Russian Journal of Earth Sciences

Венд-кембрийские породы Верхне-Каларской грабен-синклинали юга Сибирского кратона: минералогия и особенности геохимии главных петрогенных элементов

С. И. Меренкова[1,*], Т. Г. Кузьмина[2], Е. В. Карпова[3], Р. Р. Габдуллин[2,3], В. Ю. Водовозов[3,4], Т. В. Ромашова[2], и И. В. Хохлова[2]

[1]Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия
[2]Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, Москва, Россия
[3]Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва, Россия
[4]Геологический институт РАН, Москва, Россия
* **Контакт:** Софья Ивановна Меренкова, koshelevasof@mail.ru

Рассматриваются особенности минерального и химического состава (главные петрогенные элементы) венд-кембрийских пород силимкунской свиты (V-$Є_1 sl$), обнажающихся на западном борту Верхне-Каларской грабен-синклинали на юго-западе Алданского щита. Изученные породы – песчаники и алевролиты, относятся к аркозам и субаркозам. По хемотипу они отвечают преимущественно нормосилитам и миосилитам. По величине щелочного модуля песчаники и алевролиты являются гиперкалиевыми и служат довольно ярким примером продуктов докембрийского аридного выветривания. Обсуждается нормативный минеральный состав, его вариации, валидность расчетов по данным петрографических исследований, проблемы использования климатических индексов и литохимических диаграмм, направленных на реконструкцию климатических параметров геологического прошлого. Значения индекса химической изменчивости CIA (Chemical Index of Alteration) песчаников и алевролитов варьируют от 49, что соответствует практически неизмененной породе, до 67 ($CIA_{среднее}$ = 58). Характерные для алевролитов силимкунской свиты с высоким гидролизатным модулем (ГМ) (миосилиты) значения CIA (63–67, $CIA_{среднее}$ = 65) указывают на доминирование физического выветривания во время формирования исходных для них осадков. Незначительные изменения в величине CIA для данной выборки связаны, в первую очередь, с вариациями содержание иллитного цемента и обломочного мусковита. Значения индекса химического выветривания RW (Robust Weathering) варьируются от 37 до 68 (в среднем около 57).

Ключевые слова: венд, кембрий, Удокан, климат, индикаторы выветривания.

Цитирование: Меренкова, С. И., Т. Г. Кузьмина, Е. В. Карпова, Р. Р. Габдуллин, В. Ю. Водовозов, Т. В. Ромашова, и И. В. Хохлова Венд-кембрийские породы Верхне-Каларской грабен-синклинали юга Сибирского кратона: минералогия и особенности геохимии главных петрогенных элементов // Russian Journal of Earth Sciences. — 2024. — Т. 24. — ES4009. — DOI: 10.2205/2024es000923 — EDN: DNFGSX

Введение

Несмотря на длительную историю изучения протерозойских-раннепалеозойских осадочных пород Удокана (в первую очередь – как источников рудных полезных ископаемых), остался ряд слабоизученных образований. В частности – силимкунская свита.

Рассматриваемые обнажения венд-кембрийских пород силимкунской свиты (V-$Є_1 sl$) расположены на западном борту Верхне-Каларской грабен-синклинали на юго-западе Алданского щита, в междуречье рек Чина (верхнее течение Калара) и Кемена. Силимкунская (ранее выделялась как пестроцветная $Є_1 ps$) свита согласно залегает на бараксанской свите (Vbr), граница с которой проводится по появлению в разрезе

https://elibrary.ru/dnfgsx

Получено: 16 февраля 2024 г.
Принято: 15 июля 2024 г.
Опубликовано: 20 ноября 2024 г.

© 2024. Коллектив авторов.

красноцветных терригенно-карбонатных пород [*Макарьев и др.*, 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 (доломиты). По водорослям, строматолитам, микрофитолитам и следам ползания червеобразных организмов определен венд-нижнекембрийский возраст свиты [*Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000, новая серия, лист O-(50) 51 и объяснительная записка*, 1998; *Дольник*, 2000; *Макарьев и др.*, 2010]. На поверхностях напластования встречаются хорошо сохранившиеся волновая рябь и глиптоморфозы галита. Породы свиты формировались в мелководных морских условиях [*Пахомов и Барабашева*, 1990].

Целью работы являлось изучение минерального состава и особенностей распределения главных петрогенных элементов в песчаниках и алевролитах силимкунской свиты. На основе имеющихся литологических, петрографических и геохимических данных рассмотрено взаимоотношение лито-, петро- и хемотипов исследуемых пород, а также обсуждаются отдельные аспекты применения индексов выветривания.

Материалы и методы исследования

Песчаники силимкунской свиты из нижней красноцветной подсвиты отобраны В. Ю. Водовозовым с целью палеомагнитного анализа, обрезки этих образцов послужили исходным материалом для настоящих исследований. Отбор проводился из отдельных точек-сайтов. Мощность свиты в разрезе на берегу р. Кемен составляет 283 м, полная мощность превышает 300 м (по литературным данным [*Государственная геологическая карта Российской Федерации*, 2004]). Обнажение 4-1 с видимой мощностью 6 м расположено в пойме ручья Кильчерис (левый приток р. Чина), обнажения 9 и 10, каждое мощностью 15–20 м, расположены в 9 км к СВ от 4-1 в верхнем течении р. Кемен (рис. 1), расстояние между обнажениями 9 и 10–300 м. По расположению точек отбора относительно контакта с нижележащей бараксанской свитой можно определить относительную возрастную последовательность изученных отложений: наиболее древними являются породы обнажения 9, затем 10 и выше залегают породы обнажения 4-1.

Для определения химического состава проб использован рентгенофлуоресцентный волнодисперсионный спектрометр Axios Advanced (PANalytical B. V., Голландия). Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА) выполнен в лаборатории методов исследования и анализа веществ и материалов ГЕОХИ РАН (аналитики Т. Г. Кузьмина, Т. В. Ромашова, И. В. Хохлова).

На основе результатов РФА выполнен расчет нормативного минерального состава с применением программы MINLITH [*Розен и др.*, 2000; *Rosen et al.*, 2004]. Ошибка вычислений по программе MINLITH для большинства случаев находится в пределах 5–15 отн.%, и только при содержаниях минерала менее 5 мас.%, она достигает 60–70 отн.% [*Розен и Аббясов*, 2003]. По этой причине в текущем исследовании рассматриваются данные по наиболее значимым в процентном отношении содержаниям минералов, что, даже с поправкой на вышеуказанную ошибку, позволяет судить об определенных изменениях в составе пород.

Методические аспекты, связанные с расчетом индекса химической изменчивости CIA (Chemical Index of Alteration), индекса химического выветривания RW (Robust Weathering) и тетраэдрического пространства A–CN–K–FM подробно представлены в [*Babechuk and Fedo*, 2023; *Fedo and Babechuk*, 2023] и разделе «Обсуждение» настоящей работы.

Результаты

Содержание петрогенных оксидов приведены в табл. 1. Для изучаемых пород (песчаников и алевролитов) силимкунской свиты характерны содержания SiO_2 50–77% (в среднем 62,5%), Al_2O_3 4–10% (в среднем 7%), K_2O 3–5%, $Fe_2O_{3(total)}$ до 6%, MgO до 8%. Содержание CaO варьирует от 2 до 8% (в среднем 5,6%). Содержание Na_2O – 0,17–0,29%. P_2O_5 в среднем составляет 0,11%, MnO – 0,1%, TiO_2 – 0,53%. На

основе содержания главных петрогенных оксидов далее выполнен расчет нормативного минерального состава, а также обсуждаемых индексов и модулей.

