

УДК 551.83

doi: 10.55959/MSU0579-9406-4-2023-63-4-20-30

ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ПАЛЕОКЛИМАТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ВЕРХОЛЕНСКОЙ СЕРИИ

**Софья Ивановна Меренкова¹✉, Игорь Валентинович Коровников²,
Руслан Рустемович Габдуллин³**

¹ Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; koshelevasof@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3204-4393>

² Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия; korovnikoviv@ipgg.sbras.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; Gabdullin@fgp.msu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8296-7191>

Аннотация. Верхоленская серия ($\mathbb{E}_{2-3}vl$) изучена в разрезе правого берега р. Малая Чуя. Определены концентрации главных оксидов и некоторых микроэлементов (Cr, V, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Zr, Ba, U, Th, Y, Nb, Cl) в пробах методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (XRF). На основе результатов рентгеноспектрального флуоресцентного анализа выполнен расчет нормативного минерального состава с применением программы MINLITH. В разрезе по геохимическим данным отчетливо выделяются интервалы изменения характера выветривания (физическое/химическое) в области денудации, фиксируемые по вариациям величин отношений $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$, $\text{Ln}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$, содержаний V, Cu, Zn, Rb, Ni, нормативного минерального состава. Cr, по-видимому, в данном случае поступал в бассейн исключительно эоловым путем и маркирует периоды усиления ветрового переноса. В условиях тектонической активизации и прогрессирующей изоляции Верхоленского бассейна вблизи изотопного события SPICE, рассмотренные литолого-геохимические особенности дают информацию о сопутствующих этим событиям климатических изменениях.

Ключевые слова: палеоклимат, кембрий, геохимические индикаторы, Сибирская платформа

Для цитирования: Меренкова С.И., Коровников И.В., Габдуллин Р.Р. Литолого-геохимические особенности и палеоклиматические условия формирования пород верхоленской серии // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2023. № 4. С. 20–30.

GEOCHEMICAL FEATURES AND PALEOCLIMATIC CONDITIONS FOR THE FORMATION OF THE VERTHNYAYA LENA FORMATION (THE SOUTHEAST OF THE SIBERIAN PLATFORM)

Sofia I. Merenkova¹✉, Igor V. Korovnikov², Ruslan R. Gabdullin³

¹ Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; koshelevasof@mail.ru✉

² Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia; korovnikoviv@ipgg.sbras.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; Gabdullin@fgp.msu.ru

Abstract. Verkhnyaya Lena formation ($\mathbb{E}_{2-3}vl$) was studied in the section on the right bank of the Malaya Chuya River. The concentrations of main oxides and some trace elements (Cr, V, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Zr, Ba, U, Th, Y, Nb, Cl) were determined in the samples using X-ray spectral fluorescence analysis (XRF). Based on the results of XRF, the standard mineral composition was calculated using the MINLITH. Geochemical data clearly distinguishes intervals of changing weathering characteristics (physical/chemical, arid/humid) in the denudation area, which are fixed by variations in the values of the $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ ratios, $\text{Ln}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$, contents of V, Cu, Zn, Rb, and Ni, as well as normative mineral composition. Cr, apparently, was transported exclusively by the aeolian process and marks periods of increased wind transport intensity. Under the conditions of tectonic activation and progressive isolation of the paleobasin, the lithological and geochemical features considered provide some information about the climatic changes that accompanied these events.

Keywords: paleoclimate, Cambrian, geochemical proxies, Siberian Platform

For citation: Merenkova S.I., Korovnikov I.V., Gabdullin R.R. Geochemical features and paleoclimatic conditions for the formation of the Verkhnyaya Lena formation (the southeast of the Siberian Platform). *Moscow University Geol. Bull.* 2023; 4: 20–30. (In Russ.).

Введение. Изучение фундаментальной проблемы глобальных климатических изменений — как современных, так и в геологическом прошлом — представляется актуальной задачей современной науки. В рамках комплексных исследований динамики палеосреды сведение данных и проверка гипотез о взаимодействии между тектоническими перестройками, климатическими, океанологическими изменениями и развитием жизни требует наличия достаточного количества информации о каждом из этих факторов. Наиболее широко используемым показателем палеоклимата является палеотермометрия на основе изотопного состава кислорода карбонатов. Для раннего палеозоя этот метод имеет существенные ограничения, включающие как неполноту знаний о составе древней морской воды, так и сильное влияние на изотопное отношение постседиментационных преобразований, например, [Hearing et al., 2018, Goldberg et al., 2021]. Помимо этого важно учесть, что температура вод палеобассейнов не всегда является функцией климата (т. е. отражением интенсивности суммарной солнечной радиации) и изучение «ландшафтов» моря неизбежно перерастает в изучение природных свойств водной массы [Солнцев, 2001].

