

УДК 550.4.01

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ИСТОЧНИКОВ ТЕРРИГЕННЫХ ОСАДОЧНЫХ ПОРОД НА ОСНОВЕ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

© 2023 г. О. В. Граунов¹, В. Н. Подковыров^{1,*}, В. П. Ковач¹, член-корреспондент РАН А. Б. Котов¹,
С. Д. Великославинский¹, Т. М. Сквитина², Е. В. Адамская¹, В. А. Горовой²

Поступило 17.11.2022 г.

После доработки 12.12.2022 г.

Принято к публикации 16.12.2022 г.

На примере метаосадочных пород сакуканской свиты кеменской серии удоканского комплекса Алданского щита рассмотрена возможность идентификации источников терригенных пород на основе геохимических данных с использованием модели линейного программирования. Показано, что источниками метапесчаников сакуканской свиты могли являться тоналит-грондьемитовые гнейсы (56.9%) и лейкократовые гранито-гнейсы (17.3%) олёмминского комплекса, палеопротерозойские гранитоиды куандинского комплекса (7.6%) Чаро-Олёмминского геоблока, а также метавулканиды фёдоровской толщи (15.4%) и развитые в ее пределах гнейсо-граниты (1.8%) Западно-Алданского мегаблока. Полученные результаты хорошо согласуются с имеющимися для метапесчаников сакуканской свиты Nd-изотопными и геохронологическими данными, что свидетельствует о широких возможностях выделения и поиска источников терригенных отложений с использованием модели линейного программирования.

Ключевые слова: терригенные породы, редкоземельные элементы, модель линейного программирования, Алданский щит, удоканский комплекс, сакуканская свита

DOI: 10.31857/S2686739722602629, EDN: NXZJUB

Идентификация источников терригенных пород представляет одну из важнейших задач осадочной геологии. Существуют различные подходы к ее решению, наиболее популярные из которых основаны на результатах геохимических исследований [1–4]. Однако эти подходы далеко не всегда позволяют получить удовлетворительные результаты.

Осадочные породы, как и большинство геологических объектов, образуются из различных источников, которые могут быть охарактеризованы некоторыми геохимическими параметрами. Важен как выбор самих источников, так и параметров, по которым производится сравнение образца породы с модельной смесью. Качество параметров, характеризующих источники, определяется их устойчивостью к наложенным воздействиям. Одним из эффективных подходов при изучении кластогенных отложений и их источников сноса

является использование редкоземельных элементов (РЗЭ), соотношения которых сохраняются в осадочном материале в тех же, как правило, пропорциях как в материнской породе, несмотря на выветривание, перенос, седиментацию и различного уровня метаморфизм [1–4]. Очевидно, что минимальные различия в содержаниях и соотношениях РЗЭ между разрушающимся источником и формирующимся осадочным материалом будут наблюдаться в непосредственной близости от источника в условиях ограниченного влияния процессов выветривания, транспортировки и перетложения детрита (петрогенные осадочные породы первого цикла (first cycle)).

В данной статье сопоставим модельную смесь источников с образцом осадочной породы по содержанию РЗЭ. Будем рассматривать источники и образец как векторы, компоненты которых – содержания РЗЭ. Пусть $S_j = (a_{1j}, a_{2j}, \dots, a_{nj})$ – j -й источник, для которого a_{ij} – весовое содержание i -го элемента из набора n РЗЭ ($i = 1, 2, \dots, n$). Допустим, что для смеси из m выбранных источников заданы их весовые доли x_1, x_2, \dots, x_m . Обозначим эту смесь как вектор M . В этом случае содержание РЗЭ в смеси M будет описываться линейной формой

¹ Институт геологии и геохронологии докембрия
Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

² Институт земной коры Сибирского отделения
Российской академии наук, Иркутск, Россия

*E-mail: vpodk@mail.ru

$$M = x_1S_1 + x_2S_2 + \dots + x_mS_m.$$

Естественным является требование, чтобы содержания РЗЭ в смеси (вектор M) не превосходили содержаний в образце, который обозначим как вектор $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$, т.е.