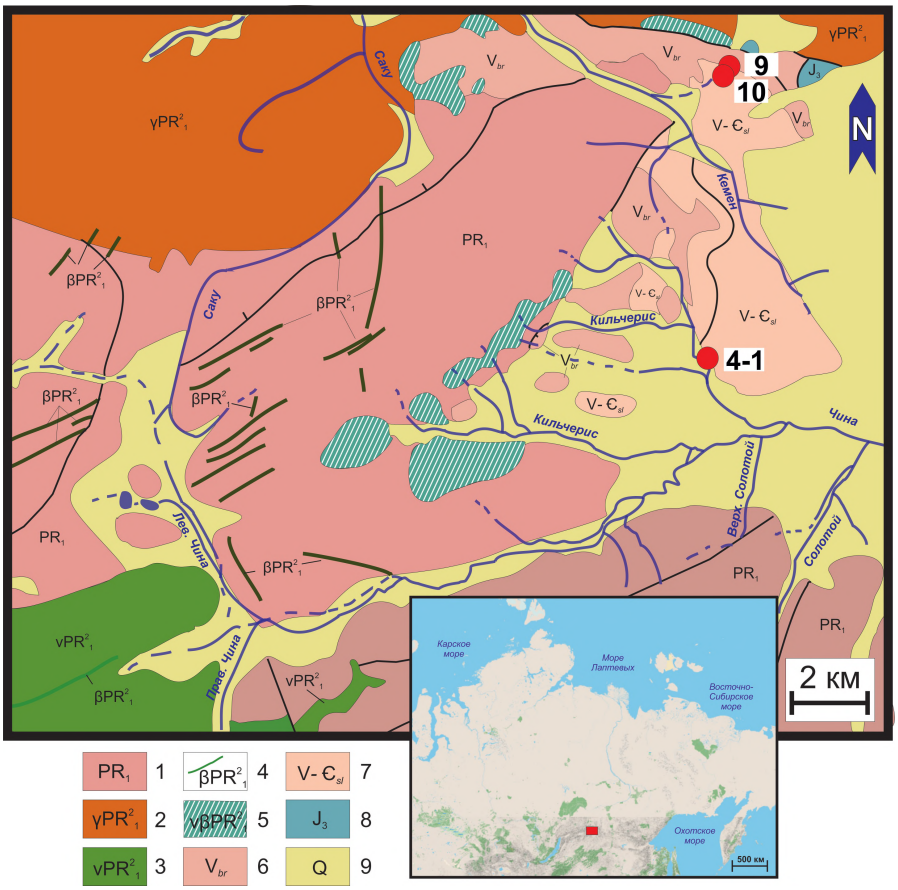

Рис. 1. Положение исследованных авторами выходов пород силимкунской свиты по ([*Государственная геологическая карта Российской Федерации*, 2004], с изменениями). 1 – метаосадочные породы удоканского комплекса нижнего протерозоя; 2 – гранитоиды кодарского комплекса нижнего протерозоя; 3 – габброиды чинейского комплекса нижнего протерозоя; 4, 5 – габбродолериты дорасского комплекса нижнего протерозоя (4 – дайки долеритов, 5 – силлы габбродолеритов); 6, 7 – терригенно-карбонатные породы верхнекаларской серии (6 – бараксанская свита венда, 7 – силимкунская свита венда – нижнего кембрия); 8 – верхнеюрские терригенные породы чепинской свиты; 9 – четвертичные отложения.

Петрографические исследования в шлифах

Исследуемые породы силимкунской свиты представлены песчаниками мелко-тонкозернистыми (с примесью среднепесчаного материала и единичными зернами крупнопесчаной размерности) и глинистыми алевролитами. Состав: кварц (70–75%), полевые шпаты (ПШ) (20–27%, представлены калиевыми полевыми шпатами и плагиоклазами). Литокласты (до 5%). Среди них присутствуют обломки вулканитов и метаморфических пород. Магматические породы представлены измененными обломками гранитоидов, а также кислых эффузивов с афировой структурой, в составе которых наблюдается кварц, тонкие кварцево-полевошпатовые сростки и рудные минералы. Осадочные породы присутствуют в образцах 4-1-10, 9-7, 10-6, 10-9 и представлены крупнозернистыми обломками аргиллитов, а в 10-9 – также глинистых известняков (известковых аргиллитов). Среди обломков метаморфических пород наблюдаются полуокатанные кварциты с микрогранобластовой структурой. Слюды (единичные чешуйки) – биотит и, реже, мусковит. Тяжелые акцессории – единичные измененные (серпентинизированные) пироксены, единичные сфены, цирконы. В отдельных образцах

присутствует ставролит. Преобладает поровый тонкокристаллический доломитовый цемент (от 7 до 20%); также фиксируются: пленочный иллит-гематитовый цемент (до 7%) и регенерационный кварцевый и полевошпатовый цементы (1–3%).

Таблица 1. Химический состав пород силимкунской свиты (мас.%)