Палеогеосистемы в переходной зоне суши и морского бассейна (субаэральные и аквальные палеогеосистемы) являются более чувствительными к изменениям, т.к. сокращено время отклика седиментационных систем на палеоклиматические особенности среды и их вариации. Это делает перспективным изучение отложений, формировавшихся в лагунно-себковых условиях. Для решения задачи косвенной оценки климатических вариаций в среднем-позднем кембрии через процессы выветривания были проведены геохимические исследования пород верхоленской серии.

Краткая геологическая характеристика и материалы исследования. Породы, сформировавшиеся в Верхоленском бассейне (E_{2-3}), занимают значительную площадь на юго-западе Сибирской платформы. Стратиграфическое положение верхоленской серии остается дискуссионным: часть исследователей [Карасев и др., 1966] относит ее к верхнекембрийским отложениям, другие — к среднему кембрию [Королюк, Писарчик, 1965], М.А. Жарков [1966] связывал верхоленскую серию с майским ярусом, в более поздних работах [напр., Стратиграфия..., 2016] серия сопоставляется с майским и амгинским ярусами (захватывая верхнюю часть тойонского). В «Региональной стратиграфической схеме кембрийских отложений Сибирской платформы» [2021] верхоленская серия имеет интервал распространения майский, аюсокканский, сакский и аксайский ярусы (средний — частично верхний кембрий).

Верхоленская серия изучена в разрезе на правом берегу реки Малая Чуя, в 7 км вверх по течению от ее слияния с рекой Большая Чуя (рис. 1). В обнажении вскрывается верхняя часть верхоленской серии,

илгинская свита и нижняя часть устькутской свиты. В стратиграфической последовательности были опробованы 84,5 м разреза верхоленской серии. В изученном обнажении серия сложена доломитовыми мергелями, глинистыми алевролитами, красными, коричневато-красными с маломощными прослоями зеленовато-серых алевролитов. На поверхностях напластования зеленовато-серых алевролитов наблюдаются знаки ряби. Верхняя часть видимого интервала верхоленской серии представлена плитчатыми аргиллитами красного и коричневато-красного цвета с прослоями зеленовато-серых алевролитов. Видимая мощность 115 м.

Ранее в разрезе на р. Малая Чуя исследователями [Буякайте и др., 2019] установлен экскурс $\delta^{13}\text{C}$ (рис. 1) в верхней части верхоленской серии, который, возможно, соответствует изотопному событию SPICE (Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion), а также, в кровле согласно перекрывающей ее илгинской свиты, отрицательный экскурс, вероятно соответствующий событию TOCE (Top of Cambrian carbone-isotope Excursion).

Методы. В общей сложности в данном исследовании задействовано 35 образцов пород верхоленской серии. Определение концентрации главных оксидов и некоторых микроэлементов (Cr, V, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Zr, Ba, U, Th, Y, Nb, Pb, As, Cl, Mo) в пробах выполнено методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (XRF) на вакуумном спектрометре последовательного действия (с дисперсией по длине волны), модель Axios mAX производства компании PANalytical (Нидерланды). Анализ выполнен в ЦКП ИГЕМ РАН (исполнитель — н.с. А.И. Якушев).

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

Ввиду высокой карбонатности изучаемых пород, такой часто используемый показатель оценки степени химического выветривания и климатических изменений как CIA, может приводить к ошибочным выводам [von Eynatten et al., 2003; Montero-Serrano et al., 2015]. При преобладании химического выветривания возрастает вымывание щелочей (Na^+ , K^+) и Ca^{+2} , концентрация Al и Si в продуктах выветривания, и наоборот — в среде, в которой преобладает физическое выветривание, химическое изменение полевых шпатов с образованием глинистых минералов незначительно [Nesbitt, Young, 1982]. Статисти-

