth Sci.* **71**, 262-275.
- McLennan S.M., Hemming S.R., McDaniel D.K., Hanson G.N. (1993) Geochemical approaches to sedimentation, provenance and tectonics. *Processes controlling the composition of clastic sediments* (Eds M.J. Johnsson, A. Basu). *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.* **284**, 21-40.
- Mishra S., Singh P.K., Singh V.K., Slabunov A.I., Nainwal H.C., Chaudhary N. (2018) Neoproterozoic Granitoids of Bundelkhand Craton, India: Geochemistry and Geodynamic Settings. *Arch. Anthropol.: Open Acc.* **3**(3). <https://doi.org/10.31031/AAOA.2018.03.000565>
- Papadopoulos A., Lazaridis S., Kipourou-Panagiotou A., Kantiranis N., Koroneos A., Almpanakis K. (2021) Mineralogy, Geochemistry and Provenance of Coastal Sands from Greece: New Insights on the REE Content of Black Coastal Sands from Aggelochori Area, N.-Greece. *Minerals.* **11**, 693. <https://doi.org/10.3390/min11070693>
- Pati J.K. (2020) Evolution of Bundelkhand Craton. *Episodes.* **43**(1), 69-87.
- Pati J.K., Reimold W.U., Greshake A., Schmitt R.T., Koerber C., Pati P., Prakash K. (2015) Pseudotachylitic breccia from the Dhala impact structure, north-central India: Texture, mineralogy and geochemical characterization. *Tectonophysics.* **649**, 18-32.
- Pearce J.A., Harris N.B.W., Tindle A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *J. Petrol.* **25**(4), 956-983.
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. (1972) *Sand and sandstone*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 618 p.
- Ramiz M.M., Ahmad I., Mondal M.E.A., Rahaman W. (2022) Multistage Neoproterozoic magma genesis in the Bundelkhand Craton, India: Evidence from whole-rock elemental and Nd isotopic study of mafic magmatic enclaves and granitoids. *Geosys. Geoenviron.* **1**(4), 100085, <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100085>
- Ramiz M.M., Mondal M.E.A., Ahmad I. (2020) Neoproterozoic A-type granite in the Bundelkhand Craton near Kurraicha: Implications for crustal reworking. *Earth Sci. India.* **13**(3), 78-95.
- Ravindra Kumar G.R., Sreejith C. (2016) Petrology and geochemistry of charnockites (felsic ortho-granulites) from the Kerala Khondalite Belt, Southern India: Evidence for intra-crustal melting, magmatic differentiation and episodic crustal growth. *Lithos.* **262**, 334-354.

- Remya J., Prasanth R.S., Pradeepkumar A.P. (2020) Geochemical Signatures of Gneisses and Granulites of Marthandam, Tamil Nadu, India. *Bull. Pure and Applied Sciences. Geology (Geological Science)*. **39F**(1), 1-14.
- Saha L., Pant N.C., Pati J.K., Upadhaya D., Berndt J., Bhattacharya A., Satyanarayan M. (2011) Neoarchaean high pressure margarite-phengitic muscovite-chlorite corona mantled corundum in quartz-free high-Mg, Al phlogopite-chlorite schists from the Bundelkhand craton, north-central India. *Contrib. Miner. Petrol.* **161**, 511-530.
- Singh V.K., Slabunov A. (2014) The Central Bundelkhand Archaean greenstone complex, Bundelkhand craton, central India: geology, composition, and geochronology of supracrustal rocks. *Int. Geol. Rev.* **57**(11-12), 1349-1364.
- Singh P.K., Verma S.K., Singh V.K., Moreno J.A., Oliveira E.P., Mehta P. (2019) Geochemistry and petrogenesis of sanukitoids and high-K anatectic granites from the Bundelkhand Craton, India: Implications for late-Archean crustal evolution. *J. Asian Earth Sci.* **174**, 263-282.
- Smith D.R., Noblett J., Wobus R.A., Unruh D., Douglass J., Beane R., Davis C., Goldman S., Kay G., Gustavson B., Saltoun B., Stewart J. (1999) Petrology and geochemistry of late-stage intrusions of the A-type, mid-Proterozoic Pikes Peak batholith (Central Colorado, USA): implications for petrogenetic models. *Precambrian Res.* **98**, 271-305.
- Sreejith C., Ravindra Kumar G.R. (2013) Petrogenesis of high-K metagranites in the Kerala Khondalite Belt, southern India: a possible magmatic-arc link between India, Sri Lanka, and Madagascar. *J. Geodynamics.* **63**, 69-82.
- Suttner L.J., Dutta P.K. (1986) Alluvial sandstone composition and paleoclimate, I. Framework mineralogy. *J. Sed. Petrol.* **56**(3), 329-345.
- Valencia-Moreno M., Ruiz J., Barton M.D., Patchett P.J., Zurcher L., Hodkinson D.G., Roldan-Quintana J. (2001) A chemical and isotopic study of the Laramide granitic belt of northwestern Mexico: Identification of the southern edge of the North American Precambrian basement. *Bull. Geol. Soc. Am.* **113** (11), 1409-1422.
- Valencia-Moreno M., Ruiz J., Roldan-Quintana J. (1999) Geochemistry of Laramide Granitic Rocks across the Southern Margin of the Paleozoic North American Continent, Central Sonora, Mexico. *Int. Geol. Rev.* **41**(9), 845-857.
- van de Kamp P.C., Leake B.E. (1985) Petrography and geochemistry of feldspathic and mafic sediments of the north-eastern Pacific margin. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences.* **76**, 411-449.
- van de Kamp P.C., Leake B.E. (1994) Petrology, geochemistry, provenance, and alteration of Pennsylvanian-Permian arkose, Colorado and Utah. *Geol. Soc. Am. Bull.* **105**, 1571-1582.
- Verma S.K., Verma S.P., Oliveira E.P., Singh V.K., Moreno J.A. (2016) LA-SF-ICP-MS zircon U-Pb geochronology of granitic rocks from the central Bundelkhand greenstone complex, Bundelkhand craton, India. *J. Asian Earth Sci.* **118**, 125-137.
- Whalen J.B., Currie K.L., Chappell B.W. (1987) A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contrib. Miner. Petrol.* **95**, 407-419.
- Yadav B.S., Wanjari N., Ahmad T., Chaturved R. (2016) Geochemistry and petrogenesis of Proterozoic granitic rocks from northern margin of the Chotanagpur Gneissic Complex (CGC). *J. Earth Syst. Sci.* **125**(5), 1041-1060.
- Zaidi K., Rais S., Anis, Khan A., Kumar N., Singh M. (2020) Geochemical Study of Chirimiri Sandstones of Talchir Formation, Son-Mahanadi Gondwana Basin, Chhattisgarh, India. *J. Geosci. Res.* **5**(2), 97-106.