Образец	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	ППП*	Σ
4-1-1	66,49	0,48	8,84	3,16	0,09	5,66	3,61	0,26	4,16	0,10	7,25	100,10
4-1-2	69,11	0,39	6,62	2,03	0,15	5,08	4,70	0,26	3,79	0,08	7,94	100,14
4-1-3	61,71	0,70	9,44	3,52	0,11	6,53	4,32	0,24	4,34	0,14	9,03	100,08
4-1-4	55,50	0,62	9,20	3,96	0,12	7,81	6,19	0,21	4,05	0,13	12,42	100,21
4-1-6 (а)	53,33	0,69	10,10	4,91	0,12	8,18	5,83	0,2	4,03	0,13	12,63	100,15
4-1-7 (а)	71,33	0,36	6,69	2,30	0,10	4,91	3,82	0,24	3,66	0,07	6,7	100,17
4-1-8 (а)	58,84	0,58	8,18	3,61	0,12	7,24	6,03	0,18	3,90	0,12	11,34	100,14
4-1-9 (а)	53,39	0,67	8,91	4,46	0,11	7,71	6,93	0,19	3,89	0,13	13,86	100,24
4-1-10	67,94	0,25	5,43	2,00	0,13	5,22	5,86	0,23	3,33	0,06	9,65	100,10
4-1-11	53,80	0,68	7,91	4,25	0,13	7,62	7,49	0,18	3,67	0,13	14,43	100,27
4-1-13 (а)	51,85	0,69	8,95	4,92	0,11	7,92	7,08	0,17	3,93	0,12	14,49	100,22
4-1-14	71,78	0,35	6,71	2,51	0,09	4,86	3,47	0,23	3,76	0,08	6,35	100,18
4-1-15 (а)	60,88	0,88	10,37	5,84	0,07	6,24	3,12	0,21	4,69	0,17	7,43	99,89
4-1-17	60,49	0,51	6,07	2,56	0,15	6,50	7,23	0,2	3,51	0,12	12,74	100,09
4-1-18	53,02	0,64	7,54	4,17	0,13	7,73	7,79	0,18	3,81	0,13	15	100,15
4-1-19 (а)	56,36	0,79	9,81	5,44	0,10	7,35	5,02	0,19	4,51	0,17	10,56	100,29
4-1-20 (а)	55,17	0,66	9,41	5,47	0,11	7,52	5,66	0,19	4,21	0,12	11,66	100,19
4-1-21 (а)	50,17	0,59	9,20	5,20	0,12	8,41	7,19	0,19	4,08	0,11	14,98	100,23
9-1	62,99	0,39	4,53	1,66	0,10	5,84	8,00	0,22	3,34	0,06	12,82	99,95
9-3	65,83	0,41	4,63	1,48	0,10	5,18	6,94	0,22	3,27	0,09	11,95	100,09
9-7	72,48	0,63	6,10	1,96	0,07	3,26	4,00	0,27	4,42	0,10	6,93	100,22
9-14	71,55	0,15	4,22	1,21	0,09	4,07	5,97	0,29	3,29	0,05	9,23	100,12
9-15	70,92	0,61	6,08	1,75	0,08	3,63	4,52	0,29	4,45	0,08	7,88	100,29
10-4	74,01	0,27	5,01	1,95	0,10	3,06	3,75	0,23	3,90	0,05	7,88	100,21
10-5	68,03	0,38	6,07	1,67	0,08	4,54	5,42	0,24	4,43	0,08	9,23	100,17
10-6	77,13	0,57	6,80	1,86	0,03	2,05	2,20	0,25	5,42	0,09	3,85	100,24
10-9	67,43	0,40	6,27	2,15	0,08	4,71	5,20	0,21	4,57	0,08	9,08	100,17
10-11	54,67	0,33	6,80	2,90	0,11	7,45	8,19	0,17	4,24	0,08	15,15	100,09
10-13	60,01	0,58	7,76	3,83	0,09	6,31	5,79	0,18	4,83	0,15	10,68	100,21
10-15	59,76	0,58	8,18	4,35	0,08	6,60	5,37	0,17	4,64	0,15	10,39	100,27

Примечание. *ППП – потери при прокаливании. Здесь и далее в таблицах (а) обозначает алевролиты, не отмеченные образцы – песчаники.

Нормативный минеральный состав. Минеральный состав пород, рассчитанный по методу О. М. Розена [*Розен и др.*, 2000; *Rosen et al.*, 2004], представлен в табл. 2. Согласно нормативному расчету, породы содержат от 29 до 58% кварца, 13–33% полевых шпатов, глинистые минералы (иллит) в среднем составляют 11% (минимум – менее 1%, максимум 24%). Содержание доломита достигает 27% (в среднем 18%).

При сравнении результатов нормативных расчетов и петрографического изучения в шлифах обнаружены важные моменты, которые необходимо иметь в виду при дальнейшей интерпретации.

При нормативном расчете завышено относительно результатов петрографического изучения содержание ортоклаза, что связано с отсутствием возможности разделить ортоклаз и микроклин. Поэтому расчетные значения ортоклаза в данном случае скорее суммарное содержание полевых шпатов.

Таблица 2. Нормативный минеральный состав пород силимкунской свиты

Образец	Ab	An	Pl	Or	Q	Ill	Ap	Dl	Ank	Srp	Gt	Prl	Pr	Rt
4-1-1	2,22	0,24	2,46	15,48	44,6	16,97	0,23	11,43	0	5,42	2,8	0,11	0,01	0,48
4-1-2	2,04	0,22	2,26	16,19	52,8	9,95	0,17	12,14	0	3,89	2,12	0,12	0,01	0,36
4-1-3	1,54	0,16	1,7	14,54	38,7	16,01	0,3	19,43	0	5,2	3,33	0,14	0,04	0,59
4-1-4	2,21	0,23	2,44	17,54	50,46	8,85	0,19	14,98	0	3,09	1,87	0,18	0,01	0,39
4-1-6 (a)	2,07	0,22	2,29	15,55	38,87	19,1	0,35	13,67	0	6,17	3,14	0,14	0,01	0,71
4-1-7 (a)	1,81	0,19	2	13,52	33,97	19,71	0,31	20,09	0	5,98	3,61	0,15	0,02	0,63
4-1-8 (a)	1,74	0,18	1,92	11,17	31,04	24,09	0,31	19	0	7,07	4,55	0,15	0	0,71
4-1-9 (a)	1,64	0,17	1,81	12,75	33,29	19,41	0,31	22,6	0	4,78	4,22	0,13	0	0,69
4-1-10	1,95	0,21	2,16	16,34	52,18	6,05	0,15	18,91	0	1,83	1,96	0,16	0,01	0,25
4-1-11	1,55	0,17	1,72	13,21	35,38	16,06	0,32	24,41	0	3,95	4,11	0,15	0	0,69
4-1-13 (a)	1,48	0,16	1,64	12,97	31,69	19,63	0,3	23,22	0	4,98	4,75	0,13	0	0,71
4-1-14	1,96	0,21	2,17	17	52,85	9,66	0,19	10,99	0	4,3	2,37	0,11	0,01	0,35
4-1-15 (a)	1,8	0,19	1,99	16,21	36,08	21,86	0,41	9,59	0	7,21	5,66	0,08	0	0,9
4-1-17	1,71	0,18	1,89	16,4	44,05	8,31	0,3	23,38	0	2,44	2,5	0,18	0,03	0,52
4-1-18	1,56	0,17	1,73	15,44	34,47	13,74	0,32	25,48	0	3,87	4,14	0,16	0	0,66
4-1-19 (a)	1,64	0,17	1,81	15,88	32,63	20,38	0,42	15,94	0	6,75	5,27	0,12	0	0,8
4-1-20 (a)	1,64	0,17	1,81	14,3	32,97	20,05	0,3	18,32	0	6,13	5,32	0,13	0	0,68
4-1-21 (a)	1,65	0,18	1,83	13,75	28,92	19,94	0,28	23,68	0	5,78	5,07	0,15	0	0,61
9-1	1,87	0,2	2,07	18,64	48,56	2,1	0,14	25,97	0	0,26	1,76	0,12	0	0,39
9-3	1,88	0,2	2,08	17,94	51,83	2,89	0,21	22,53	0	0,46	1,53	0,12	0,01	0,41
9-7	2,29	0,24	2,53	24,35	53,23	3,44	0,23	12,62	0	0,84	2,04	0,08	0	0,63
9-14	2,45	0,26	2,71	19,2	56,99	0,38	0,11	18,53	0,83	0	0,98	0,11	0,01	0,15
9-15	2,47	0,26	2,73	24,74	51,54	3,06	0,2	14,39	0	0,83	1,82	0,09	0	0,61
10-4	1,98	0,21	2,19	22,66	58,04	1,48	0,13	12,17	0	0,8	2,14	0,12	0	0,27
10-5	2,04	0,22	2,26	24,39	48,74	3,52	0,19	17,45	0	1,27	1,71	0,09	0	0,38
10-6	2,12	0,23	2,35	31,02	54,16	1,94	0,2	6,72	0	1,02	1,99	0,03	0	0,57
10-9	1,79	0,19	1,98	24,98	47,49	4,02	0,2	16,72	0	1,9	2,23	0,09	0	0,4
10-11	1,47	0,16	1,63	20,89	35,63	8,4	0,2	27	0	2,86	2,92	0,13	0	0,34
10-13	1,54	0,16	1,7	23,57	37,59	9,66	0,37	18,48	0	4,04	3,89	0,11	0	0,58
10-15	1,46	0,16	1,62	20,84	37,35	12,58	0,37	17,14	0	5,06	4,36	0,1	0	0,59

Примечание. Ab – альбит, An – анортит, Pl – плагиоклаз, Or – ортоклаз, Q – кварц, минералы кремнезема, Ill – иллит, Ap – апатит, Dl – доломит, Ank – анкерит, Srp – серпентин, Gt – гётит, Prl – пиролюзит., Pr – пирит, Rt – рутил. При содержаниях минерала менее 5 мас.%, ошибка достигает 60–70 отн.% [*Розен и Аббясов*, 2003].

