GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS
Published by the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

PALEOGEODYNAMICS

2024 VOLUME 15 ISSUE 4 ARTICLE 0769

ISSN 2078-502X

DOI: 10.5800/GT-2024-15-4-0769

VENDIAN-CAMBRIAN SEDIMENTARY PROVENANCE OF THE UPPER KALAR DEPRESSION (ALDAN SHIELD) ACCORDING TO GEOCHEMICAL DATA

S.I. Merenkova [1]✉, I.N. Gromyak [2], D.N. Dogadkin [2], E.V. Karpova [3], R.R. Gabdullin [2,3], V.Yu. Vodovozov [3,4], T.G. Kuzmina [2]

[1] Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences, 36 Nahimovskiy Ave, Moscow 117997, Russia
[2] Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, 19 Kosygin St, Moscow 119991, Russia
[3] Lomonosov Moscow State University, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russia
[4] Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7-1 Pyzhevsky Ln, Moscow 119017, Russia

ABSTRACT. There are presented the results of geochemical studies of the Vendian-Cambrian terrigenous rocks in the Upper Kalar depression– sandstones of the Silimkun formation, exposed in the floodplain of the Kilcheris River (left tributary of the China River), in the upper reaches of the Kemen River. The rocks are enriched in Sc, Cr, Nb, V, Co, Ni, as well as in Mo and heavy rare earth elements. This study demonstrates a rare pairwise correlation between Mo and Cr. A strong positive correlation of P with Nb, Ti and Fe is indicative of P sorption phenomena in alteration products of titanium minerals (e.g. leucoxene). It has been found that the sandstones of the Silimkun Formation were formed as a result of the destruction of granitoids of the Kalar massif – presumably granite porphyries and fine-grained porphyritic biotite granites. The influence of the gabbro-norites of the Chiney complex, enriched in trace elements commonly found in rocks, is less pronounced.

KEYWORDS: Vendian-Cambrian; Udokan; sandstones; geochemistry; sedimentary provenance

FUNDING: The study was carried as part of the state assignment of the IO RAS (theme FMWE-2024-0020). Analytical work was carried out as part of the state assignment of the IGAC RAS. Partial financing was done through providing subsidies for the state assignments of the GIN RAS and MSU.

EDN: LOLTDC

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Sofia I. Merenkova, koshelevasof@mail.ru

Received: March 11, 2024
Revised: June 4, 2024
Accepted: June 14, 2024

FOR CITATION: Merenkova S.I., Gromyak I.N., Dogadkin D.N., Karpova E.V., Gabdullin R.R., Vodovozov V.Yu., Kuzmina T.G., 2024. Vendian-Cambrian Sedimentary Provenance of the Upper Kalar Depression (Aldan Shield) According to Geochemical Data. Geodynamics & Tectonophysics 15 (4), 0769. doi:10.5800/GT-2024-15-4-0769

© Merenkova S. I., Gromyak I. N., Dogadkin D. N., Karpova E. V., Gabdullin R. R., Vodovozov V. Yu., Kuzmina T. G., 2024

ИСТОЧНИКИ СНОСА ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ВЕНД-КЕМБРИЙСКИХ ПОРОД ВЕРХНЕКАЛАРСКОЙ ВПАДИНЫ (АЛДАНСКИЙ ЩИТ) ПО ГЕОХИМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

С.И. Меренкова[1], И.Н. Громяк[2], Д.Н. Догадкин[2], Е.В. Карпова[3], Р.Р. Габдуллин[2,3], В.Ю. Водовозов[3,4], Т.Г. Кузьмина[2]

[1] Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, пр-т Нахимовский, 36, Россия
[2] Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия
[3] Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия
[4] Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Россия

АННОТАЦИЯ. Представлены результаты геохимических исследований венд-кембрийских терригенных пород Верхнекаларской впадины – песчаников силимкунской свиты, обнажающихся в пойме руч. Кильчерис (левый приток р. Чина), в верхнем течении р. Кемен. Породы обогащены Sc, Cr, Nb, V, Co, Ni, а также Mo и тяжелыми РЗЭ. При этом наблюдается нехарактерная парная корреляция Mo и Cr. Сильная положительная корреляция P с Nb, Ti, Fe указывает на явление сорбции P продуктами изменения минералов титана (например, лейкоксеном). Установлено, что песчаники силимкунской свиты формировались в результате разрушения гранитоидов Каларского массива – предположительно, гранит-порфиров и мелкозернистых порфировидных биотитовых гранитов. Менее выражено влияние габбро-норитов Чинейского комплекса, обогащавших породы характерными элементами-примесями.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: венд-кембрий; Удокан; песчаники; геохимия; источники сноса

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено в рамках госзадания ИО РАН FMWE-2024-0020. Аналитические работы выполнены при поддержке госзадания ГЕОХИ РАН. Частичное финансирование за счет субсидий на выполнение госзаданий ГИН РАН и МГУ.

1. ВВЕДЕНИЕ

Осадочные образования Удокана протерозойского – раннепалеозойского возраста продолжительное время привлекали внимание исследователей главным образом своим потенциалом в качестве источников рудных полезных ископаемых (например, метаосадочные породы удоканского комплекса). Состав и положение источников сноса материала, поступавшего в Кодаро-Удоканский прогиб в протерозое, также вызывали интерес в связи с вопросом об источнике меди [Bogdanov et al., 1966; Fedorovsky, 1972; Sochava, 1986; Podkovyrov et al., 2006]. Геохимическая специализация венд-кембрийских осадочных пород, с которыми не связано оруденение, оставалась гораздо менее освещенной в научной литературе. Между тем изучение состава, геохимических особенностей венд-кембрийских образований этого региона, определение питающих провинций и направления сноса позволяют уточнить историю седиментогенеза в обрамлении Сибирской платформы. Наличие опубликованных данных о составе пород постколлизионной чиней-кодарской магматической ассоциации помогает осуществить это наиболее эффективно.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Краткая геологическая характеристика и материалы исследования. Изученные обнажения венд-кембрийских пород силимкунской свиты (V–$Є_1sl$) расположены на западном борту Верхнекаларской наложенной впадины на юго-западе Алданского щита, в междуречье рек Чина (верхнее течение Калара) и Кемен (рис. 1).

Силимкунская (ранее выделялась как пестроцветная $Є_1ps$) свита согласно залегает на бараксанской свите (V*br*), граница с которой проводится по появлению в разрезе красноцветных терригенно-карбонатных пород [State Geological Map…, 2010]. Делится на две пачки – нижнюю красноцветную терригенно-карбонатную, представленную переслаивающимися красноцветными песчаниками, аргиллитами, реже – алевролитами с сероцветными доломитами и известняками, и верхнюю сероцветную, преимущественно карбонатную. В карбонатных породах свиты определены водоросли Renalcis sp., строматолиты нижнего кембрия *Collumnaefacta* cf. *vulgaris* Sid., *C. aff. minuta* Dol., микрофитолиты венда *Vermiculites irregularis* Reitl. и кембрия *Nubeculaarites uniformis* Z. Zhur. [Dolnik, 2000; State Geological Map…, 2010]. Е.С. Вильмовой в алевролитах нижней части свиты были обнаружены *Planolites beverleyensis* Billings и *P. serpens* Webby, подтверждающие вендский возраст [State Geological Map…, 1998]. В сероцветных песчаниках силимкунской свиты установлено медное оруденение, локализованное в зонах брекчирования и дробления пород [Abramov, Chernyshova, 2001, 2012].

Отбор независимо ориентированных образцов проводился из терригенных прослоев по поверхности напластования из нижней красноцветной подсвиты, не затрагивая зоны оруденения. Для геохимических

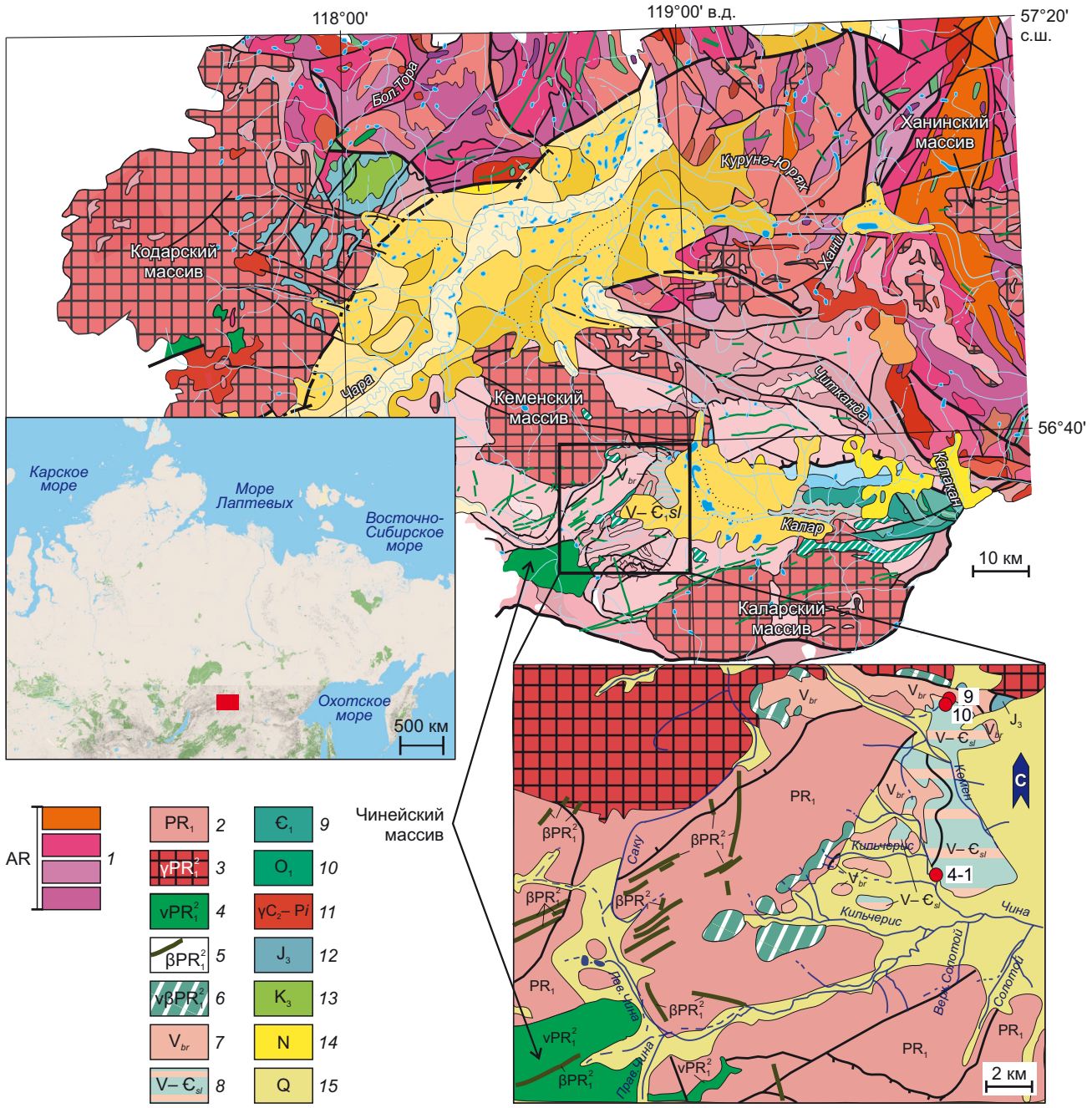

Рис. 1. Положение исследуемых выходов пород силимкунской свиты в региональном плане (по [Geological Map..., 2004; State Geological Map..., 2010] с изменениями).