$$x_1S_1 + x_2S_2 + \dots + x_mS_m \leq B. \quad (1)$$

Такое требование допускает, в частности, возможность существования каких-либо неучтенных источников. Добавим к левой части неравенства (1) неотрицательный вектор $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$, такой, чтобы неравенство преобразовалось в равенство:

$$x_1S_1 + x_2S_2 + \dots + x_mS_m + Y = B. \quad (2)$$

Очевидно, что неотрицательные компоненты вектора Y — это разница (неучтенная доля) в содержаниях РЗЭ между образцом и смесью источников. Именно величина вектора Y определяет качество аппроксимации образца смесью выбранных источников. Охарактеризуем величину вектора Y так называемой октаэдрической нормой: $F = \sum_{i=1}^n |y_i|$. Таким образом, при заданном образце B и источниках S_1, S_2, \dots, S_m желательно выбирать весовые доли x_1, x_2, \dots, x_m источников такими, чтобы значение функции F (целевая функция) было минимально.

Необходимо учесть еще одно обстоятельство. Весовые величины РЗЭ как в образцах-источниках, так и в образцах породы являются относительными величинами, т.е. они относятся к определенной весовой единице образца (скажем, одна тонна). Поэтому необходимо потребовать, чтобы вес смеси, аппроксимирующей образец, не превосходил этой весовой единицы, т.е.

$$x_1 + x_2 + \dots + x_m + W = 1, \quad (3)$$

где $W \geq 0$ — свободная переменная.

Итак, задача определения весовых долей источников для заданного образца может быть окончательно сформулирована следующим образом: найти решение $x_1, x_2, \dots, x_m, y_1, y_2, \dots, y_n$ системы уравнений (2) и (3), удовлетворяющее условиям: $x_i, y_j \geq 0$ ($i = 1, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) и функция F при этом имела бы минимальное значение.

Математическая формулировка нашей задачи представляет собой, таким образом, задачу линейного программирования [5, 6]. Алгоритм решения задачи, симплекс метод [7], программировался на ПК в системе Windows и использовался в наших вычислениях¹.

¹ Векторное уравнение (2), будучи расписанным в координатном виде, представляет систему n линейных уравнений. Такое представление более характерно при формулировке задач линейного программирования. Мы не расписываем его ради экономии места.

Модель линейного программирования для некоторых геологических задач, связанных с изучением смесей, является адекватной, вытекающей из самой сущности задачи. Как дополнительный пример использования этой модели, можно указать на задачу нормативного анализа [6, 8, 9].

Для оценки качества приближения образца смесью предполагаемых источников выводилось значение функции О.Ф. — отношения целевой функции F к сумме компонентов образца, т.е.

О.Ф. = $F / \sum_{i=1}^n b_i \times 100$. Интервал значений этой функции может быть от 0 до 100%. Значения, близкие к нулю, соответствуют более точной аппроксимации состава образца выбранным набором источников (в нашем случае это основано на сравнении модельной смеси и образца по содержанию РЗЭ). Суждение о том, удовлетворительно это значение для образца или нет, возможно, следует основывать на сопоставлении его с относительной точностью определения РЗЭ в образце, если это доступно. В общем же случае функцию О.Ф. можно использовать как меру качества аппроксимации состава образца при сравнении различных наборов источников.

Несколько слов необходимо сказать о величине W , о ее возможной реальной интерпретации. Эта величина дополняет вес оптимальной (в смысле минимума целевой функции F) смеси до единицы. Поэтому ее можно рассматривать как весовую долю некоего неучтенного источника. Важно заметить, что при анализе результата решения необходимо сопоставление обеих величин О.Ф. и W .

В литературе известны попытки представления образца породы смесью выбранных источников на основе сопоставления содержания в них РЗЭ. Как пример, отметим статью Касанзу и др. [10]. Авторы используют не полный набор РЗЭ, а некие параметры, функции, построенные на основе содержаний РЗЭ и их отношений, причем число этих параметров выбирается строго равным числу предполагаемых источников. Вследствие этого, задача нахождения доли предполагаемых источников в смеси сводится к решению системы линейных уравнений с квадратной матрицей. Такой подход представляется неудачным, т.к. он не гарантирует двух основных требований к решению, а именно: неотрицательность величин содержания источников в смеси и не превышение веса смеси весовой единицы, относительной которой определялись содержания РЗЭ (см. выше). Применение такого подхода возможно только в единственном случае, когда для данного образца точно известен набор источников и задача состоит в нахождении их весовых содержаний в образце.