Представляется несколько завышенным количество иллита при нормативном расчете. Это связано, по-видимому, с попаданием в его расчетное количество мусковита. Иллит и мусковит – слоистые силикаты, причем иллит часто является продуктом гидролиза мусковита. Поэтому в данном случае количественные значения по содержанию иллита правильнее будет назвать количеством слоистых силикатов. Проблемой является то, что иллит находится в составе цемента, а мусковит – в обломочной части, и объединение их в общую величину не является информативным.

Стоит отметить, что ранее, при сравнении MINLITH и Mincomp [*Regelink*, 2014], также было обнаружено повышенное количество иллита при расчете в MINLITH. Автор [*Regelink*, 2014] указывает как причины следующее: 1) разница распределении калия между различными минералами (иллит, мусковит, ортоклазом); 2) различие в молекулярной формуле иллита, т.к. разработчики MINLITH [*Rosen et al.*, 2004] включают в него также железо и магний, в результате чего молярная масса минерала значительно увеличивается.

При этом расчётное количество доломита соответствует фактическому.

Обсуждение

Взаимоотношение лито-, петро- и хемотипов

В соответствии с результатами изучения в шлифах и положением точек составов на классификационной диаграмме $\log(Na_2O/K_2O) - \log(SiO_2/Al_2O_3)$ [*Петтиджон и др.*, 1976], песчаники силимкунской свиты относятся к аркозам и субаркозам (рис. 2).

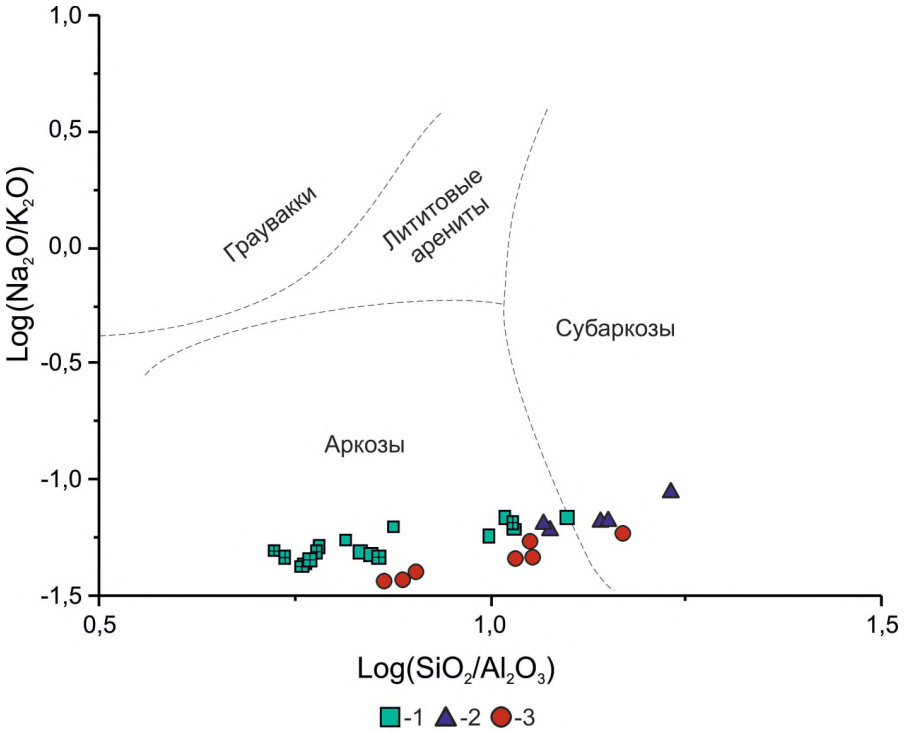

Рис. 2. Классификационная диаграмма [*Петтиджон и др.*, 1976] для песчаников и алевролитов силимкунской свиты. 1 – обнажение 4-1, 2 – обнажение 9, 3 – обнажение 10, крестом отмечены алевролиты.

На основе петрохимических модулей возможно произвести деление пород на хемотипы. Гидролизатный модуль (ГМ) предназначен для количественной оценки выщелачивания и гидролиза. На его основе породы подразделяются на силиты (ГМ $< 0,3$), сиаллиты и сиферлиты (ГМ = 0,31–0,55), гидролизаты (ГМ $> 0,55$) [*Юдович и Кетрис*, 2000]. Изучаемые песчаники и алевролиты силимкунской свиты относятся к хемотипу силиты (рис. 3А, Б). По величине MgO > 3% изучаемые породы, согласно классификации, должны быть отнесены к псевдосилитам. В псевдосилитах и псевдосиаллитах носителем магния является хлорит, монтмориллонит или биотит [*Юдович и Кетрис*, 2000]. В нашем случае достоверно известно, что за высокую магнезиальность отвечает доломит и отнесение к псевдосилитам некорректно.

Собственно силиты подразделяются на классы – гиперсилиты, суперсилиты, нормосилиты и миосилиты [*Юдович и Кетрис*, 2000]. Изучаемые породы силимкунской свиты относятся, в большинстве своем, к нормо- ($n = 15$) и миосилитам ($n = 13$), 2 образца относятся к суперсилитам. Суперсилиты отличают значения ГМ в интервале от 0,06 до 0,10. Для изучаемых пород, аттестованных как суперсилиты, характерна повышенная (относительно других образцов) величина модуля нормированной щёлочности (НКМ) – 0,83–0,85, что обусловлено высоким содержанием полевых шпатов. Также в этих образцах наблюдается наибольшее количество кварца (57–58%), что характерно для суперсилитов.

К нормосилитам относят породы с величиной ГМ 0,11–0,2. В этот класс входят преимущественно песчаники ($n = 14$) и один алевролит с нормативным содержанием полевых шпатов от 16 (в алевролите) до 33%. Количество глинисто-слюдистой части варьируется от 2 до 25%.

Для миосилитов значения ГМ находятся в диапазоне 0,21–0,3. К миосилитам относятся породы с повышенной долей полевошпатового и/или глинисто-слюдистого материала [*Юдович и Кетрис*, 2000]. Среди исследуемых пород силимкунской свиты как миосилиты аттестуются алевролиты ($n = 8$) и некоторые песчаники ($n = 5$), в которых разница между количеством ПШ и глинисто-слюдистых минералов 1–8% (содержание 15–22% и 12–21% соответственно, согласно нормативному расчету).