1 – архейские образования; *2* – метаосадочные породы удоканского комплекса нижнего протерозоя; *3* – гранитоиды кодарского комплекса нижнего протерозоя; *4* – габброиды чинейского комплекса нижнего протерозоя; *5–6* – габбро-долериты доросского комплекса нижнего протерозоя (*5* – дайки долеритов, *6* – силлы габбро-долеритов); *7–8* – терригенно-карбонатные породы верхнекаларской серии (*7* – бараксанская свита венда, *8* – силимкунская свита венда – нижнего кембрия); *9* – карбонатно-терригенные породы нижнего кембрия; *10* – терригенно-карбонатные породы нижнего ордовика; *11* – интрузии позднего палеозоя (ингамакитский комплекс моноцит-сиенит-гранитовый); *12* – верхнеюрские терригенные породы чепинской свиты; *13* – нижнемеловые отложения; *14* – нерасчлененные отложения неогена; *15* – четвертичные отложения.

Fig. 1. The position of the studied rock outcrops of the Silimkun formation in the regional plan according to [Geological Map..., 2004; State Geological Map..., 2010], as amended.

1 – Archean formations; *2* – metasedimentary rocks of the Lower Proterozoic Udokan complex; *3* – granitoids of the Lower Proterozoic Kodar complex; *4* – gabbroids of the Lower Proterozoic Chiney complex; *5–6* – gabbrodolerites of the Lower Proterozoic Doross complex (*5* – dolerite dikes, *6* – gabbrodolerite sills); *7–8* – terrigenous-carbonate rocks of the Upper Kalar group (*7* – Baraksan formation (Vendian)), *8* – Silimkun formation (Vendian – Lower Cambrian)); *9* – Lower Cambrian carbonate-terrigenous rocks; *10* – Lower Ordovician terrigenous-carbonate rocks; *11* – Late Paleozoic intrusions (Ingamakit monocyte-syenite granite complex); *12* – Upper Jurassic terrigenous rocks of the Chepe formation; *13* – Lower Cretaceous deposits; *14* – undissected Neogene deposits; *15* – Quaternary deposits.

исследований использовано 30 образцов. Точка 4-1 расположена в пойме руч. Кильчерис (левый приток р. Чина), точки 9 и 10 расположены в 9 км к СВ в верхнем течении р. Кемен. Породы силимкунской свиты смяты в складки с углами падения на крыльях 50–80°; складки, вероятно, являются результатом подводных оползаний. На поверхностях напластования встречается волновая рябь и глиптоморфозы по галиту, которые помогают определить нормальное залегание отложений.

Методы. Для определения содержания элементов в исследуемых образцах методом МС-ИСП применяли спектрометр X Series II (Thermo Scientific, Германия), снабженный концентрическим распылителем и кварцевой циклонной распылительной камерой, охлаждаемой элементом Пельтье (2 °C). Градуировочные зависимости элементов получали, используя стандартный раствор 68 Element Standards ICP–MS–68A (Solution A и Solution B). Концентрации элементов в анализируемых растворах находили с использованием программного обеспечения спектрометра PlasmaLab. Для определения содержания элементов использовали программу iPlasmaProQuad, разработанную в лаборатории методов исследования и анализа веществ и материалов ГЕОХИ РАН [Kolotov et al., 2023]. Дополнительную обработку результатов проводили средствами программ MS Access и Excel.

Для определения содержания элементов в исследуемых образцах методом атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) использовали плазменный спектрометр ICAP–6500 Duo (Thermo Scientific, Великобритания). Концентрации элементов в анализируемых растворах определяли с использованием программного аналитического обеспечения iTEVA. Для построения градуировочных графиков использовали многоэлементные стандартные растворы Merck ICP-multi-element standard solution (Германия): Al, Ba, Ca, Cd Co, Cr, Cu, K, Li, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr, Zn (CO IV), Mo, V, Ti (CO XVI), Zr (CO XVII) и High-Purity standards (США): P и S. Растворы сравнения 0.1–10.0 мг/л готовили методом последовательного разбавления. МС-ИСП и АЭС-ИСП исследования выполнены в ГЕОХИ РАН.

Содержания главных петрогенных оксидов (Al_2O_3, TiO_2, FeO, MnO, K_2O, CaO, MgO, Na_2O, P_2O_5) получены при пересчете данных АЭС-ИСП. Количество SiO_2 определено рентгенофлуоресцентным анализом (выполнено в ГЕОХИ РАН) с использованием рентгенофлуоресцентного волнодисперсионного спектрометра Axios Advanced (PANalytical B.V., Holland).

Для анализа и визуализации статистических данных построена матрица корреляции (коэффициенты корреляции Пирсона) и «тепловая карта» с кластеризацией методом полной связи (complete-linkage clustering). В основе «тепловой карты» – метод обнаружения выбросов (ODT) [Misra et al., 2020]. Цветом показана величина Z-оценки для каждого образца по тому или иному элементу. Z-оценка (z-score, также называемая стандартной оценкой) дает представление о том, насколько далека от среднего значения величина в точке массива данных. Для расчета z-оценки, помимо непосредственно значения для каждого отдельного образца, используется среднее значение совокупности (μ) и стандартное отклонение совокупности (σ). Знак z-оценки показывает, в какую половину распределения попадает показатель: положительный знак (или отсутствие знака) указывает на то, что показатель выше среднего и находится в правой части распределения, отрицательный знак – на то, что оценка ниже среднего значения и находится в левой части распределения. Величина числа в единицах стандартных отклонений показывает, насколько далеко оценка находится от центра или среднего значения. Чем светлее, ненасыщеннее оттенок цвета по шкале и ближе к нулю значение z-оценки, тем ближе значение к среднему по выборке.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика исследуемых образцов. Исследуемые породы силимкунской свиты – песчаники мелкотонкозернистые с примесью среднепесчаного материала и единичными зернами крупнопесчаной размерности. Состав мезомиктовый: кварц (70–75 %), полевые шпаты (20–27 %, представлены КПШ и плагиоклазами). Литокласты (до 5 %) полигенетичны. В их составе выделяются кластыы вулканитов и метаморфитов. Магматические породы представлены измененными обломками гранитоидов, а также кислых эффузивов с афировой структурой, в составе которых прослеживается кварц, тонкие кварцево-полевошпатовые сростки и рудные минералы. Основная масса имеет микрофельзитовую структуру. Осадочные породы присутствуют в образцах 4-1-10, 9-7, 10-6, 10-9 и представлены крупнозернистыми обломками железистых аргиллитов, а в 10-9 – также внутриформационных глинистых известняков (известковых аргиллитов). Среди обломков метаморфических пород наблюдаются полуокатанные кварциты с микрогранобластовой структурой. Слюды (единичные) – биотиты, реже присутствуют мусковиты. Тяжелые акцессории – единичные измененные (серпентинизированные) пироксены, единичные сфены, цирконы. В отдельных образцах присутствует ставролит. Преобладает поровый тонкокристаллический доломитовый цемент (от 7 до 20 %); также фиксируется пленочный иллит-гематитовый цемент (до 7 %) и регенерационный кварцевый и полевошпатовый цемент (1–3 %).

В соответствии с результатами изучения в шлифах и положением точек составов на классификационной диаграмме $\log(Fe_2O_3/K_2O) - \log(SiO_2/Al_2O_3)$ [Herron, 1988] песчаники силимкунской свиты относятся к аркозам, субаркозам и литаренитам (рис. 2).

Элементный состав. Содержание главных петрогенных оксидов приведено в Прил. 1, табл. 1.1, микроэлементный состав – в Прил. 1, табл. 1.2.

Составы песчаников силимкунской свиты нормированы на средний протерозойский кратонный песчаник

(APCS) [Condie, 1993], спектры представлены на рис. 3. Относительно стандарта породы обогащены Sc, Cr (для образцов обнажения также 4-1 – Nb, V, Co, Ni) и РЗЭ (кроме легких La, Ce, Nd). Содержания других элементов, представленных на спайдерграммах, близки к таковым в протерозойском кратонном песчанике. Если принять за стандарт концентрации по Н.А. Григорьеву [Grigoriev, 2009] для песков и песчаников, то обогащение будет наблюдаться по Sc, Cr, Mo, Nb, отдельным РЗЭ (Sm, Eu, Gd). По обоим стандартам выражена отрицательная аномалия Pb. Обогащения пород Cu не наблюдается. Отношение легких к тяжелым РЗЭ ($\sum РЗЭ_{Ce}/\sum РЗЭ_{Y}$)

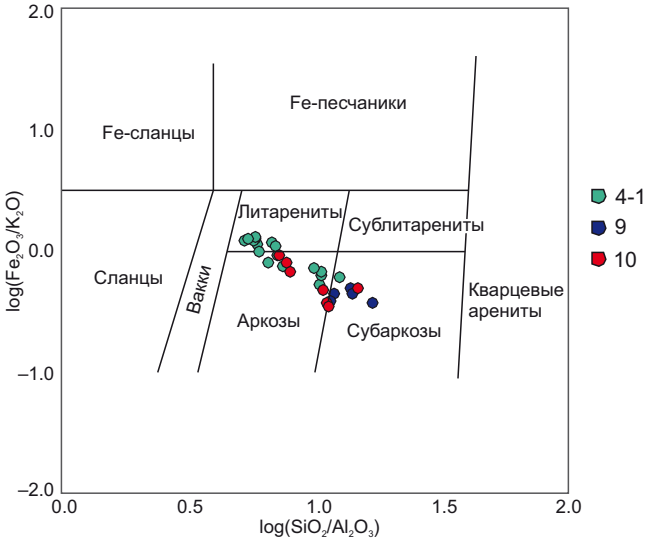

Рис. 2. Области состава пород силимкунской свиты на классификационной диаграмме М. Хиррона [Herron, 1988]. 4-1 – обнажение в пойме ручья Кильчерис, 9 и 10 – обнажения в верхнем течении р. Кемен.