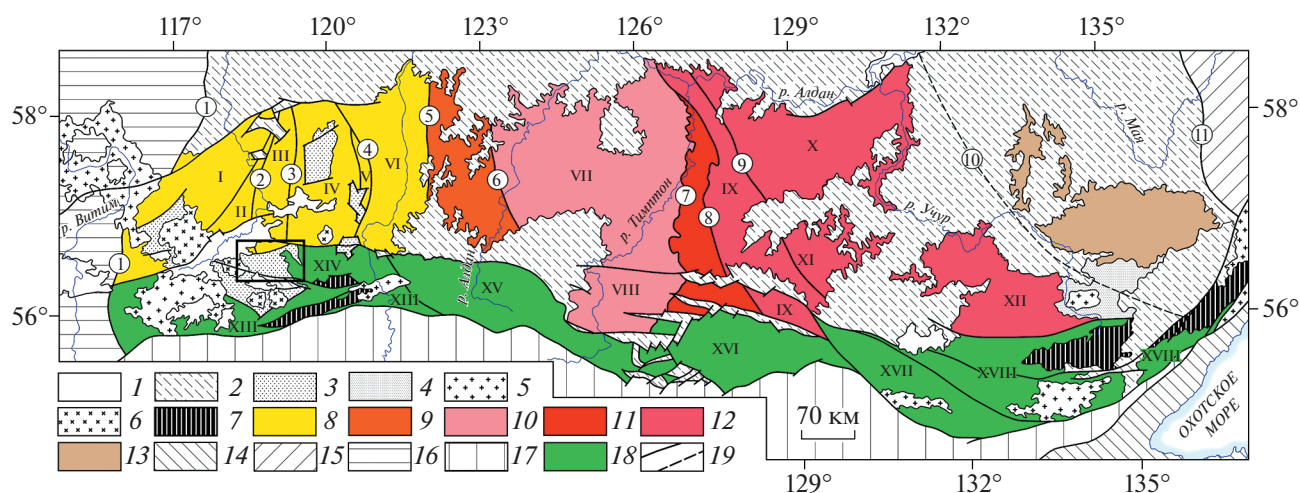


Рис. 1. Схема блокового строения Алданского щита и зоны его сочленения с Джугджуро-Становой складчатой областью. 1 – кайнозойские отложения; 2 – мезозойские, палеозойские и верхнепротерозойские платформенные отложения; 3 – удоканский комплекс; 4 – вулканский комплекс; 5 – фанерозойские гранитоиды; 6 – гранитоиды кодарского комплекса; 7 – анортозиты; 8–13 – Алданский щит: 8 – Чаро-Олёкминский геоблок, 9 – зона сочленения Чаро-Олёкминского и Алданского геоблоков, 10 – Западно-Алданский мегаблок Алданского геоблока, 11 – зона сочленения Западно- и Восточно-Алданского мегаблоков Алданского геоблока, 12 – Восточно-Алданский (Учурский) мегаблок Алданского геоблока; 13 – Батомгский геоблок; 14 – Монголо-Охотская складчатая область; 15 – Верхоянско-Чукотская складчатая область; 16 – Байкальская складчатая область; 17 – Джугджуро-Становая складчатая область; 18 – зона сочленения Алданского щита и Джугджуро-Становой складчатой области; 19 – разрывные нарушения. Цифрами в кружках обозначены зоны разрывных нарушений: 1 – Жуинская, 2 – Чара-Токкинская, 3 – Тарын-Юряхская, 4 – Оломоkitская, 5 – Борсалинско-Нелюкинская, 6 – Алдано-Килиерская, 7 – Тимптонский надвиг, 8 – Иджеко-Сутамская, 9 – Тыркандинская, 10 – Улканская, 11 – Нельканская. Римскими цифрами обозначены блоки: I – Западно-Олёкминский, II – Чарский, III – Токкинский, IV – Чаруодинский, V – Оломоkitский, VI – Восточно-Олёкминский, VII – Нимнырский, VIII – Мелемкенский, IX – Холболохский, X – Суннагинский, XI – Гонамский, XII – Тырканский, XIII – Каларский, XIV – Курульгинский, XV – Зверевский, XVI – Сутамский, XVII – Аюмканский, XVIII – Джугджурский. Прямоугольником показан исследованный район выходов пород сакуканской свиты кеменской серии удоканского комплекса.