По величине щелочного модуля (ЩМ) изучаемые силиты являются гиперкалиевыми (ЩМ, 0,04–0,09, $Na_2O + K_2O$ от 3,5 до 5,7%). По мнению Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис [*Юдович и Кетрис*, 2000], такие образования как щелочные силиты, являются характерным продуктом докембрийского аридного выветривания.

Величина титанового модуля (ТМ, TiO_2 / Al_2O_3) находится в пределах 0,035–0,1 (в среднем 0,07), железного (ЖМ, $(Fe_2O_3 + FeO + MnO) / (TiO_2 + Al_2O_3)$) – от 0,26 до 0,55 (в среднем 0,4). Корреляция титанового и железного модулей отсутствует (рис. 3). Величины модулей для исследуемых пород по хемотипам представлены в табл. 3. Фемический модуль (ФМ, $(Fe_2O_3 + FeO + MnO + MgO) / SiO_2$) для пород не рассчитывался из-за высокого содержания доломита.

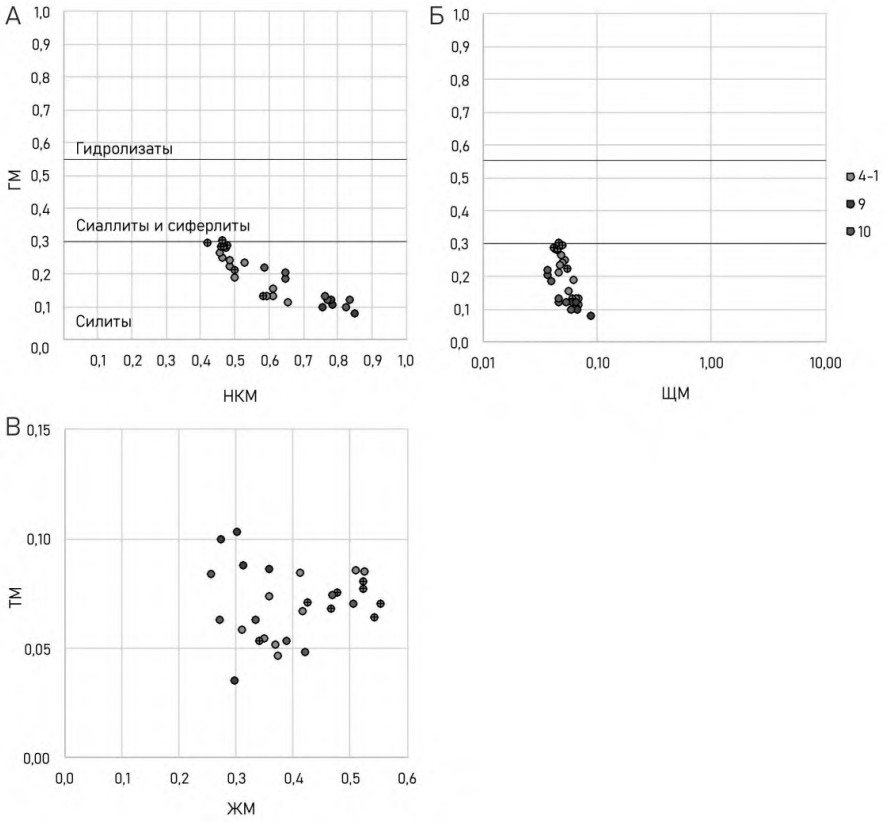

Рис. 3. Модульные диаграммы по [*Юдович и Кетрис*, 2000] для пород силимкунской свиты. Условные обозначения: 4-1 – обнажение в пойме ручья Кильчерис, 9 и 10 – обнажения в верхнем течении р. Кемен, крестом отмечены алевролиты.

Таблица 3. Хемотипы по [*Юдович и Кетрис*, 2000] для песчаников и алевритов силимкунской свиты

Класс	ГМ	ТМ	ЖМ	НКМ	ЩМ
Миосилиты	0,21–0,30	0,06–0,09	0,36–0,55	0,42–0,59	0,04–0,06
Нормосилиты	0,11–0,20	0,05–0,10	0,26–0,47	0,50–0,83	0,04–0,07
Суперсилиты	0,08–0,10	0,04–0,05	0,30–0,39	0,83–0,85	0,06–0,09

Минералогия и диагностика типа выветривания

Изучение выветривания, его типа, характера и динамики, является одним из ключевых инструментов для понимания климатических условий в геологическом прошлом. Химическое выветривание оказывает сильное влияние на углеродный цикл, улавливая атмосферный углерод в виде растворенных продуктов изменения силикатов, переносимых водными потоками в океан. Первичная продукция «запускается» питательными веществами (C, Si, P, N, Ca), которые образуются в результате континентального выветривания [*Lécuyer*, 2016].

До настоящего времени исследователи совершенствуют способы оценки воздействия на породы выветривания, последующего преобразования и вариаций состава пород источника сноса, искажающих палеоклиматические реконструкции. После широкого внедрения в научную практику индекса CIA [*Nesbitt and Young*, 1982], возникла необходимость коррекции этого показателя ввиду влияния на него состава материнских пород (например, [*Lo et al.*, 2017]), эффекта сортировки, диагенеза и метасоматоза [*Fedo et al.*, 1995; *Guo et al.*, 2018]. Также ограничением CIA является то, что он не учитывает роль мафических (оливин, пироксен, амфибол, биотит) и вторичных глинистых минералов (например, смектит, вермикулит, хлорит) в общем составе формируемых терригенных осадочных пород [*Fedo and Babechuk*, 2023].

Логичным следующим шагом стал перевод трендов выветривания в двумерное пространство путем построения тройных диаграмм. Такой тип диаграмм расширил возможности количественного сопоставления данных по терригенным породам, а также позволил сравнивать эмпирические химические тренды с прогнозируемыми для выветривания. С помощью проекции в системе $Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O$ (A–CN–K) по разнице между составом отложений и прогнозируемым трендом выветривания стало возможно выполнить поправку CIA [*Fedo et al.*, 1995].

Важный аспект как CIA, так и тройных диаграмм – влияние наличия кальцита, апатита, биогенного кремнезема и диагенетического кремнёвого цемента в породе. При расчете/построении вышеуказанных индексов необходим некарбонатный CaO^*, который нередко можно оценить только косвенно в богатых карбонатами терригенных породах. Предварительная обработка образцов соляной кислотой для устранения карбонатов несет свои риски – например, растворение некоторых глинистых минералов. Можно выполнить поправку на основе измеренных содержаний CO_2 и P_2O_5. Если данных по CO_2 нет, то вносят приблизительные поправки, приняв рациональные соотношения Ca / Na в силикатном материале [*McLennan*, 1993]. Если после корректировки на P_2O_5 оставшееся количество молей меньше, чем у Na_2O, его принимают за значение CaO^*. В противном случае CaO^* принимается равным Na_2O. Этот подход основан на том, что Ca при выветривании обычно теряется быстрее, чем Na. Наибольшее расхождение с реальным значением CIA (до 3 единиц) будет при его промежуточном значении 60–80, так как при низком CIA этот подход в целом справедлив, а при высоком CIA концентрации Na и Ca низкие, и неопределенности мало влияют на CIA [*McLennan*, 1993]. Это наиболее легко реализуемая поправка, но, тем не менее, несколько влияющая на точность.