Fig. 2. Compositional areas of rocks of the Silimkun formation on the classification diagram proposed by M. Herron [Herron, 1988]. 4-1 – outcrop in the floodplain of the Kilcheris River, 9 and 10 – outcrops in the upper reaches of the Kemen River.

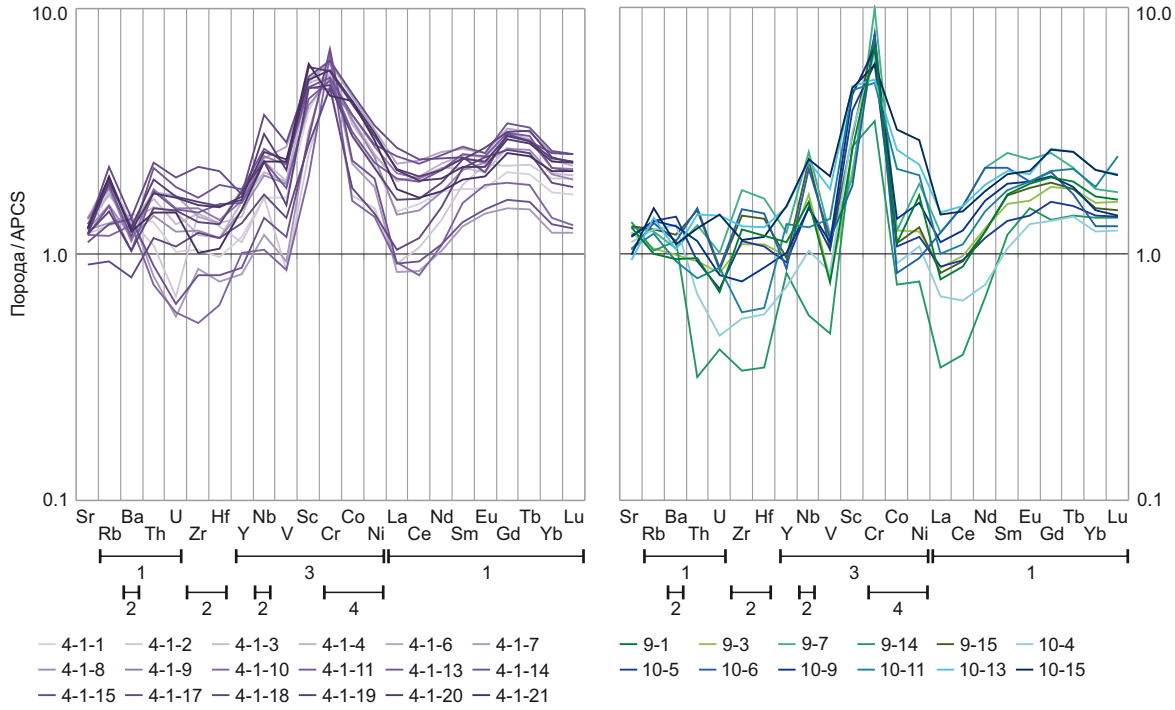

Рис. 3. Нормированные на стандарт APCS [Condie, 1993] содержания элементов в породах силимкунской свиты. Элементы, характерные для магматических образований [Yudovich, Ketris, 2011]: 1 – кислый петрофонд, 2 – щелочной петрофонд, 3 – основной петрофонд, 4 – ультраосновной петрофонд.

Fig. 3. APCS-normalized contents [Condie, 1993] of elements in the rocks of the Silimkun formation. Common elements found in igneous rocks [Yudovich, Ketris, 2011]: 1 – felsic, 2 – alkaline, 3 – mafic, 4 – ultramafic.

находится в пределах 3–9, в среднем 6. Значение европиевой аномалии (Eu/Eu*) для пород силимкунской свиты составляет 0.53–0.81, среднее 0.64.

Корреляция и кластеризация элементов. Для группировки элементов и выявления связей между ними построена матрица корреляции (рис. 4) и «тепловая карта» с кластеризацией методом полной связи (рис. 5).

На «тепловой карте» четко визуально идентифицируется наличие аномалий среди выборки (на основе z-оценки). Так, например, бордовый цвет квадратов S и Cd для образца 4-1-17, Cu в 4-1-8 связан с наибольшим содержанием этих элементов в указанных образцах среди всех анализируемых. Аналогично содержание Ca, Mg, Mn в образце 10-6 является наименьшим в массиве. На основе величины коэффициента корреляции и кластеризации рассматриваемые элементы в породах группируются следующим образом.

Группа 1. Наиболее многочисленная. В нее входят:

1) из главных элементов: Al, K, P;

2) крупноионные литофильные элементы (LIL): K, Rb, Cs, Sr, Pb;

3) высокозарядные элементы (HFS): Zr, Nb, Hf, Ta, Th, U, РЗЭ, включая Y;

4) переходные металлы: Sc, Ti, V, Fe, Co, Ni;

5) Ga, Tl, Bi.

Коэффициент корреляции между элементами внутри группы (кроме K и Pb) 0.76–0.96. Коэффициент больше 0.9 связывает Al с Li, Be, V, Fe, Co, Ni, Ga, Rb, Cs. Характерна высокая корреляция P с Nb (0.91), Ti (0.9), Fe (0.88) Al (0.87). Обогащающий, как показано выше, породы силимкунской свиты Sc коррелирует с коэффициентом более 0.8 с Al (0.89), Ga (0.89), Be, Cs (0.85), Fe, Li, V, Co (0.84), Ni (0.83). Калий обособлен в отдельный подкластер и не проявляет статистически значимой корреляции (>0.7) с другими элементами в целом (в том числе за пределами группы). То же отмечено для Pb. Наибольшее значение коэффициента корреляции 0.61 для K обнаружено по отношению к Nb, для Pb – 0.51 с Li.

Группа 2. Sr и Ba (LIL), переходные металлы Cu и Zn, а также B, Sr, Ba, Cu не имеют корреляционной связи с коэффициентом более 0.45. Sr в незначительной степени коррелирует с другими LIL – Ba (0.41) и Rb (0.44), Ba с B (0.44) и Rb (0.45), для Cu коэффициенты не превышают 0.35. Zn с коэффициентом более 0.5 коррелирует с Co (0.52), Be, Li (0.54), Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu (0.55–0.57), Yb (0.61).

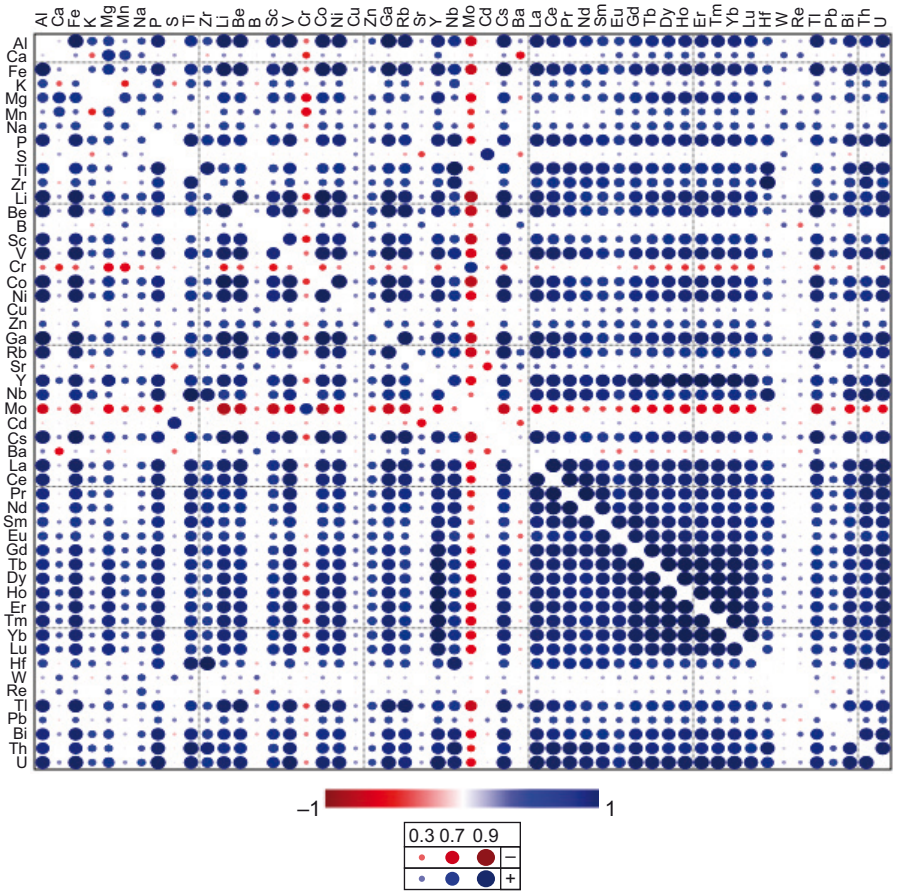

Рис. 4. Матрица корреляции для массива данных по элементному составу пород силимкунской свиты. Величина коэффициента показана цветом, его насыщенностью и размером символа.

Fig. 4. Correlation matrix for the array data on the elemental composition of rocks of the Silimkun formation. The coefficient value is highlighted by color, color saturation and symbol size.

Группа 3. В эту группу входят Na, Mg, Ca (главные элементы), Mn (переходный металл), Cd, S, Re, W. Халькофильные элементы Cd и S обособляются в отдельный подкластер и коррелируют между собой с коэффициентом 0.81. Но в большей части изученных образцов (25 из 30) содержания Cd находятся ниже предела обнаружения (0.05 г/т). Для «тепловой карты» содержания Cd в этих образцах брались равными половине предела обнаружения, поэтому в строке Cd на равномерном бледно-голубом фоне четко выделяются пять образцов розово-красных оттенков. По той же причине наблюдается схожая картина в ряду Re.