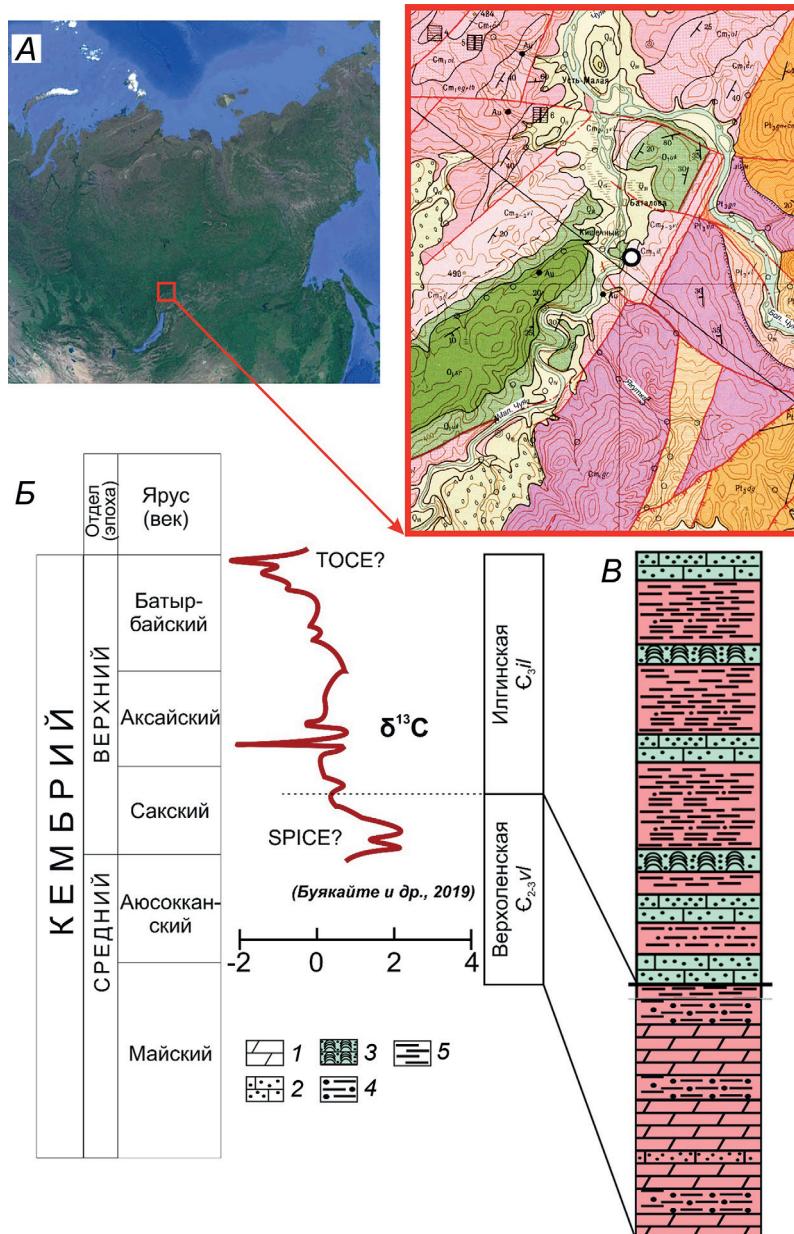


Рис. 1. Положение исследуемого разреза верхоленской серии (переходные отложения от верхнего кембрия к ордовику на правом берегу р. Малая Чуя). А — местоположение разреза в региональном плане. Б — стратиграфическое положение. В — строение разреза. Вариации изотопного состава углерода в карбонатах верхоленской и илгинской свит в разрезе р. Малая Чуя по [Буякайте и др., 2019]. 1 — доломитовый мергель, 2 — известковый песчаник, 3 — строматолитовые биогермы, 4 — алевролит, 5 — аргиллит

ческое сравнение $\text{Ln}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ и CIA показало, что $\text{Ln}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ может более точно отражать тенденцию выветривания, т.к. позволяет избежать неопределенностей, связанных с поправкой на CaO из фосфатной и карбонатной фаз [von Eynatten et al., 2003]. Поэтому в данном исследовании используются отношения $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ (масс.%) и $\text{Ln}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ (молярные). Рост величин свидетельствует об относительном потеплении и гумидизации, падение — о снижении температур и аридизации (преобладание химического или физического выветривания в области денудации соответственно).

Результаты. Содержание главных петрогенных оксидов и микроэлементов приведены в табл. 1 и 2. Для пород верхоленской серии характерен разброс концентраций Al_2O_3 (от 3,3 до 11,6%, в среднем 6,7%) и CaO (от 10,0 до 30,9%, в среднем 23,6%), средние содержания Na_2O , MgO , SiO_2 , K_2O , TiO_2 , MnO , Fe_2O_3 общ., P_2O_5 составляют 0,64, 3,43, 39,23, 1,83, 0,38, 0,11,

2,62 и 0,11 масс. % соответственно. Проба Ch032 содержит 1,9% минерала барит (BaSO_4).