Составы пород силимкунской свиты интегрированы в трехмерное тетраэдрическое пространство [*Fedo and Babechuk*, 2023], которое можно разделить на отдельные двумерные грани (рис. 4). Одна из граней позволяет скорректировать CIA в системе A–CN–K. В породах силимкунской свиты не обнаружен кальцит или апатит в значимых количествах, но содержится доломит, поэтому CaO^* корректировался как описано выше [*McLennan*, 1993]. Величина CIA для изучаемых пород силимкунской свиты низкая. Минимальные его значения составляют 49–50 что соответствует практически невыветрелой породе. Например, CIA кислых магматических пород около 50 (для основных пород – менее 40) [*Fedo and Babechuk*, 2023]. Максимальные значения CIA достигают 67 (в среднем 58). Граница преобладания химического выветривания над физическим проводится при значении CIA 70–75 [*Fedo and Babechuk*, 2023]. Характерные для алевролитов силимкунской свиты с высоким ГМ (миосилиты) значения CIA (63–67, в среднем 65) указывают на доминирование физического выветривания во время формирования исходных для них осадков. Но на значения CIA в данном случае повлияло содержание

иллитного цемента и мусковита, демонстрируя более высокие значения индекса, не связанные с изменением выветривания. В рассматриваемом случае, этим не стоит пренебрегать, т.к. диагенетический иллит и обломочные слюды увеличивают значение индекса CIA в отсутствии других глинистых минералов – продуктов разрушения пород непосредственно во время седиментогенеза, искажая первичную картину.

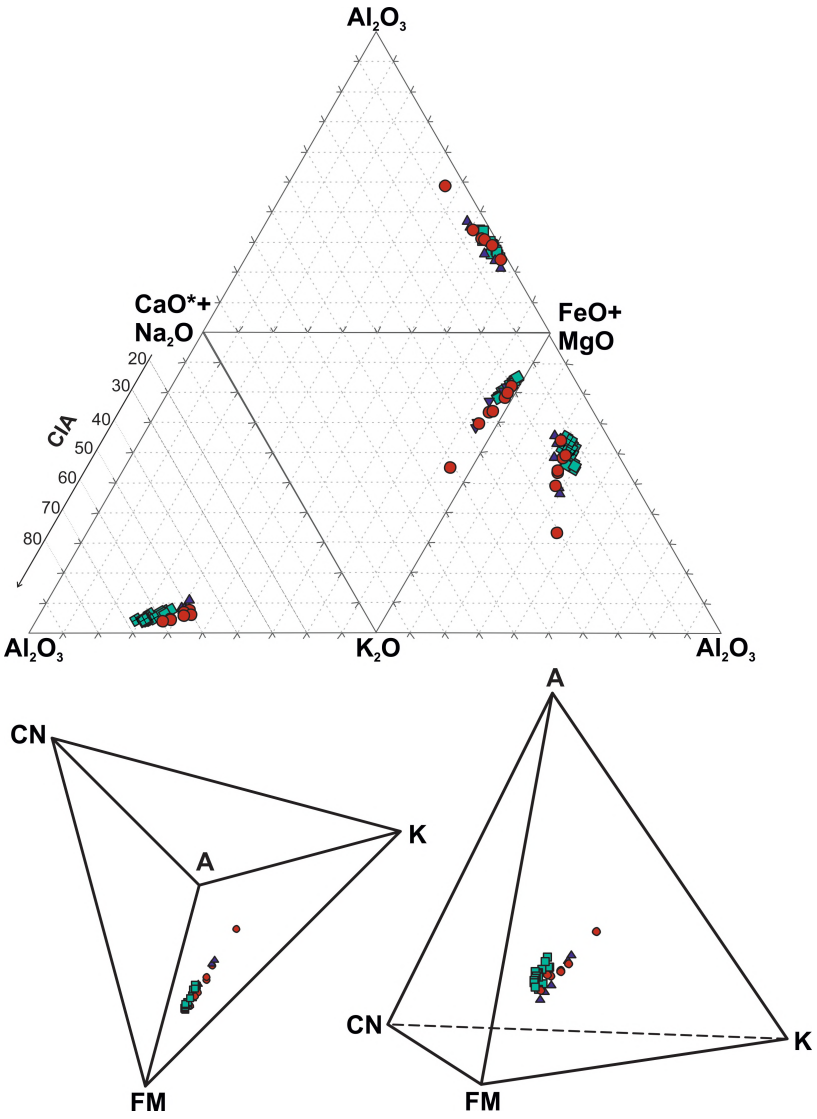

Рис. 4. Положение составов пород силимкунской свиты в композиционном пространстве A–CN–K–FM – развернутом и трехмерном (диаграмма по [*Fedo and Babechuk*, 2023]).

Недавно был предложен [*Cho and Ohta*, 2022] другой вариант для решения проблемы аутигенных и биогенных примесей – индекс RW, который получен с использованием многомерных статистических методов на основе геохимической базы данных магматических пород и профилей их выветривания. По мнению авторов индекса, RW не зависит от содержания SiO_2, CaO и P_2O_5. Визуально индекс RW может быть представлен как в одномерном виде, так и двумерной тройной диаграммой.

Значения RW для пород силимкунской свиты варьируют от 37, что близко к составу невыветрелой породы, до 68 (рис. 5). Для алевролитов, аттестованных как миосилиты, значение RW находятся в диапазоне 62–68. Несмотря на то, что при построении двумерного пространства M–F–RW используется MgO, количество доломита не влияет на значения индекса RW. Также не обнаруживается видимой связи между RW и фактическим содержанием глинисто-гематитового цемента и литокластов.

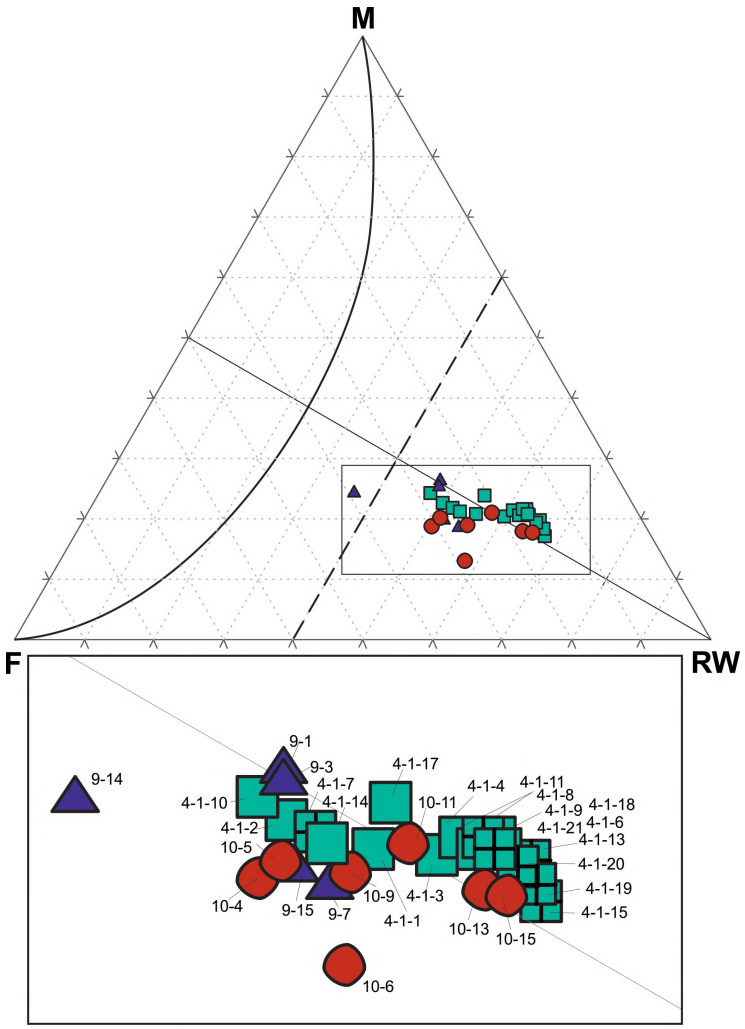

Рис. 5. Тройная диаграмма M-F-RW (Mafic–Felsic–RW, [*Cho and Ohta*, 2022]) и положение на ней точек составов силимкунской свиты.