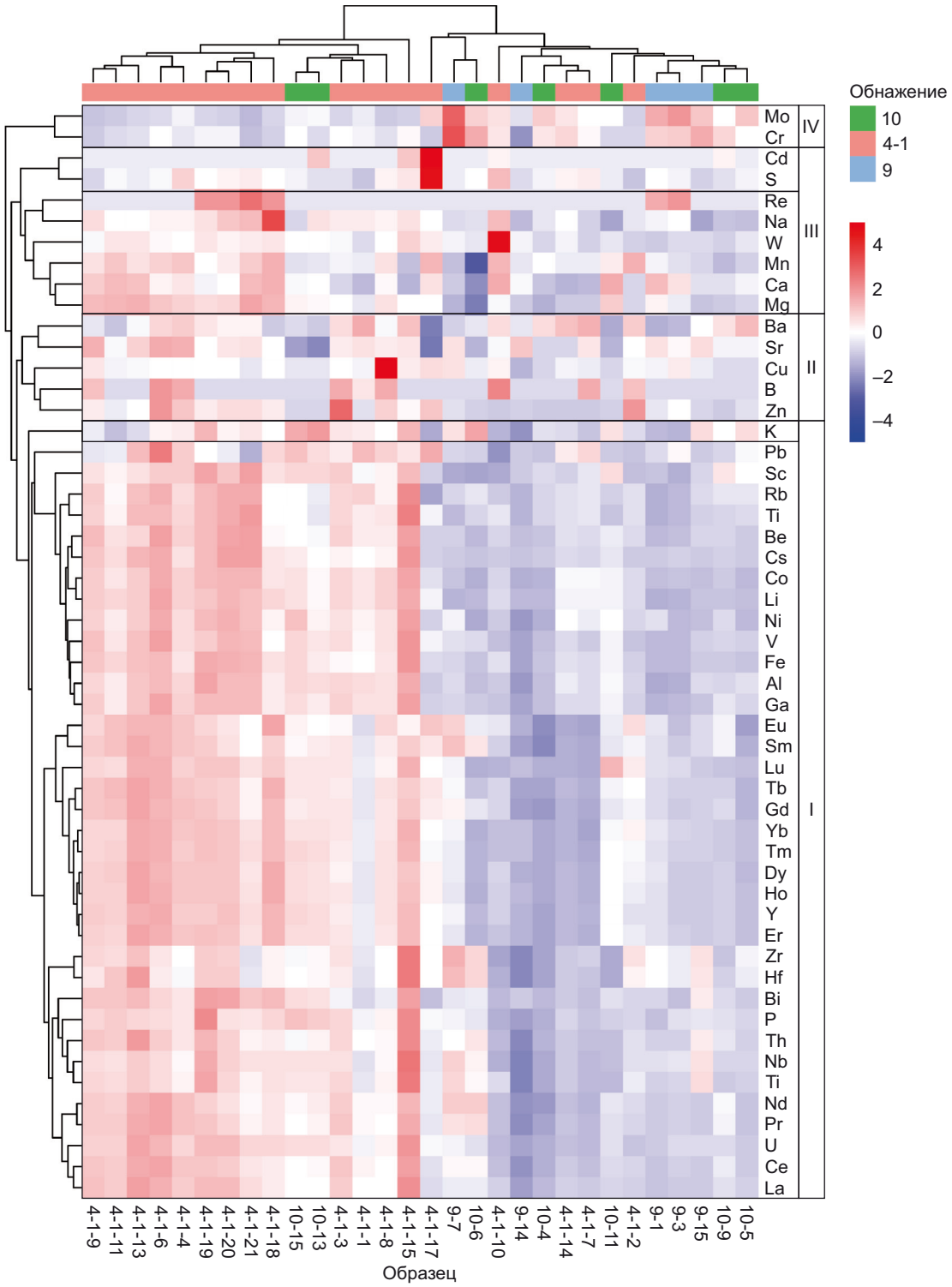

Рис. 5. «Тепловая карта» с кластеризацией химических элементов в выборке и образцов из трех обнажений силимкунской свиты. Цветовая шкала – z-оценка.

Fig. 5. "Heat map" showing element cluster sampling and samples from three outcrops of the Silimkun formation. Color scale – z-score.

Ca и Mg также связаны сильной положительной корреляцией – 0.78, другой статистически значимой корреляции для Ca не выявлено. Напротив, Mg коррелирует с коэффициентом >0.7 с элементами группы 1: Fe (0.74), Li (0.76), Be (0.71), U (0.71), Sc (0.72), Ni (0.72), Co (0.75), Cs (0.75), Y (0.84), тяжелыми РЗЭ (0.73–0.85).

Группа 4. Включает два элемента – Mo и Cr, которые коррелируют с коэффициентом 0.77 и не демонстрируют никакой связи с элементами других групп, поэтому этот кластер иерархически обособлен в более высокий уровень, в то время как первые три группы на этом уровне объединяются.

4. ОБСУЖДЕНИЕ

На диаграмме Th/Sc – Zr/Sc (рис. 6) точки составов изучаемых пород расположены за пределами области многократного переотложения осадков, что позволяет считать полученные геохимические данные непосредственно отражающими существовавшие в прошлом условия седиментации, а также отнести песчаники силимкунской свиты к породам типа «first cycle».

Связи между элементами и формы нахождения. В первую очередь обращает на себя внимание обособленный кластер Mo–Cr. Количество Mo в песчаниках силимкунской свиты составляет 1.2–6.2 г/т. Для пород верхней части континентальной коры, как правило, характерно содержание Mo около 1.5–1.6 г/т (в парагнейсах и сланцах – 1.9 г/т, метаандезитах – 2.2 г/т) [Grigoriev, 2009]. В осадочных породах концентрации Mo более 2 г/т указывают на бескислородные условия в водной толще в период образования осадков [Scott, Lyons, 2012]. Из магматических наиболее богаты Mo кислые породы (1.8 г/т). Cr же, напротив, наиболее характерен для базитов. Содержание Cr в базитах в среднем составляет 175 г/т, метабазитах – 270 г/т, ультрабазитах – 1800 г/т [Grigoriev, 2009]. Концентрация Cr в породах силимкунской свиты находится в пределах 83.8–239.7 г/т при кларковых для песчаников 24 г/т [Condie, 1993] и 58 г/т [Grigoriev, 2009]. Cr накапливается в осадках преимущественно терригенным путем. Этот элемент входит в хромит, шпинель, может обогащать пироксен, амфибол, слюды, магнетит, ильменит. В процессе выветривания поведение Cr^{3+} схоже с поведением Fe^{3+} и Al^{3+}, в водной среде катионы Cr^{3+} демонстрируют pH-зависимую адсорбцию на поверхности частиц глинистых минералов [Corker et al., 1991; Charlet, Manceau, 1992] и оксигидроксидов Al и Fe [Richard, Bourg, 1991; Fendorf, 1995]. В гранитоидах кодарского комплекса в качестве акцессорных минералов присутствуют потенциальные носители хрома – магнетит, ильменит, рутил, а также непосредственно молибденит [Larin et al., 2021]. Cr не демонстрирует связи ни с другими элементами основных пород (см. рис. 4, 5), ни с другими элементами, которые могут быть объединены общей минеральной фазой. При обогащении пород силимкунской свиты Sc, также характерным для основных пород, коэффициент корреляции с Cr составляет 0.49. Не наблюдается корреляции с Al, Fe, Ti. Можно предположить, что высокие содержания Mo и Cr в парной корреляции свидетельствуют о влиянии на накопление этих элементов бескислородных обстановок в водной толще, но, тем не менее, причина такой связи остается неясной.

В группе 3 Ca и Mg связаны нахождением в доломите, чем обусловлена их высокая степень корреляции. При этом корреляция Mg и Fe (группа 1) говорит о

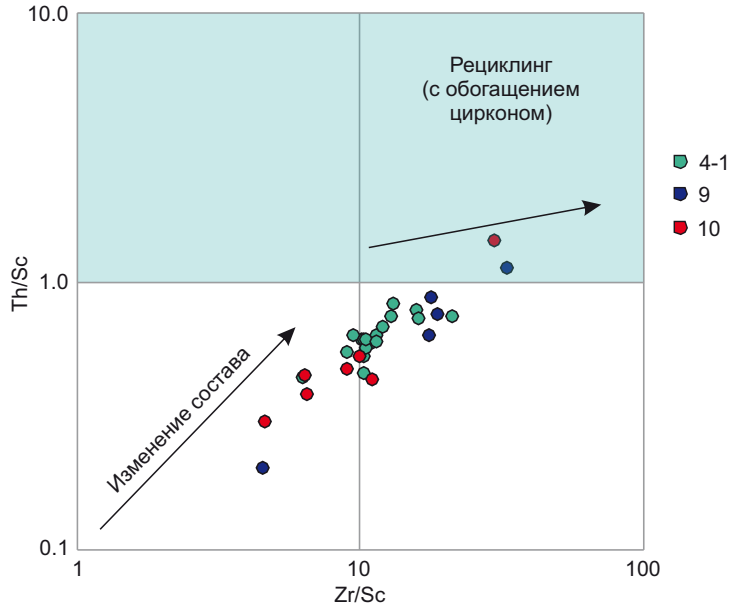

Рис. 6. Положение составов пород силимкунской свиты на диаграмме Th/Sc – Zr/Sc [McLennan et al., 1990]. 4-1 – обнажение в пойме руч. Кильчерис, 9 и 10 – обнажения в верхнем течении р. Кемен.

Fig. 6. Composition of rocks of the Silimkun formation on the Th/Sc – Zr/Sc diagram [McLennan et al., 1990]. 4-1 – outcrop in the floodplain of the Kilcheris River, 9 and 10 – outcrops in the upper reaches of the Kemen River.

наличии в породах смектита или хлорита. Элементы, геохимически связанные с глинистыми минералами (K, Fe, Ga, Cs, Th), входящие в слюды (Li, K, Ti, V, Rb, Cs, Y, Ce), калиевые полевые шпаты (Li, K, Fe, Rb, Cs), коррелируют с содержанием Al и объединяются в группе 1. Также в эту группу входят элементы, связанные с тяжелыми минералами, например кластофильные Ti, V, Zr. Как отмечалось выше, породы силимкунской свиты обогащены Nb. Это, вероятно, связано с тем, что кристаллохимическое сродство Nb с Ti ведет к его накоплению в сфене, ильменорутиле, биотите.

Далее следует рассмотреть причины сильной корреляции (0.9) P с Nb, Ti, Fe. Положительная корреляция фосфора и титана, а также фосфора и железа ранее обнаруживалась исследователями [Yudovich et al., 2020, 2021]. Этим фактам предложено следующее объяснение. Корреляция P с Fe является признаком доминирования его сорбированной железогидроксидной формы (железоокисный барьер), а положительная корреляция с Ti указывает на преобладание фосфата, сорбированного на лейкоксене (титановый барьер) [Yudovich et al., 2021]. Лейкоксен – это конечный продукт изменения минералов титана (в основном ильменита) и является распространенной формой существования Ti в гипергенезе. Лейкоксен, как правило, содержит примеси гидроксида железа, поэтому при сорбции могут действовать оба барьера – и титановый, и железоокисный [Ponariadov, Kotova, 2020]. Гипотеза сорбции P на лейкоксене в низкотемпературных условиях гипергенеза подтверждена экспериментально [Ponariadov, Kotova, 2020]. В исследуемых образцах силимкунской свиты P не демонстрирует связи с Ca (ожидаемое нахождение в апатите) или Mg (сорбция глинистым веществом). Таким образом, наблюдается вышеописанное явление сорбции P продуктами изменения минералов титана в породах силимкунской свиты.