При использовании модели линейного программирования в задаче изучения смесей, как в нашем случае, можно задать изначально более широкий набор предполагаемых источников модельной смеси. Оптимизационный принцип, заложенный в этой модели, будет выполнять роль своеобразного фильтра, выбирая наиболее подходящие источники из набора (см. примеры в табл. 3).

Возможность применения изложенного подхода была проверена на примере расчета предполагаемых источников метапесчаников сакуканской свиты кеменской серии удоканского комплекса палеопротерозоя западной части Алданского щита. Этот пример иллюстрирует возможность выбора предполагаемых источников в широком диапазоне составов (от ультрабазитов до гранитоидов) и возрастов от (мезоархейя до палеопротерозоя).

Метатерригенные отложения удоканского комплекса выполняют обширный Кодаро-Удоканский прогиб и целый ряд грабен-синклиналей (Нижнеханинскую, Олдонгсинскую, Угуйскую) Чаро-Олёкминского геоблока Алданского щита (рис. 1, 2). Эти отложения являются гипостратотипом нижнего протерозоя Восточной Сибири и

Дальнего Востока, служат возрастным репером в региональной стратиграфической шкале и вмещают крупнейшее в мире месторождение медистых песчаников [11, 12]. Метаосадочные породы удоканского комплекса Кодаро-Удоканского прогиба подразделяются (снизу–вверх) на кодарскую, чинейскую и кеменскую серии [11]. В составе последней выделяются сакуканская и вышележащая намингинская свиты. Отложения сакуканской свиты представлены главным образом метаморфизованными в зеленосланцевой фации песчаниками. Мощность свиты составляет 1900–4400 м.

По имеющимся петрографическим и петрохимическим данным метапесчаники сакуканской свиты соответствуют петрогенным отложениям, для которых влияние процессов рециклирования осадочного материала выражено несущественно [13]. Средние содержания РЗЭ в изученной выборке метапесчаников сакуканской свиты приведены в табл. 1. Исходя из особенностей геологического строения Чаро-Олёкминского геоблока [14], источниками сноса для метапесчаников сакуканской свиты могли являться неоднократно метаморфизованные преимущественно мезоархейские образования олёкминского тоналит-