Авторы публикации [*Cho and Ohta*, 2022] рассчитали RW для почв различных климатических зон. В результате установлено, что в аридных областях и в арктическом климате почвы и коры выветривания имеют низкий RW (в среднем 10–30). В гумидных областях значения RW находятся в диапазоне 70–95. При этом, как и в случае с другими показателями выветривания, нельзя разделить влияние температуры и влажности на выветривание. В случае реконструкций эти значения не стоит принимать как определяющие – RW является относительным параметром.

Выводы

По результатам изучения минерального состава и его вариаций, приняв во внимание вышеописанные нюансы использования нормативного расчета, индексов и литохимических диаграмм, установлены следующие особенности обломочных пород силимкунской свиты (венд-кембрий) Верхне-Каларской грабен-синклинали.

Изученные породы – песчаники и алевролиты, относятся к аркозам и субаркозам. По хемотипу они отвечают преимущественно нормосилитам и миосилитам классификации Я. Э. Юдовича и М. П. Кетрис. По величине щелочного модуля изучаемые силиты являются гиперкалиевыми и служат довольно ярким примером продуктов докембрийского аридного выветривания. Значения индекса CIA для них варьируют от 49, что соответствует практически неизмененной породе, до 67. Незначительные изменения в величине индекса для данной выборки связаны, в первую очередь, с ва-

риациями содержания иллита в цементе и мусковита, демонстрируя более высокие значения индекса, не связанные с изменением выветривания. Значения RW варьируют от 37 до 68 (в среднем около 57).

Полученные результаты для небольшой части разреза силимкунской свиты являются ступенью к диагностике питающих провинций, направления сноса и уточнению истории седиментогенеза в Верхне-Каларской грабен-синклинали юга Сибирского кратона.

Благодарности. Авторы выражают глубокую благодарность анонимным рецензентам за ценные замечания и конструктивные предложения по преобразованию статьи, которые позволили существенно улучшить рукопись. 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 FMMG-2023-0007 и МГУ АААА-А16-116033010119-4 и АААА-А16-116033010120-0.

Список литературы

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. Издание второе. Удоканская серия. O-50-XXXV(Наминга) / под ред. Г. Л. Митрофанова. — ВСЕГЕИ, 2004.

Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000, новая серия, лист O-(50) 51 и объяснительная записка / под ред. Е. П. Миронюка. — СПб : ВСЕГЕИ, 1998. — 428 с.

Дольник Т. А. Строматолиты и микрофитолиты в стратиграфии рифея и венда складчатого обрамления Сибирской платформы. — Новосибирск : Наука, 2000. — 320 с.

Макарьев Л. Б., Митрофанов Г. Л., Митрофанова Н. Н. *и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист O-50 - Бодайбо. Объяснительная записка. — СПб : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2010. — 612 с.

Пахомов Н. Н., Барабашева Е. Е. Новые данные по стратиграфии и фауне венда-нижнего кембрия Верхне-Каларского грабена // Новые данные по биостратиграфии палеозоя и мезозоя юга Дальнего Востока. — Владивосток : ДВО АН СССР, 1990. — С. 24—31.

Петтиджон Ф. Д., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. — Москва : Мир, 1976. — 535 с.

Розен О. М., Аббясов А. А. Количественный минеральный состав осадочных пород: расчет по петрохимическим данным, анализ достоверности результатов (компьютерная программа MINLITH) // Литология и полезные ископаемые. — 2003. — № 3. — С. 299—312.

Розен О. М., Аббясов А. А., Мигдисов А. А. *и др.* Программа MINLITH для расчета минерального состава осадочных пород: достоверность результатов в применении к отложениям древних платформ // Геохимия. — 2000. — № 4. — С. 431—444.

Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. — СПб : Наука, 2000. — 479 с.

Babechuk M. G., Fedo C. M. Analysis of chemical weathering trends across three compositional dimensions: applications to modern and ancient mafic-rock weathering profiles // Canadian Journal of Earth Sciences. — 2023. — Vol. 60, no. 7. — P. 839–864. — DOI: 10.1139/cjes-2022-0053.

Cho T., Ohta T. A robust chemical weathering index for sediments containing authigenic and biogenic materials // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. — 2022. — Vol. 608. — P. 111288. — DOI: 10.1016/j.palaeo.2022.111288.

Fedo C. M., Babechuk M. G. Petrogenesis of siliciclastic sediments and sedimentary rocks explored in three-dimensional Al2O3-CaO*+Na2O-K2O-FeO+MgO (A-CN-K-FM) compositional space // Canadian Journal of Earth Sciences. — 2023. — Vol. 60, no. 7. — P. 818–838. — DOI: 10.1139/cjes-2022-0051.

Fedo C. M., Wayne Nesbitt H., Young G. M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance // Geology. — 1995. — Vol. 23, no. 10. — P. 921. — DOI: 10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2.

Guo Y., Yang S., Su N., *et al.* Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 2018. — Vol. 227. — P. 48–63. — DOI: 10.1016/j.gca.2018.02.015.

Lécuyer C. Seawater residence times of some elements of geochemical interest and the salinity of the oceans // Bulletin de la Société Géologique de France. — 2016. — Vol. 187, no. 6. — P. 245–260. — DOI: 10.2113/gssgfbull.187.6.245.

Lo F.-L., Chen H.-F., Fang J.-N. Discussion of Suitable Chemical Weathering Proxies in Sediments by Comparing the Dissolution Rates of Minerals in Different Rocks // The Journal of Geology. — 2017. — Vol. 125, no. 1. — P. 83–99. — DOI: 10.1086/689184.

McLennan S. M. Weathering and Global Denudation // The Journal of Geology. — 1993. — Vol. 101, no. 2. — P. 295–303. — DOI: 10.1086/648222.

Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. — 1982. — Vol. 299, no. 5885. — P. 715–717. — DOI: 10.1038/299715a0.

Regelink J. A. Mincomp-a program to calculate a likely mineralogical bulk composition from XRD and XRF results. Research Minor TA-MI-077. — Delft University of Technology, 2014.

Rosen O. M., Abbyasov A. A., Tipper J. C. MINLITH-an experience-based algorithm for estimating the likely mineralogical compositions of sedimentary rocks from bulk chemical analyses // Computers & Geosciences. — 2004. — Vol. 30, no. 6. — P. 647–661. — DOI: 10.1016/j.cageo.2004.03.011.