Источники сноса по геохимическим данным. В работе [Maslov, Podkovyrov, 2023] рассмотрен вопрос сохранения в петрогенных осадочных образованиях геохимических характеристик гранитоидов-источников. Установлено, 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 [Maslov, Podkovyrov, 2023]. В связи с этим можно предпринять попытку выявления источника для формирования пород силимкунской свиты по геохимическим данным.

Диаграммы, включающие CaO и MgO (например, широко используемая факторная F3-F4 по [Roser, Korsch, 1986]), не применимы для пород силимкунской свиты из-за доломитового цемента (достигающего 20 %). На основе рассмотренного выше в соответствующих разделах можно связать обогащение песчаников силимкунской свиты Sc, Cr, Nb, V, Co, Ni с влиянием основных пород юга Кодаро-Удоканского района, в то время как обогащение Mo и РЗЭ является следствием размыва гранитоидов кодарского комплекса.

В качестве непосредственно источников для формирования пород силимкунской свиты стоит рассматривать гранитные массивы кодарского комплекса (Каларский, Кеменский) и габброиды чинейского комплекса нижнего протерозоя, обрамляющие Верхнекаларскую впадину. Так как изучаемые песчаники являются петрогенными («first cycle»), влияние метаосадочных пород удоканского комплекса можно считать незначительным.

Диаграмма Hf – La/Th [Floyd, Leveridge, 1987] позволяет разграничить поля составов осадочных образований, сформированных за счет разрушения пород океанических островов, сложенных толеитовыми базальтами, андезитами либо кислыми вулканитами, а также показывает области смешения кластики из этих типов (рис. 7, а). На данной диаграмме составы пород силимкунской свиты попадают в поле фельзитовых источников. Также на диаграмму нанесены составы пород Кодарского, Кеменского, Каларского, Ханинского массивов [Larin et al., 2021] и габбро-норитов чинейского комплекса [Gongalskiy, 2010]. Наиболее близко к облаку точек силимкунской свиты расположены усредненные составы мелкозернистых порфировидных биотитовых гранитов (МПБГ), гранит-порфиров (ГП), мусковит-альбитовых гранитов (МАГ) Каларского массива, МПБГ Ханинского массива и норитов чинейского комплекса. На диаграмме La/Sc – Th/Co [Cullers, 2002] (рис. 7, б) составы песчаников силимкунской свиты лежат в поле продуктов эрозии кислых магматических пород. На диаграмме в координатах Ti/Zr – La/Sc [Bhatia, Crook, 1986] точки изучаемых пород находятся в поле осадков континентальных дуг и лишь частично активных континентальных окраин (рис. 7, в).

Для выяснения преобладающего источника материала при формировании силимкунской свиты составы пород нормированы на примитивную мантию [Sun, McDonough, 1989] и хондрит [Taylor, McLennan, 1985], а затем полученные спайдерграммы и графики распределения РЗЭ (рис. 8, 9) сопоставлены с опубликованными данными по Кодарскому, Кеменскому, Каларскому, Ханинскому гранитным массивам [Larin et al., 2021], габбро-норитам чинейского комплекса [Gongalskiy, 2010]. Для каждого типа гранитоидов отдельного массива были рассчитаны средние значения по приведенным образцам. Несмотря на то, что Кодарский и Ханинский массивы находятся на значительном удалении от области развития силимкунской свиты, их составы рассмотрены для полноты картины.

Спектры составов чинейского комплекса и силимкунской свиты (см. рис. 8) по выбранным элементам существенно различны, что, однако, не исключает вклада основных пород, как было показано выше. Из проанализированных спектров гранитоидов (рис. 9) наиболее близки по характеру распределения элементов МПБГ и ГП Каларского массива. В частности, выраженная на графиках «ступень» на участке K-La-Ce

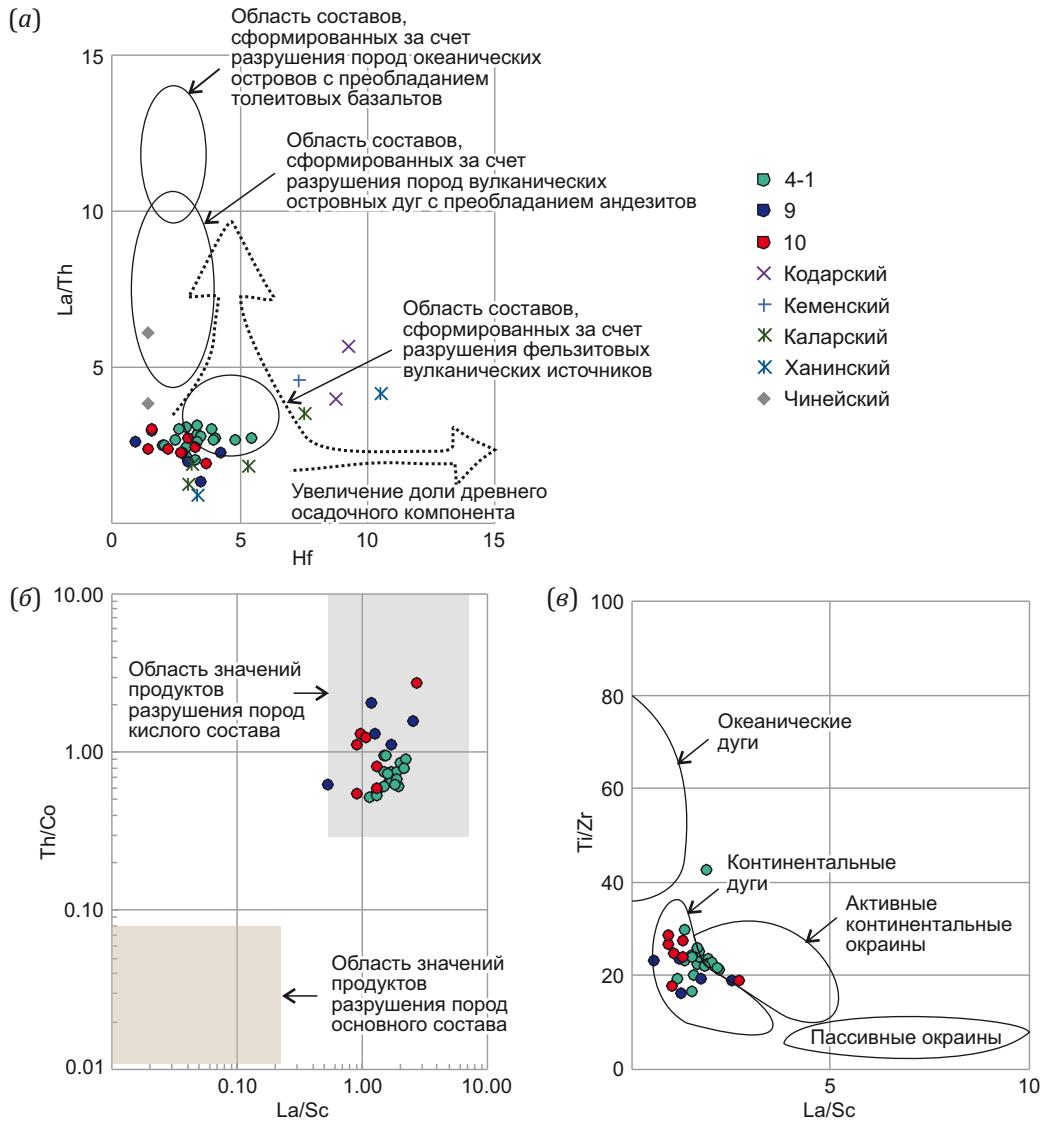

Рис. 7. Положение фигуративных точек на диаграммах: (*а*) – Hf – La/Th [Floyd, Leveridge, 1987], (*б*) – La/Sc – Th/Co [Cullers, 2002], (*в*) – Ti/Zr – La/Sc [Bhatia, Crook, 1986].

Fig. 7. Position of the figurative points on the diagrams: (*а*) – Hf – La/Th [Floyd, Leveridge, 1987], (*б*) – La/Sc – Th/Co [Cullers, 2002], (*в*)– Ti/Zr – La/ Sc [Bhatia, Crook, 1986].

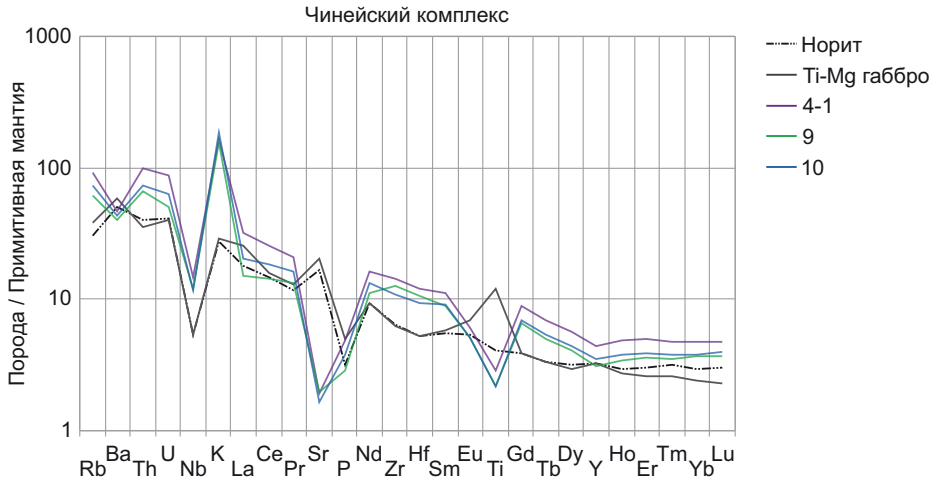

Рис. 8. Спайдерграммы для габброидов чинейского комплекса (по данным [Gongalskiy, 2010]) и силимкунской свиты (4-1, 9, 10).
Fig. 8. Spidergrams for gabbroids of the Chiney complex (after [Gongalsky, 2010]) and the Silimkun formation (4-1, 9, 10).