За основу при определении обогащения/обеднения элементами взяты кларки по Н.А. Григорьеву [2009]. Изменения по разрезу нормализованных на стандарт для карбонатных пород содержаний отдельных элементов приведены на рис. 2. Для всех проанализированных пород характерно обогащение Cr (до 11 раз), V, Ni, Cu, Zn, Rb. Отдельные образцы обогащены Ba (до 26 раз) из-за присутствия барита, Ba коррелирует только с $S_{\text{общ}}$ (коэффициент 0,98, аналогичная корреляционная связь $S_{\text{общ}}$ только с барием). Содержания Sr значительно ниже кларковых, обнаруживается только слабая обратная корреляционная связь с характерными для терригенной части оксидами (Al_2O_3 , K_2O , TiO_2 , Fe_2O_3) и элементами. Концентрации U, Th, Mo составляют менее 5 ppm, Pb и As — менее 10 ppm, что ниже предела обнаружения методом.

Таблица 1

Содержание главных оксидов (масс %)

Образец	Точка отбора (от подошвы), м	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃ общ.	P ₂ O ₅	S _{общ.}	ППП
Ch005	0,95	33,87	4,50	0,78	3,55	1,26	29,22	0,31	0,145	1,36	0,13	0,02	24,73
Ch006	1,25	34,72	4,99	0,73	3,81	1,35	27,85	0,34	0,137	1,65	0,13	0,02	24,15
Ch010	2,80	39,67	6,95	0,68	3,71	1,85	22,12	0,42	0,115	2,91	0,12	<0.01	21,25
Ch012	4,45	39,71	6,99	0,79	4,01	1,80	22,10	0,39	0,108	2,53	0,11	0,02	21,19
Ch013	5,65	37,13	5,94	0,79	3,34	1,54	25,50	0,39	0,119	2,03	0,13	0,01	22,89
Ch015	6,50	35,74	5,69	0,79	3,67	1,46	26,14	0,37	0,122	1,89	0,12	0,01	23,83
Ch020	9,10	49,05	11,62	0,58	5,05	3,14	10,00	0,55	0,084	5,97	0,11	<0.01	13,64
Ch024	11,95	44,57	9,02	0,64	4,44	2,42	16,71	0,44	0,104	3,95	0,11	<0.01	17,41
Ch025	12,95	41,91	7,19	0,88	4,22	1,86	20,46	0,39	0,105	2,47	0,11	<0.01	20,25
Ch026	13,45	41,24	6,71	0,90	4,11	1,76	21,41	0,37	0,107	2,43	0,11	0,02	20,50
Ch032	16,55	40,32	7,50	0,64	5,67	1,98	17,75	0,41	0,139	3,09	0,11	0,36	20,35
Ch036	19,05	36,42	6,55	0,57	4,04	1,74	24,26	0,36	0,128	2,50	0,10	0,03	23,14
Ch040	21,00	42,29	6,60	0,90	4,16	1,82	21,01	0,41	0,113	2,22	0,13	<0.01	20,16
Ch041	21,40	37,97	5,86	0,70	3,15	1,55	25,58	0,40	0,116	1,98	0,12	0,01	22,38
Ch042	21,80	35,72	5,83	0,55	2,78	1,53	27,42	0,43	0,109	2,10	0,13	0,01	23,16
Ch043	23,60	44,83	9,45	0,61	5,26	2,33	14,48	0,51	0,092	4,49	0,12	0,01	17,64
Ch050	28,05	40,26	6,05	0,40	2,29	1,78	25,20	0,30	0,085	2,54	0,08	0,01	20,78
Ch054	31,55	38,48	5,38	0,60	2,20	1,59	27,25	0,31	0,094	2,03	0,10	0,01	21,77
Ch060	35,65	42,47	7,82	0,74	4,62	2,10	18,93	0,43	0,103	2,98	0,11	<0.01	19,47
Ch061	36,15	35,09	4,05	0,29	2,01	1,25	30,90	0,21	0,104	2,06	0,07	0,02	23,80
Ch070	42,45	42,74	8,15	0,58	4,48	2,19	18,66	0,44	0,104	3,57	0,11	<0.01	18,81
Ch075	46,75	42,86	7,28	0,77	4,35	1,97	19,24	0,42	0,103	2,93	0,11	0,02	19,71
Ch076	47,55	48,22	3,93	0,28	1,67	1,21	24,07	0,19	0,082	1,84	0,06	0,03	18,17
Ch079	50,45	40,85	3,34	0,37	1,20	1,08	29,97	0,18	0,097	1,26	0,06	0,01	21,42
Ch083	53,05	34,81	5,12	0,73	2,89	1,45	29,01	0,34	0,121	1,68	0,12	0,02	23,54
Ch084	53,55	40,95	7,28	0,75	3,00	2,12	22,64	0,39	0,098	2,92	0,11	<0.01	19,56
Ch086	55,05	38,08	6,18	0,75	2,03	1,87	26,49	0,38	0,105	2,52	0,12	0,01	21,33
Ch089	58,05	39,60	5,76	0,82	2,10	1,77	26,10	0,41	0,101	2,10	0,15	<0.01	20,91
Ch091	58,95	44,23	9,29	0,68	4,75	2,60	16,20	0,47	0,102	3,95	0,11	0,01	17,41
Ch096	64,15	43,88	9,02	0,69	4,43	2,54	17,36	0,47	0,097	3,59	0,12	<0.01	17,61
Ch111	73,05	42,64	6,35	0,80	3,03	1,87	22,99	0,36	0,105	2,15	0,11	<0.01	19,44
Ch120	78,40	31,67	7,72	0,33	2,44	2,06	27,61	0,37	0,099	3,19	0,09	0,03	24,25
Ch122	80,40	30,07	7,36	0,28	2,47	1,97	28,99	0,37	0,113	2,96	0,09	0,03	25,18
Ch125	81,80	33,79	4,75	0,63	2,76	1,55	30,58	0,29	0,142	1,42	0,10	0,02	23,81
Ch128	84,30	27,35	6,84	0,28	2,19	1,82	31,14	0,35	0,132	2,48	0,09	0,05	27,19