Russian Journal of Earth Sciences

Vendian-Cambrian Rocks of the Upper Kalar Graben-Syncline of the Southern Part of Siberian Craton: Mineralogy and Major Elements Geochemistry

S. I. Merenkova[1,*], T. G. Kuzmina[2], E. V. Karpova[3], R. R. Gabdullin[2,3], V. Yu. Vodovozov[3,4], T. V. Romashova[2], and I. V. Khokhlova[2]

[1]Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow, Russia
[2]Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry RAS, Moscow, Russia
[3]Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[4]Geological Institute RAS, Moscow, Russia
**Correspondence to: Sofia I. Merenkova, koshelevasof@mail.ru.

The features of the mineral and chemical composition (major elements) of the Vendian-Cambrian rocks of the Silimkun Formation (V-$Є_{1sl}$), exposed on the western side of the Upper Kalar graben syncline in the southwest of the Aldan shield, are considered. The studied rocks – sandstones and siltstones, belong to arkoses and subarkoses. According to their chemotype, they correspond normosilites and myosilites. In terms of the alkaline modulus, the studied silites are hyperpotassium and serve as a fairly striking example of the products of Precambrian arid weathering. The standard mineral composition, its variations, the validity of calculations based on petrographic research data, the problems of using climate indices and lithochemical diagrams aimed at reconstructing climatic changes in the geological past are discussed. Chemical Index of Alteration (CIA) index values range from 49, which corresponds to a virtually unchanged rock, to 67. The average is about 58. Minor changes in the index value for this sample are associated primarily with variations in the content of illite cement and muscovite. Robust Weathering index (RW) values range from 37 to 68 (with an average of about 57).

Keywords: Ediacaran, Cambrian, Udokan region, climate, chemical weathering proxies.

Recieved: 16 February 2024
Accepted: 15 July 2024
Published: 20 Novenber 2024

© 2024. The Authors.

Citation: Merenkova, S. I., T. G. Kuzmina, E. V. Karpova, R. R. Gabdullin, V. Yu. Vodovozov, T. V. Romashova, and I. V. Khokhlova (2024), Vendian-Cambrian Rocks of the Upper Kalar Graben-Syncline of the Southern Part of Siberian Craton: Mineralogy and Major Elements Geochemistry, *Russian Journal of Earth Sciences*, 24, ES4009, https://doi.org/10.2205/2024ES000923, EDN: DNFGSX

References

Babechuk M. G., Fedo C. M. Analysis of chemical weathering trends across three compositional dimensions: applications to modern and ancient mafic-rock weathering profiles // Canadian Journal of Earth Sciences. — 2023. — Vol. 60, no. 7. — P. 839–864. — DOI: 10.1139/cjes-2022-0053.

Cho T., Ohta T. A robust chemical weathering index for sediments containing authigenic and biogenic materials // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. — 2022. — Vol. 608. — P. 111288. — DOI: 10.1016/j.palaeo.2022.111288.

Dolnik T. A. Stromatolites and microphytolites in the stratigraphy of the Riphean and Vendian folded frame of the Siberian platform. — Novosibirsk : Nauka, 2000. — P. 320.

Fedo C. M., Babechuk M. G. Petrogenesis of siliciclastic sediments and sedimentary rocks explored in three-dimensional Al2O3-CaO*+Na2O-K2O-FeO+MgO (A-CN-K-FM) compositional space // Canadian Journal of Earth Sciences. — 2023. — Vol. 60, no. 7. — P. 818–838. — DOI: 10.1139/cjes-2022-0051.

Fedo C. M., Wayne Nesbitt H., Young G. M. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance // Geology. — 1995. — Vol. 23, no. 10. — P. 921. — DOI: 10.1130/0091-7613(1995)023<0921:UTEOPM>2.3.CO;2.

Guo Y., Yang S., Su N., *et al.* Revisiting the effects of hydrodynamic sorting and sedimentary recycling on chemical weathering indices // Geochimica et Cosmochimica Acta. — 2018. — Vol. 227. — P. 48–63. — DOI: 10.1016/j.gca.2018.02.015.

Lécuyer C. Seawater residence times of some elements of geochemical interest and the salinity of the oceans // Bulletin de la Société Géologique de France. — 2016. — Vol. 187, no. 6. — P. 245–260. — DOI: 10.2113/gssgfbull.187.6.245.

Lo F.-L., Chen H.-F., Fang J.-N. Discussion of Suitable Chemical Weathering Proxies in Sediments by Comparing the Dissolution Rates of Minerals in Different Rocks // The Journal of Geology. — 2017. — Vol. 125, no. 1. — P. 83–99. — DOI: 10.1086/689184.

Makaryev L. B., Mitrofanov G. L., Mitrofanova N. N., *et al.* State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000 (third generation). Aldan-Zabaykalskaya Series. Sheet O-50 - Bodaibo. Explanatory Note. — St. Petersburg : VSEGEI Cartographic Factory, 2010. — P. 612.

McLennan S. M. Weathering and Global Denudation // The Journal of Geology. — 1993. — Vol. 101, no. 2. — P. 295–303. — DOI: 10.1086/648222.

Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. — 1982. — Vol. 299, no. 5885. — P. 715–717. — DOI: 10.1038/299715a0.

Pakhomov N. N., Barabasheva E. E. New data on the stratigraphy and fauna of Vend-Lower Cambrian deposits of Upper-Kalar Graben // New data on palaeozoic and mesozoic biostratigraphy of the south Far East. — Vladivostok : Far Eastern Branch of the USSR AS, 1990. — P. 24–31.

Pettyjohn F. J., Potter P., Seaver R. Sands and Sandstones. — Moscow : World, 1976. — P. 535.

Regelink J. A. Mincomp-a program to calculate a likely mineralogical bulk composition from XRD and XRF results. Research Minor TA-MI-077. — Delft University of Technology, 2014.

Rosen O. M., Abbyasov A. A. The Quantitative Mineral Composition of Sedimentary Rocks: Calculation from Chemical Analyses and Assessment of Adequacy (MINLITH Computer Program) // Litologiya i Poleznye Iskopaemye. — 2003. — No. 3. — P. 299–312.

Rosen O. M., Abbyasov A. A., Migdisov A. A., *et al.* MINLITH - a program to calculate the normative mineralogy of sedimentary rocks: the reliability of results obtained for deposits of old platforms // Geochemistry International. — 2000. — Vol. 38, no. 4. — P. 388–400.

Rosen O. M., Abbyasov A. A., Tipper J. C. MINLITH-an experience-based algorithm for estimating the likely mineralogical compositions of sedimentary rocks from bulk chemical analyses // Computers & Geosciences. — 2004. — Vol. 30, no. 6. — P. 647–661. — DOI: 10.1016/j.cageo.2004.03.011.

State Geological map of the Russian Federation scale 1:200000. Second edition. Udokan series. O-50-XXXV(Naminga) / ed. by G. L. Mitrofanova. — VSEGEI, 2004.

State Geological Map of the Russian Federation, scale 1:1,000,000, new series, sheet O-(50) 51 and explanatory note / ed. by E. P. Mironyuk. — St. Petersburg. : VSEGEI, 1998. — P. 428.

Yudovich Y. E., Ketris M. P. Fundamentals of Lithochemistry. — St. Petersburg : Science, 2000. — P. 479.