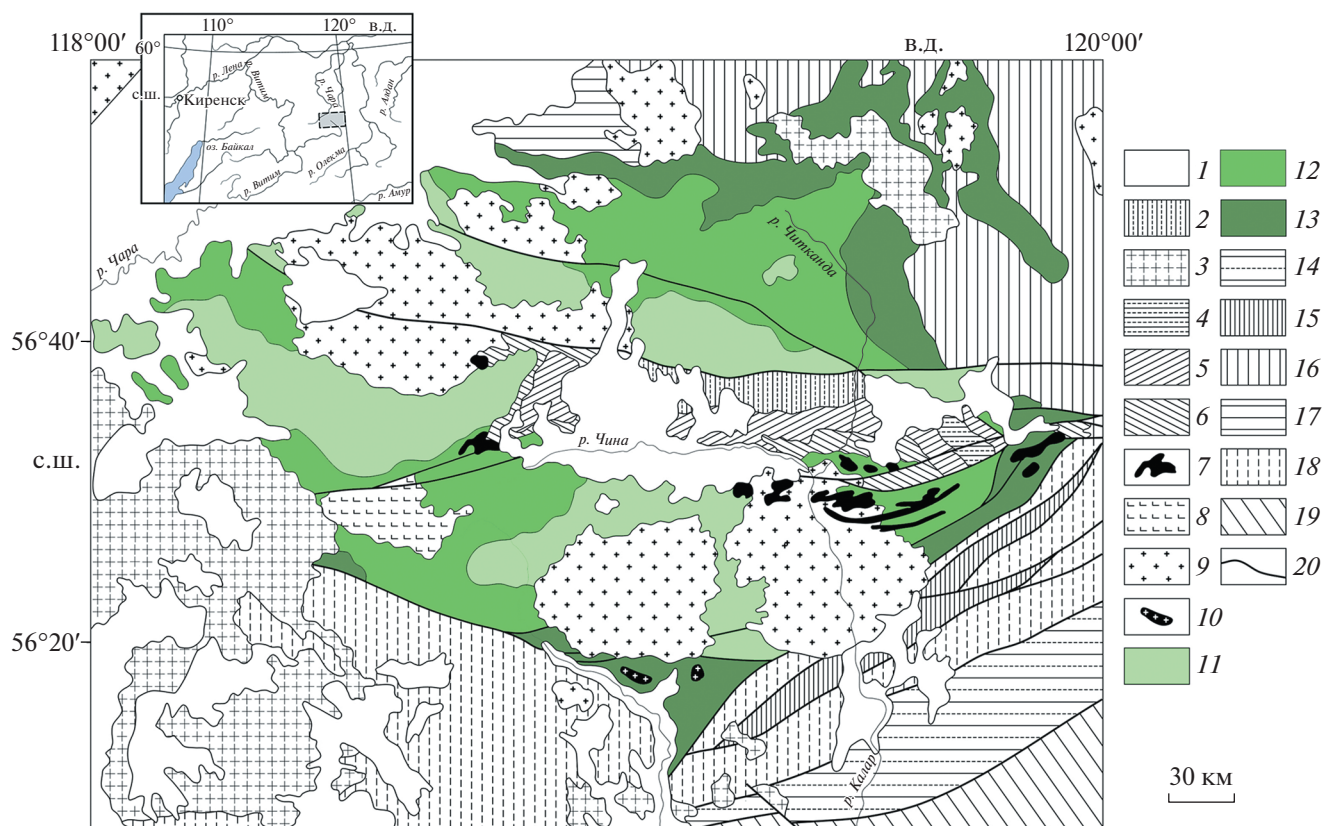


Рис. 2. Схематическая геологическая карта Удоканской подзоны Кодаро-Удоканского прогиба по [18]. 1 – четвертичные отложения и платобазальты; 2 – юрские угленосные терригенные отложения; 3 – позднепалеозойские граниты, гранодиориты, граносиениты и монцитониты ингамакитского комплекса, нефелиновые сиениты, граносиениты и монцитониты ханинского комплекса; 4 – пестроцветные отложения ордовика; 5 – пестроцветные отложения кембрия; 6 – пестроцветные отложения позднего неопротерозоя; 7 – палеопротерозойские габбро-диабазы, габбро и диабазовые порфириды доросского комплекса; 8 – палеопротерозойские расслоенные интрузии чинейского комплекса; 9 – палеопротерозойские граниты кодарского комплекса; 10 – палеопротерозойские редкометальные граниты катугинского комплекса; 11–13 – палеопротерозойские карбонатно-терригенные отложения удоканского комплекса: 11 – кеменская серия, 12 – чинейская серия, 13 – кодарская серия; 14 – неоархейские анортозиты каларского комплекса; 15 – архейские слабо метаморфизованные осадочно-вулканогенные толщи субганского комплекса; 16 – архейские тоналит-трондьемитовые ортогнейсы олёкминского комплекса; 17 – чарская толща (гранат-биотитовые и гранат-гиперстен-биотитовые (\pm силлиманит, \pm кордиерит) плагиогнейсы, основные кристаллические сланцы, кварциты и магнетитовые кварциты); 18 – каларская толща (гранат-биотитовые (\pm силлиманит, \pm гиперстен) плагиогнейсы с прослоями и линзами двупироксеновых кристаллических сланцев, известково-силикатных пород, кварцитов и магнетитовых кварцитов); 19 – метаморфические и магматические комплексы Джугджуро-Станового супертеррейна Центрально-Азиатского складчатого пояса; 20 – разрывные нарушения.

трондьемит-гранодиоритового комплекса [15], Олондинского фрагмента Токко-Ханинского зеленокаменного пояса [16], позднеархейские гранитоиды ханинского комплекса и гранитоиды чаруодаканского и куандинского [17] комплексов. Кроме того, Nd-изотопные данные для метапесчаников сакуканской свиты кеменской серии удоканского комплекса [18], а также U–Th–Pb (LA-ICP-MS)-геохронологические данные для детритового циркона из подстилающих ее метапесчаников чинейской серии [19, 20] свидетельствуют об участии в источниках их сноса неустановленных пород палеопротерозойского (около 2.0 млрд лет) возраста. В связи с отсутствием на современном эрозионном срезе Чаро-Олёкмин-