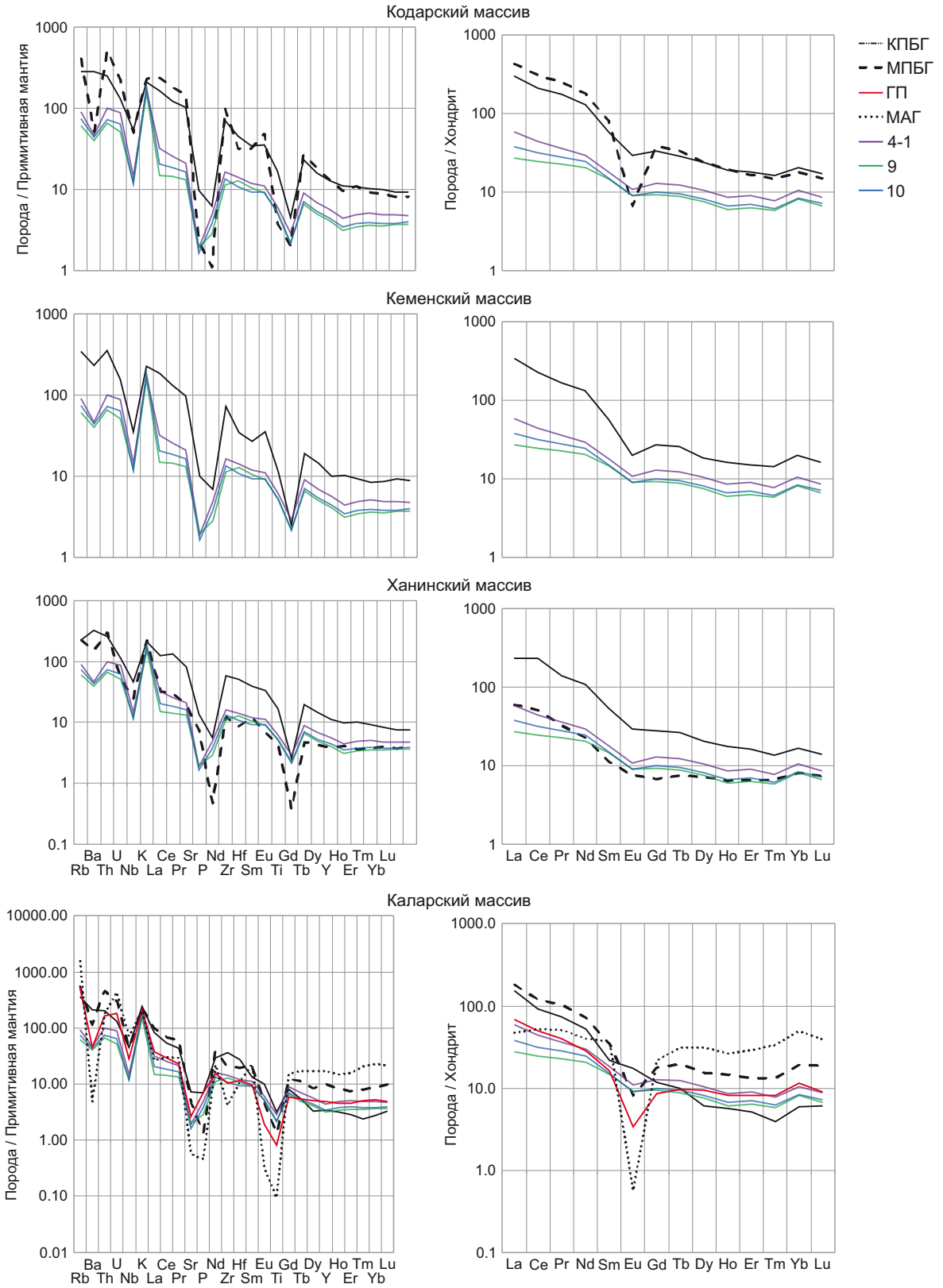

Рис. 9. Спайдерграммы и спектры распределения REE в песчаниках силимкунской свиты (4-1, 9, 10) и гранитоидах кодарского комплекса (по данным [Larin et al., 2021]).
КПБГ – крупнозернистые порфировидные биотитовые и биотит-амфиболовые граниты, гранодиориты и кварцевые сиениты; МПБГ – мелкозернистый порфировидный биотитовый гранит; ГП – гранит-порфир; МАГ – мусковит-альбитовый гранит.
Fig. 9. Spidergrams and REE distribution spectra in sandstones of the Silimkun formation (4-1, 9, 10) and granitoids of the Kodar complex (after [Larin et al., 2021]).
КПБГ are coarse-grained porphyritic biotite and biotite-amphibole granites, granodiorites and quartz syenites; МПБГ is a fine-grained porphyritic biotite granite; ГП – granite-porphyry; МАГ – muscovite-albite granite.

отсутствует у крупнозернистых порфировидных биотитовых и биотит-амфиболовых гранитов, гранодиоритов и кварцевых сиенитов Кодарского, Кеменского, Ханинского массивов.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения химического состава песчаников силимкунской свиты, обнажающихся в пойме руч. Кильчерис (левый приток р. Чина), в верхнем течении р. Кемен установлено следующее.

Породы обогащены Sc, Cr, Nb, V, Co, Ni, а также Mo и тяжелыми РЗЭ. При этом наблюдается нехарактерная парная корреляция Mo и Cr. Сильная положительная корреляция P с Nb, Ti, Fe указывает на явление сорбции P продуктами изменения минералов титана (например, лейкоксеном). Песчаники силимкунской свиты формировались в результате разрушения гранитоидов Каларского массива – предположительно гранит-порфиров и мелкозернистых порфировидных биотитовых гранитов. Менее выражено влияние габбро-норитов чинейского комплекса, обогащавших породы характерными элементами-примесями.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abramov B.N., Chernyshova N.A., 2001. Albitization Processes Related to the Genesis of Ore Material during the Entire Precambrian within the Kodar-Udokan Zone. Proceedings of Higher Educational Establishments. Geology and Exploration 2, 52–59 (in Russian) [Абрамов Б.Н., Чернышова Н.А. Процессы альбитизации в связи с общим докембрийским рудогенезом в пределах Кодаро-Удоканской зоны // Известия вузов. Геология и разведка. 2001. № 2. С. 52–59].

Abramov B.N., Chernyshova N.Y., 2012. Mineralogical and Geochemical Features of the Kilcheris Ore Occurrence (Kodar-Udokan Zone). Lithosphere 1, 147–153 (in Russian) [Абрамов Б.Н., Чернышова Н.А. Минералого-геохимические особенности рудопроявления Кильчерис (Кодаро-Удоканская зона) // Литосфера. 2012. № 1. С. 147–153].

Bhatia M.R., Crook K.A.W., 1986. Trace Element Characteristics of Greywackes and Tectonic Setting Discrimination of Sedimentary Basins. Contributions to Mineralogy and Petrology 92, 181–193. https://doi.org/10.1007/BF00375292.

Bogdanov Yu.V., Kochin G.G., Kutyrev E.I., Paradeeva L.N., Travin L.V., Trifonov N.P., Feoktistov V.P., 1966. Copper Deposits of the Olekma-Vitim Mountain Area. Geology and Patterns of Placement. Nedra, Leningrad, 386 p. (in Russian) [Богданов Ю.В., Кочин Г.Г., Кутырев Э.И., Парадеева Л.Н., Травин Л.В., Трифонов Н.П., Феоктистов В.П. Медистые отложения Олекмо-Витимской горной страны: Геология и закономерности размещения. Л.: Недра, 1966. 386 с.].

Charlet L., Manceau A.A., 1992. X-Ray Absorption Spectroscopic Study of the Sorption of Cr(III) at the Oxide-Water Interface: II. Adsorption, Coprecipitation, and Surface Precipitation on Hydrous Ferric Oxide. Journal of Colloid and Interface Science 148 (2), 443–458. https://doi.org/10.1016/0021-9797(92)90182-L.

Condie K.C., 1993. Chemical Composition and Evolution of the Upper Continental Crust: Contrasting Results from Surface Samples and Shales. Chemical Geology 104 (1–4), 1–37. https://doi.org/10.1016/0009-2541(93)90140-E.

Corker J., Evans J., Rummey J., 1991. EXAFS Studies of Pillared Clay Catalysts. Materials Chemistry and Physics 29 (1–4), 201–209. https://doi.org/10.1016/0254-0584(91)90016-N.

Cullers R.L., 2002. Implications of Elemental Concentrations for Provenance, Redox Conditions, and Metamorphic Studies of Shales and Limestones near Pueblo, CO, USA. Chemical Geology 191 (4), 305–327. https://doi.org/10.1016/S0009-2541(02)00133-X.

Dolnik T.A., 2000. Stromatolites and Microphytolites in the Riphean and Vendian Stratigraphy of the Folded Framing of the Siberian Platform. GEO, Novosibirsk, 320 p. (in Russian) [Дольник Т.А. Строматолиты и микрофитолиты в стратиграфии рифея и венда складчатого обрамления Сибирской платформы. Новосибирск: Гео, 2000. 320 с.].

Fedorovsky V.S., 1972. Lower Proterozoic Stratigraphy of Kodar and Udokan Ridges. Nauka, Moscow, 130 p. (in Russian) [Федоровский В.С. Стратиграфия нижнего протерозоя хребтов Кодар и Удокан. М.: Наука, 1972. 130 с].

Fendorf S.E., 1995. Surface Reactions of Chromium in Soils and Waters. Geoderma 67 (1–2), 55–71. https://doi.org/10.1016/0016-7061(94)00062-F.

Floyd P.A., Leveridge B.E., 1987. Tectonic Environment of the Devonian Gramscatho Basin, South Cornwall: Framework Mode and Geochemical Evidence from Turbiditic Sandstones. Journal of the Geological Society 144 (4), 531–542. https://doi.org/10.1144/gsjgs.144.4.0531.

Geological Map of the Russian Federation, 2004. Udokan Series. Scale of 1:200000. Sheet O-50-XXXV (Naminga). VSEGEI, Saint Petersburg (in Russian) [Геологическая карта Российской Федерации. Серия Удоканская. Масштаб: 1:200000. Лист O-50-XXXV (Наминга). СПб.: ВСЕГЕИ, 2004].

Gongalskiy B.I., 2010. Specific Features of the Basic Magmatism in the Udokan-Chineyskiy Region (Northern

Transbaikalia). Lithosphere 3, 87–94 (in Russian) [Гонгальский Б. Особенности основного магматизма Удокан-Чинейского рудного района (Северное Забайкалье) // Литосфера. 2010. № 3. С. 87–94].

Grigoriev N.A., 2009. Chemical Element Distribution in the Upper Continental Crust. Publishing House of the Ural Branch of the RAS, Ekaterinburg, 383 p. (in Russian) [Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2009. 383 с.].

Herron M.M., 1988. Geochemical Classification of Terrigenous Sands and Shales from Core or Log Data. Journal of Sedimentary Research 58 (5), 820–829. https://doi.org/10.1306/212F8E77-2B24-11D7-8648000102C1865D.