ского геоблока таких пород, нами в качестве возможных палеопротерозойских источников были взяты средние составы пород фёдоровской толщи и унгринского габбро-диорит-тоналитового комплекса Западно-Алданского мегаблока Алданского щита. Содержания РЗЭ в различных типах пород олёкминского комплекса (амфиболиты и основные кристаллические сланцы, гнейсы тоналит-трондьемитового и гранодиоритового состава, лейкократовые гранито-гнейсы), Олондинского фрагмента Токко-Ханинского зеленокаменного пояса (метапериidotитовые и metabазальтовые коматиты, metabазальты), а также гранитоидах ханинского и куандинского комплексов, породах

Таблица 1. Средние ($n = 15$) содержания РЗЭ (мкг/г) в метапесчаниках сакуканской свиты кеменской серии удоканского комплекса

La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
41.0	85.2	8.67	30.7	5.38	1.06	3.95	0.51	2.75	0.54	1.56	0.23	1.57	0.25

Таблица 2. Содержания РЗЭ (мкг/г) в предполагаемых источниках метапесчаников сакуканской свиты кеменской серии удоканского комплекса

	Olm-1	Olm-2	Olm-3	Olm-4	OI-um	OI-bz	han	kn	un	fd_ks	fd_gn
n	12	24	3	2	4	5	4	3	5	5	9
La	13.46	25.1	32.4	91.3	1.17	3.14	130.5	62.8	29.6	34.4	42.6
Ce	29.2	45.0	64.5	179.4	2.94	7.95	244.5	133.7	53.9	84.4	76.0
Pr	3.63	4.59	7.28	19.47	0.42	1.22	26.2	14.70	5.55	9.24	7.37
Nd	14.49	15.57	27.1	66.2	2.20	6.07	93.1	50.8	19.86	37.0	24.4
Sm	3.02	2.33	4.52	9.60	0.72	1.99	15.43	11.62	2.88	6.88	3.41
Eu	0.92	0.67	1.10	1.95	0.25	0.69	2.97	0.63	0.99	1.75	1.23
Gd	2.97	1.66	3.64	7.07	0.99	2.78	11.97	11.44	2.61	5.22	2.69
Tb	0.43	0.19	0.51	0.92	0.17	0.49	1.87	1.72	0.35	0.68	0.34
Dy	2.41	0.93	2.84	4.69	1.20	3.28	9.46	11.30	1.57	3.32	1.49
Ho	0.49	0.17	0.55	0.83	0.27	0.71	1.78	2.58	0.31	0.63	0.29
Er	1.38	0.45	1.53	2.18	0.79	2.08	4.59	7.32	0.91	1.82	0.81
Tm	0.19	0.06	0.22	0.28	0.11	0.31	0.63	1.17	0.12	0.25	0.12
Yb	1.30	0.40	1.44	1.64	0.72	2.02	4.50	7.45	0.85	1.50	0.79
Lu	0.19	0.06	0.21	0.23	0.10	0.31	0.60	1.12	0.14	0.23	0.11

Примечание. Олёкминский комплекс: Olm-1 – амфиболиты и основные кристаллические сланцы; Olm-2 – тоналит-трондьемитовые гнейсы; Olm-3 – гнейсы гранодиоритового состава; Olm-4 – лейкократовые гранито-гнейсы. Олондинский зеленокаменный пояс: OI-um – метаперидотитовые и metabазальтовые комагититы; OI-bz – metabазальты. Гранитоиды: han – ханинского комплекса; kn – куандинского комплекса. un – габбро-диориты, тоналиты и трондьемиты унгринского комплекса. fd_ks – метавулканы (основные кристаллические сланцы и гиперстен-биотитовые гнейсы) федоровского комплекса Западно-Алданского геоблока. fd_gn – гнейсо-граниты в пределах федоровского комплекса. Средние составы РЗЭ в породах (n) рассчитаны по литературным и неопубликованным данным авторов.

фёдоровской толщи и унгринского комплекса приведены в табл. 2.