Kolotov V.P., Zhilkina A.V., Khludneva A.O., 2023. iPlasma ProQuad: A Computer System Based on a Relational DBMS for Processing and Monitoring the Results of Routine Analysis by the ICP-MS Method. In: V.P. Kolotov, N.S. Bezaeva (Eds), Advances in Geochemistry, Analytical Chemistry, and Planetary Sciences. 75th Anniversary of the Vernadsky Institute of the Russian Academy of Sciences. Springer, Cham, p. 555–562. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09883-3_36.

Larin A.M., Kotov A.B., Kovach V.P., Sal'nikova E.B., Gladkochub D.P., Savatenkov V.M., Velikoslavinskii S.D., Skovitina T.M., Rizvanova N.G., Sergeeva N.A., Vodovozov V.Yu., 2021. Rapakivi Granites of the Kodar Complex (Aldan Shield): Age, Sources, and Tectonic Setting. Petrology 29, 277–299. https://doi.org/10.1134/S0869591121030036.

Maslov A.V., Podkovyrov V.N., 2023. On the Lithogeochemical Reconstruction of Possible "Geodynamic" Types of Granites-Sources of Arkose Clastic Material. Geochemistry International 61, 1177–1195. https://doi.org/10.1134/S0016702923110071.

McLennan S.M., Taylor S.R., McCulloch M.T., Maynard J.B., 1990. Geochemical and Nd-Sr Isotopic Composition of Deep-Sea Turbidites: Crustal Evolution and Plate Tectonic Associations. Geochimica et Cosmochimica Acta 54 (7), 2015–2050. https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90269-Q.

Misra S., Osogba O., Powers M., 2020. Unsupervised Outlier Detection Techniques for Well Logs and Geophysical Data. In: S. Misra, H. Li, J. He (Eds), Machine Learning for Subsurface Characterization. Gulf Professional Publishing, p. 1–37. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817736-5.00001-6.

Podkovyrov V.N., Kotov A.B., Larin A.M., Kotova L.N., Kovach V.P., Zagornaya N.Yu., 2006. Sources and Provenances of Lower Proterozoic Terrigenous Rocks of the Udokan Group, Southern Kodar-Udokan Depression: Results of Sm-Nd Isotopic Investigations. Doklady Earth Sciences 408, 518–522. https://doi.org/10.1134/S1028334X06040027.

Ponariadov A.V., Kotova O.B., 2020. Phosphate Sorption on Leucoxene. Vestnik of Geosciences 301 (1), 19–23 (in Russian) [Понарядов А.В., Котова О.Б. Сорбция фосфата на лейкоксене // Вестник геонаук. 2020. Т. 301. № 1. С. 19–23]. https://doi.org/10.19110/geov.2020.1.3.

Richard F.C., Bourg A.C.M., 1991. Aqueous Geochemistry of Chromium: A Review. Water Resources 25 (70), 807–816. https://doi.org/10.1016/0043-1354(91)90160-R.

Roser B.P., Korsch, R.J., 1986. Determination of Tectonic Setting of Sandstone-Mudstone Suites Using SiO_2 Content and K_2O/Na_2O Ratio. Journal of Geology 94 (5), 635–650. https://doi.org/10.1086/629071.

Scott C., Lyons T.W., 2012. Contrasting Molybdenum Cycling and Isotopic Properties in Euxinic versus Non-Euxinic Sediments and Sedimentary Rocks: Refining the Paleoproxies. Chemical Geology 324–325, 19–27. https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.05.012.

Sochava A.V., 1986. Petrochemistry of the Upper Archean and Proterozoic in the Western Part of the Aldan Shield. Nauka, Leningrad, 142 p. (in Russian) [Сочава А.В. Петрохимия верхнего архея и протерозоя запада Витимо-Алданского щита. Л.: Наука, 1986. 142 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 1998. Scale of 1:1000000 (New Series). Sheet O-(50), 51 (Aldan). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 428 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Новая. Масштаб 1:1000000. Лист O-50, 51 (Алдан): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 1998. 428 с.].

State Geological Map of the Russian Federation, 2010. Aldan-Zabaikalskaya Series. Scale of 1:1000000 (Third Generation). Sheet O-50 (Bodaibo). Explanatory Note. VSEGEI, Saint Petersburg, 612 p. (in Russian) [Государственная геологическая карта Российской Федерации. Серия Алдано-Забайкальская. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Лист O-50 (Бодайбо): Объяснительная записка. СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. 612 с.].

Sun S.-S., McDonough W.F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. Geological Society of London Special Publications 42 (1), 313–345. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19.

Taylor S.R., McLennan S.M., 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Blackwell, Oxford, 312 p.

Yudovich Ya.E., Ketris M.P., 2011. Geochemical Indicators of Lithogenesis (Lithological Geochemistry). Geoprint, Syktyvkar, 742 p. (in Russian) [Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.].

Yudovich Ya.E., Ketris M.P., Rybina N.V., 2020. Geochemistry of Phosphorus. IG Komi SC UB RAS, Syktyvkar, 512 p. (in Russian) [Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В. Геохимия фосфора. Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2020. 512 с.].

Yudovich Ya.E., Ketris M.P., Rybina N.V., 2021. Main Empirical Regularities of the Phosphorus Geochemistry in the Hypergenesis. Lithosphere 21 (2), 139–157 (in Russian) [Юдович Я.Э., Кетрис М.П., Рыбина Н.В. Основные эмпирические закономерности геохимии фосфора в гипергенезе // Литосфера. 2021. Т. 21. № 2. С. 139–157]. https://doi.org/10.24930/1681-9004-2021-21-2-139-157.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1 / APPENDIX 1

Таблица 1.1. Содержание главных компонентов в породах силимкунской свиты
Table 1.1. Content of major elements in rocks of the Silimkun formation

Компоненты	Содержание, мас. %		
	минимальное	максимальное	среднее
SiO_2	50.0	77.0	62.5
Al_2O_3	3.99	9.86	7.13
TiO_2	0.12	0.73	0.41
FeO	0.67	4.16	2.25
MnO	0.02	0.13	0.09
K_2O	2.73	4.58	3.68
CaO	1.69	7.28	4.83
MgO	1.81	7.93	5.37
Na_2O	0.02	0.10	0.05
P_2O_5	0.03	0.17	0.09
S	0.0005	0.02	0.004

Таблица 1.2. Элементный состав пород силимкунской свиты, г/т
Table 1.2. Elemental composition of rocks of the Silimkun formation, ppm

Элемент	руч. Кильчерис																	
	Точки																	
	4-1-1	4-1-2	4-1-3	4-1-4	4-1-6	4-1-7	4-1-8	4-1-9	4-1-10	4-1-11	4-1-13	4-1-14	4-1-15	4-1-17	4-1-18	4-1-19	4-1-20	4-1-21
Cr	133.4	119.3	144.8	128.2	144.8	147.9	124.9	112.7	155.3	121.8	126.4	165.0	147.2	113.4	117.5	134.3	134.3	106.7
Co	8.6	4.8	9.5	10.0	12.3	6.5	9.9	10.3	4.6	8.8	10.4	6.8	12.7	5.2	8.5	11.4	11.8	11.8
Ni	25.4	16.9	27.9	28.2	35.2	20.7	27.4	30.2	15.7	25.9	30.9	22.4	36.8	16.1	24.8	33.4	34.4	32.0
Rb	54.5	39.4	53.0	52.2	61.2	40.1	47.6	55.8	35.7	47.4	57.6	39.9	67.8	28.1	45.1	59.1	61.6	62.4
Sr	34.7	32.7	34.0	37.6	38.0	34.2	34.0	37.6	32.4	32.4	35.7	30.4	34.4	24.5	32.8	32.7	34.3	34.6
Cs	1.17	0.49	1.32	1.55	2.16	0.67	1.35	1.82	0.49	1.58	2.08	0.72	2.46	0.59	1.45	1.98	2.30	2.36
Ba	278.1	260.6	251.0	260.1	252.9	276.3	222.9	215.0	249.2	196.9	222.9	264.3	266.9	152.8	197.3	244.6	237.6	236.3
Sc	9.2	6.2	12.0	11.9	12.3	7.6	9.7	11.5	5.0	10.3	11.5	7.1	12.7	6.8	11.4	13.9	12.3	14.3
V	49.3	25.2	58.2	57.2	79.8	27.1	56.3	67.0	25.0	54.2	68.1	34.1	83.3	41.1	46.1	63.9	70.8	69.6
Nb	6.3	6.3	8.9	8.0	9.1	4.4	7.8	9.2	3.9	8.8	9.9	5.2	13.7	6.5	8.8	11.5	9.7	8.8
Zr	93	131	130	107	127	78	111	137	47	132	151	73	202	109	120	146	141	90
Hf	2.4	3.3	3.3	2.9	3.3	1.9	2.9	3.5	1.6	4.0	4.8	2.1	5.4	2.9	3.3	3.9	3.9	2.6
W	0.5	0.5	0.7	0.8	0.9	0.4	0.8	0.8	3.0	1.0	1.0	0.7	1.2	1.0	1.0	1.0	0.9	1.0
Re	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.008	0.008	0.008	0.010
Tl	0.20	0.17	0.22	0.22	0.24	0.17	0.20	0.22	0.17	0.2	0.25	0.17	0.3	0.18	0.19	0.24	0.26	0.27
Bi	0.05	0.05	0.07	0.1	0.1	0.04	0.07	0.11	0.04	0.11	0.12	0.05	0.14	0.04	0.12	0.13	0.13	0.11
Th	5.7	4.6	7.1	6.5	7.5	3.4	6.1	7.7	3.1	7.6	9.4	3.8	9.9	4.9	6.4	8.5	7.4	6.2
U	1.2	0.8	1.6	1.8	2.1	0.7	1.5	1.8	0.7	1.8	2.3	0.8	2.5	1.3	1.8	2.1	2.0	1.8
Y	12.17	11.50	14.68	16.89	19.05	8.54	15.52	16.99	10.42	16.77	18.96	9.11	18.16	13.87	18.55	17.12	17.77	15.74
La	15.11	9.27	20.23	20.19	23.70	8.55	14.61	21.54	9.36	20.67	25.34	9.32	27.36	10.60	16.88	22.55	22.36	18.67
Ce	34.49	22.99	44.59	44.91	52.09	18.46	32.71	43.97	17.81	42.58	50.76	20.24	52.67	25.32	36.46	44.90	42.96	36.67
Pr	4.08	2.90	5.13	5.27	5.96	2.26	3.96	5.08	2.31	5.01	5.84	2.45	5.78	3.23	4.37	5.12	4.82	4.19
Nd	16.21	12.49	20.19	21.08	23.51	9.32	16.17	19.99	9.83	19.79	22.75	9.90	22.14	13.94	17.57	19.90	18.32	16.32
Sm	3.22	3.36	3.95	4.44	4.69	2.27	3.86	4.30	2.84	4.49	4.81	2.36	4.37	3.95	4.28	4.29	3.97	3.55
Eu	0.67	0.83	0.78	0.90	0.93	0.53	0.85	0.85	0.69	0.90	0.93	0.55	0.78	0.89	0.97	0.86	0.82	0.75
Gd	3.30	3.50	4.12	4.74	4.95	2.35	4.11	4.62	2.99	4.77	5.21	2.53	4.69	4.04	4.81	4.63	4.45	3.93
Tb	0.49	0.53	0.59	0.68	0.73	0.35	0.61	0.67	0.44	0.70	0.76	0.38	0.66	0.60	0.73	0.66	0.65	0.58
Dy	2.57	2.74	3.12	3.66	3.92	1.85	3.32	3.54	2.35	3.62	4.12	2.01	3.68	3.12	4.01	3.67	3.65	3.26
Ho	0.49	0.51	0.62	0.71	0.77	0.35	0.64	0.69	0.43	0.69	0.80	0.38	0.73	0.60	0.78	0.72	0.71	0.65
Er	1.53	1.53	1.88	2.15	2.35	1.06	1.91	2.07	1.25	2.04	2.41	1.16	2.26	1.73	2.30	2.18	2.16	1.95
Tm	0.21	0.23	0.26	0.29	0.32	0.15	0.26	0.28	0.17	0.28	0.33	0.16	0.31	0.23	0.31	0.30	0.30	0.27
Yb	1.51	1.71	1.80	2.02	2.17	1.03	1.78	1.89	1.18	1.90	2.21	1.11	2.17	1.64	2.08	2.06	2.00	1.84