Результаты вычислений показали следующее (табл. 3, рис. 3). Среди предполагаемых источников метапесчаников сакуканской свиты существенная роль принадлежит тоналит-трондьемитовым гнейсам (Olm-2, 56.9%) и лейкократовым гранито-гнейсам олёкминского комплекса (Olm-4, 17.3%), в меньшей степени метавулканитам (основным кристаллическим сланцам и гиперстен-биотитовым плагиогнейсам) фёдоровской толщи и развитым в ее пределах гранито-

гнейсам (15.4 и 1.8% соответственно), а также палеопротерозойским гранитоидам куандинского комплекса (kn, 7.6%). Вклад возможных источников Олондинского зеленокаменного пояса (OI-um и OI-bz), амфиболитов и гранодиорито-гнейсов олёкминского комплекса (Olm-1 и Olm-3), габбро-диоритов и тоналитов-трондьемитов унгринского комплекса (u) и гранитов ханинского комплекса (han) в метапесчаниках сакуканской свиты кеменской серии не выражен (табл. 3). Низкие величины О.Ф. (как меры различия смеси источников и данного образца по содержанию РЗЭ) и

Таблица 3. Вклад (%) предполагаемых источников в состав метапесчаников сакуканской свиты кеменской серии удоканского комплекса

O.F. (%)	Olm-1	Olm-2	Olm-3	Olm-4	OI-um	OI-bz	han	kn	un	fd_ks	fd_gn	W
2.75	0	56.92	0	17.33	0	0	0	7.63	0	15.43	1.83	0.85

Примечание. О.Ф. (%) – object function – мера различия смеси источников и данного образца по содержанию РЗЭ. W – весовое различие смеси и образца. Остальные обозначения как в табл. 2.



Рис. 3. Вклад предполагаемых источников (доля в %) в метапесчаниках сакуканской свиты кеменской серии удоканской серии.

W (весового различия смеси и образца) указывают на адекватное представление выбранных модельных источников. Полученные результаты моделирования возможных источников метапесчаников сакуканской свиты кеменской серии удоканского комплекса хорошо согласуются с имеющимися для них Nd-изотопными и геохронологическими данными [18–20], свидетельствующими о размыве ювенильных источников палеопротерозойского возраста.

Приведенный в работе пример расчета содержания РЗЭ в метапесчаниках сакуканской свиты удоканского комплекса как смеси составов предполагаемых источников с использованием модели линейного программирования показывает широкие возможности выделения и поиска возможных источников терригенных отложений. Этот подход может быть использован, в частности, и для анализа вероятных источников обломочного циркона осадочных пород.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования проведены при финансовой поддержке НИР ИГГД РАН FMUW-2022-0003 и гранта РНФ (проект № 21-17-00164; геохимические исследования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Taylor S.R., McLennan S.M.* The Continental Crust: Its composition and evolution. Oxford: Blackwell. 1985. 312 p.
2. *McLennan S.M.* Rare Earth Elements in Sedimentary Rocks. Influence of Provenance and Sedimentary Processes. *Reviews in Mineralogy*. 1989. V. 21. P. 169–200.
3. *Condie K.C.* Chemical Composition and Evolution of the Upper Continental Crust: Contrasting Results from Surface Samples and Shales // *Chemical Geology*. 1993. V. 104. № 1–4. P. 1–37.
4. *Cullers R.L.* The controls 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. № 1–4. P. 107–131.
5. *Канторович Л.В.* Математические методы организации и планирования производства. Издательство: ЛГУ, 1939. 68 с. <https://lib-bkm.ru/12778>
6. *De Caritat P., Bloch J., Hutcheon I.* LPNORM: A linear programming normative analysis code // *Computers & Geosciences*. 1994. V. 20. № 3. P. 313–347.
7. *Josephson H.* Linear programming by the modified simplex method // *BIT* 4. 1964. P. 189–196.
8. *Подковыров В.Н., Граунов О.В., Cullers R.L.* A Linear Programming Approach to Determine the Normative Composition of Sedimentary Rocks // *Math. Geology*. 2003. V. 35. № 4. P. 259–276.
9. *Граунов О.В., Подковыров В.Н.* Нормативный анализ осадочных пород методом линейного программирования: достоинства и недостатки / <https://doi.org/10.31241/MIEN.2018.14.18>
10. *Kasanzu C., Maboko M.A., Many S.* Geochemistry of fine-grained clastic sedimentary rocks of the Neoproterozoic Ikorongo Group, NE Tanzania: Implications for provenance and source rock weathering // *Precamb. Res.* 2008. V. 164. P. 201–213.
11. *Федоровский В.С.* Стратиграфия нижнего протерозоя хребтов Кодар и Удокан. М.: Наука, 1972. 130 с.
12. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1000000, новая серия, лист О-(50) 51 и объяснительная записка. Миронюк Е.П. (ред.) СПб.: ВСЕГЕИ, 1998. 428 с.
13. *Сочава А.В.* Петрохимия верхнего архея и протерозоя запада Витимо-Алданского щита. Л.: Наука. 1986. 142 с.
14. *Котов А.Б.* Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита. Автореф. докт. дисс. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2003. 78 с.
15. *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.* Новые данные о возрасте тоналит-трондьемитовых ортогнейсов олекминского комплекса центральной части Чара-Олекминского геоблока Алданского щита // *ДАН*. 2018. Т. 482. № 5. С. 547–552.
16. *Ковач В.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Попов Н.В., Великославинский С.Д., Плоткина Ю.В., Ван К-Л., Федосеенко А.М.* Верхняя возрастная граница формирования Олондинского фрагмента Токко-Ханинского зеленокаменного пояса Алданского щита: результаты U–Pb (ID-TIMS) геохронологических исследований // *ДАН. Науки о Земле*. 2020. Т. 494. № 2. С. 13–19.
17. *Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ковач В.П., Великославинский С.Д., Скляр Е.В., Гладкочуб Д.П., Ларин А.М., Толмачева Е.В., Федосеенко А.М., Плоткина Ю.В.* Верхняя возрастная граница формирования протолитов метаосадочных пород нижней части разреза удоканской серии (Алданский щит) // *ДАН*. 2018. Т. 479. № 4. С. 412–416.
18. *Подковыров В.Н., Котов А.Б., Ларин А.М., Котова Л.Н., Ковач В.П., Загорная Н.Ю.* Источники и области сноса раннепротерозойских терригенных пород удоканской серии южной части Кодаро-

- удоканского прогиба: результаты Sm–Nd изотопно-геохимических исследований // ДАН. 2006. Т. 408. № 2. С. 223–227.
19. Ковач В.П., Котов А.Б., Гладкочуб Д.П., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д., Гороховский Б.М., Подковыров В.Н., Загорная Н.Ю., Плоткина Ю.В. Возраст и источники метапесчаников чинейской подсерии (Удоканская серия, Алданский щит): результаты U–Th–Pb геохронологического (LA-ICP-MS) и Nd изотопного изучения // ДАН. 2018. Т. 482. № 2. С. 1138–1141.
20. Ковач В.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Гладкочуб Д.П., Скляр Е.В., Толмачева Е.В., Великославинский С.Д., Гороховский Б.М., Подковыров В.Н., Ларин А.М., Загорная Н.Ю., Плоткина Ю.В., Федосеев А.М. Возраст и источники терригенных отложений удоканской серии Удоканской зоны Кодаро-Удоканского прогиба (Алданский щит): результаты геохронологических и Nd изотопных исследований // VII Российская конференция по изотопной геохронологии. М.: ИГЕМ РАН, 2018. С. 142–144.

IDENTIFICATION OF SOURCES OF TERRIGENIC SEDIMENTARY ROCKS BASED ON GEOCHEMICAL DATA USING A LINEAR PROGRAMMING MODEL

**O. V. Graunov^a, V. N. Podkovyrov^{a, #}, V. P. Kovach^a, Corresponding Member of the RAS A. B. Kotov^a,
S. D. Velikoslavinsky^a, T. M. Scovitina^b, E. V. Adamskaya^a, and V. A. Khorovoi^b**

^a *Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences, St.-Petersburg, Russian Federation*

^b *Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation*

[#] *E-mail: vpodk@mail.ru*

The possibility of identifying sources of terrigenous rocks based on geochemical data using a linear programming model is considered on the example of metasedimentary rocks of the Sakukan Formation of the Kemen Group of the Udokan Complex, Aldan Shield. It is shown that tonalite-trondhjemite gneisses (56.9%) and gneiss-granites (17.3%) of the Olekma complex, Paleoproterozoic granitoids of the Kuanda complex (7.6%) of the Chara-Olekma geoblock, metavolcanic rocks of the Fedorov Formation (15.4%) and gneiss-granites developed within it (1.8%) of the West Aldan megablock could be the sources of metasandstones of the Sakukan Formation. The results obtained are in good agreement with the Nd isotopic and geochronological data available for the metasandstones of the Sakukan Formation, which indicates the wide possibilities of identifying and searching for sources of terrigenous deposits using a linear programming model.

Keywords: terrigenous rocks, rare earth elements, linear programming model, Aldan Shield, Udokan complex, Sakukan Formation