Таблица 1.2 (продолжение)
Table 1.2 (continued)

Элемент	руч. Кильчерис																	
	Точки																	
	4-1-1	4-1-2	4-1-3	4-1-4	4-1-6	4-1-7	4-1-8	4-1-9	4-1-10	4-1-11	4-1-13	4-1-14	4-1-15	4-1-17	4-1-18	4-1-19	4-1-20	4-1-21
Tm	0.21	0.23	0.26	0.29	0.32	0.15	0.26	0.28	0.17	0.28	0.33	0.16	0.31	0.23	0.31	0.30	0.30	0.27
Yb	1.51	1.71	1.80	2.02	2.17	1.03	1.78	1.89	1.18	1.90	2.21	1.11	2.17	1.64	2.08	2.06	2.00	1.84
Lu	0.23	0.27	0.27	0.30	0.33	0.16	0.26	0.29	0.17	0.28	0.33	0.17	0.33	0.24	0.31	0.31	0.31	0.28
Li	33.40	19.06	36.68	38.21	49.47	23.23	37.93	39.92	17.83	37.27	39.64	23.18	47.90	23.40	37.08	41.90	44.79	42.65
B	4.03	6.41	7.43	6.63	8.13	6.92	6.64	5.92	9.44	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cu	4.00	4.33	4.89	4.82	4.45	3.88	16.35	5.82	5.36	4.19	4.38	4.18	5.64	6.21	4.71	4.49	4.84	3.58
Pb	7.88	3.72	6.35	7.33	10.03	7.05	7.13	4.82	2.07	4.97	7.86	6.31	6.38	8.53	7.00	5.55	5.00	3.08
Zn	13.25	81.46	105.08	56.53	80.48	0.75	50.31	37.61	0.75	18.64	27.37	2.84	32.62	55.26	36.62	38.27	45.66	44.61
Ga	7.80	4.38	8.71	8.68	10.74	4.74	7.82	8.77	3.79	7.44	9.13	4.94	10.88	4.31	7.28	9.69	9.66	9.71
Cd	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.1	0.025	0.025	0.025	0.2	0.7	0.025	0.025	0.025	0.025
Mo	2.25	1.66	1.76	2.31	1.83	2.76	1.54	1.33	3.37	1.48	1.69	3.14	1.58	3.62	1.73	1.75	1.59	1.15
Be	0.65	0.34	0.77	0.77	1.05	0.35	0.64	0.89	0.31	0.70	0.74	0.37	1.04	0.29	0.58	0.89	1.00	1.05
$\sum РЗЭ_{Ce}/_{Y}$	7.14	4.71	7.49	6.66	7.13	5.67	5.59	6.81	4.77	6.54	6.83	5.68	7.63	4.75	5.25	6.72	6.55	6.28
Eu/Eu*	0.63	0.74	0.59	0.60	0.59	0.70	0.65	0.58	0.73	0.60	0.57	0.68	0.53	0.68	0.66	0.59	0.59	0.61

Элемент	р. Кемен											
	Точки											
	9-1	9-3	9-7	9-14	9-15	10-4	10-5	10-6	10-9	10-11	10-13	10-15
Cr	167.9	169.8	239.8	83.8	187.0	155.4	142.5	188.4	165.5	120.0	123.4	141.7
Co	3.1	3.5	3.5	2.1	3.1	2.6	3.0	2.3	3.9	6.2	7.5	9.0
Ni	19.2	13.6	21.3	8.6	14.2	11.9	13.0	10.6	17.8	23.0	25.4	31.9
Rb	30.1	31.7	37.1	31.2	38.1	37.9	41.1	40.1	41.1	36.4	42.2	46.2
Sr	34.8	33.2	34.8	36.4	35.1	30.3	32.1	28.2	31.9	28.4	25.5	27.0
Cs	0.52	0.59	0.49	0.46	0.50	0.51	0.54	0.45	0.57	0.87	1.11	1.37
Ba	181.0	189.6	201.1	215.0	228.3	250.0	270.5	215.0	246.4	178.5	198.4	209.5
Sc	6.4	5.2	4.9	6.6	7.2	7.6	9.2	4.6	10.7	11.2	11.6	11.4
V	22.2	23.0	34.8	13.9	30.7	24.6	30.3	33.4	32.5	40.4	53.5	60.2
Nb	6.1	6.5	9.7	2.1	8.9	3.8	5.8	8.2	5.7	4.8	8.8	9.0
Zr	112	98	162	30	128	49	101	136	69	52	116	102
Hf	3.0	2.7	4.2	0.9	3.5	1.4	2.7	3.7	2.2	1.5	3.2	3.0
W	0.4	0.5	0.7	0.7	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.9	0.8
Re	0.007	0.008	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Tl	0.13	0.13	0.13	0.13	0.15	0.15	0.16	0.15	0.16	0.14	0.17	0.18

Таблица 1.2 (продолжение)
Table 1.2 (continued)

Элемент	р. Кемен											
	Точки											
	9-1	9-3	9-7	9-14	9-15	10-4	10-5	10-6	10-9	10-11	10-13	10-15
Bi	0.05	0.04	0.06	0.05	0.09	0.04	0.05	0.07	0.06	0.06	0.09	0.10
Th	4.04	3.92	5.54	1.33	6.37	2.89	3.95	6.49	4.78	3.37	6.10	5.35
U	0.85	1.01	1.22	0.49	1.04	0.56	0.87	1.06	0.99	1.06	1.72	1.74
Y	11.60	10.11	12.69	8.66	9.99	7.62	9.58	8.98	10.49	13.64	16.03	16.20
La	8.00	8.95	12.39	3.49	8.48	6.80	9.04	12.37	11.37	10.20	14.96	14.67
Ce	19.31	21.19	33.83	8.47	20.35	14.10	20.56	33.86	27.14	23.84	33.80	32.15
Pr	2.56	2.71	4.53	1.24	2.59	1.66	2.55	4.62	3.52	3.16	4.22	3.92
Nd	11.10	11.44	20.22	6.01	11.16	6.79	10.50	20.15	14.85	13.40	17.23	16.25
Sm	3.08	2.82	4.50	2.11	3.04	1.85	2.39	3.94	3.39	3.19	3.81	3.70
Eu	0.69	0.59	0.87	0.56	0.67	0.48	0.52	0.71	0.71	0.71	0.76	0.79
Gd	3.13	2.87	3.93	2.09	2.97	2.08	2.48	3.27	3.15	3.33	4.08	4.03
Tb	0.45	0.42	0.52	0.33	0.42	0.33	0.36	0.40	0.43	0.51	0.60	0.60
Dy	2.56	2.26	2.66	1.90	2.26	1.77	2.03	1.92	2.29	2.87	3.34	3.36
Ho	0.48	0.43	0.50	0.37	0.42	0.33	0.40	0.35	0.44	0.56	0.64	0.66
Er	1.47	1.31	1.52	1.11	1.27	0.99	1.20	1.11	1.31	1.68	1.97	1.98
Tm	0.20	0.19	0.22	0.17	0.18	0.15	0.17	0.15	0.18	0.23	0.28	0.28
Yb	1.45	1.36	1.55	1.19	1.30	1.04	1.21	1.09	1.27	1.58	1.84	1.84
Lu	0.22	0.21	0.23	0.18	0.20	0.16	0.19	0.17	0.19	0.32	0.28	0.27
Li	8.05	9.04	9.61	9.90	12.94	9.91	11.75	9.96	13.50	23.86	28.95	34.16
B	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Cu	4.06	5.51	6.09	1.47	3.89	2.98	3.11	3.88	3.19	2.98	3.71	3.66
Pb	4.37	5.86	4.30	3.91	3.88	3.72	5.35	4.14	4.20	3.88	6.81	7.81
Zn	15.32	28.32	11.87	3.68	5.91	0.75	13.48	5.23	0.75	4.12	6.16	7.64
Ga	2.98	3.37	4.49	2.43	3.75	3.60	4.64	4.06	5.34	5.93	7.40	8.08
Cd	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.09	0.03	0.21	0.03
Mo	4.54	4.96	6.20	2.00	3.89	3.80	3.89	3.65	2.67	2.59	2.49	2.31
Be	0.18	0.20	0.29	0.21	0.33	0.22	0.26	0.18	0.31	0.43	0.48	0.51
$\sum РЗЭ_{Ce}/_{Y}$	4.49	5.27	6.85	2.98	5.13	4.63	5.67	8.93	6.59	4.92	5.74	5.48
Eu/Eu*	0.68	0.64	0.63	0.81	0.68	0.74	0.65	0.60	0.67	0.66	0.59	0.62

Примечание. Значения европиевой аномалии (Eu/Eu*) рассчитаны по формуле $Eu_{CN}/(Sm_{CN}\cdot Gd_{CN})^{0.5}$, в которой значения Eu, Sm и Gd нормированы на хондрит.
Note. Eu anomaly (Eu/Eu*), calculations are based on $Eu_{CN}/(Sm_{CN}\cdot Gd_{CN})^{0.5}$, with chondrite-normalized Eu, Sm, and Gd.