Таблица 2

Содержание элементов (ppm) в породах верхоленской серии

Образец	Cr	V	Ni	Cu	Zn	Rb	Sr	Ba	Cl	Y	Nb	Zr
Ch005	116	46	32	24	35	25	192	158	276	22	7	71
Ch006	119	48	33	19	40	28	177	184	215	22	8	86
Ch010	143	65	57	27	55	43	193	249	389	26	9	85
Ch012	154	66	50	23	52	40	225	783	238	21	9	94
Ch013	129	57	44	24	53	33	216	193	489	23	7	73
Ch015	138	49	42	26	46	32	208	208	265	24	7	82
Ch020	176	109	76	30	76	71	136	300	268	26	9	136
Ch024	197	81	61	27	59	53	149	282	229	20	9	122
Ch025	112	63	52	26	52	41	173	233	255	21	8	79
Ch026	131	57	44	24	48	38	188	587	1168	20	8	75
Ch032	142	83	53	32	49	42	204	9358	192	21	8	99
Ch036	146	63	43	26	48	37	168	351	396	19	7	87
Ch040	154	51	47	23	48	36	175	220	319	24	7	100
Ch041	160	61	45	25	48	35	188	221	362	22	8	98
Ch042	228	66	44	23	49	35	191	217	427	24	9	229
Ch043	130	87	63	31	72	58	132	282	338	26	9	113
Ch050	184	59	39	27	44	38	241	232	496	19	7	66
Ch054	175	46	36	26	38	33	235	201	413	19	7	88
Ch060	146	73	51	27	56	47	166	236	523	23	8	103
Ch061	183	36	29	23	35	28	242	157	349	18	4	54
Ch070	172	74	54	32	57	48	163	232	287	22	8	117
Ch075	136	66	50	24	54	42	163	555	500	21	9	94
Ch076	220	47	29	20	32	29	172	901	331	14	5	65
Ch079	164	34	28	22	31	26	225	210	286	15	5	41
Ch083	132	51	38	22	43	30	219	174	512	20	7	70
Ch084	122	61	56	28	54	45	183	252	279	20	7	67
Ch086	110	53	47	27	55	37	180	213	253	19	9	69
Ch089	136	49	41	21	46	31	187	196	360	23	9	89
Ch091	152	83	61	26	61	56	171	319	235	21	9	115
Ch096	136	69	59	30	59	52	196	252	286	25	9	120
Ch111	132	50	42	24	47	37	187	230	204	21	7	75
Ch120	104	58	59	29	55	47	148	212	306	17	8	70
Ch122	98	63	54	27	54	47	142	183	155	18	9	67
Ch125	119	52	34	22	36	28	192	197	367	19	6	74
Ch128	83	57	50	31	52	43	139	174	137	16	7	62

Обсуждение. Нормативный минеральный состав и формы нахождения элементов. Вариации минерального состава, пересчитанного по методу О.М. Розена представлены на рис. 3 и табл. 3. Вариации карбонатной и терригенной составляющих в изучаемом разрезе носят колебательный, близкий к ритмичному характер, что хорошо видно на рис. 2. Такие изменения вещественного состава нашли отражение в содержаниях V, Ni, Cu, Zn и Rb — их

Таблица 3

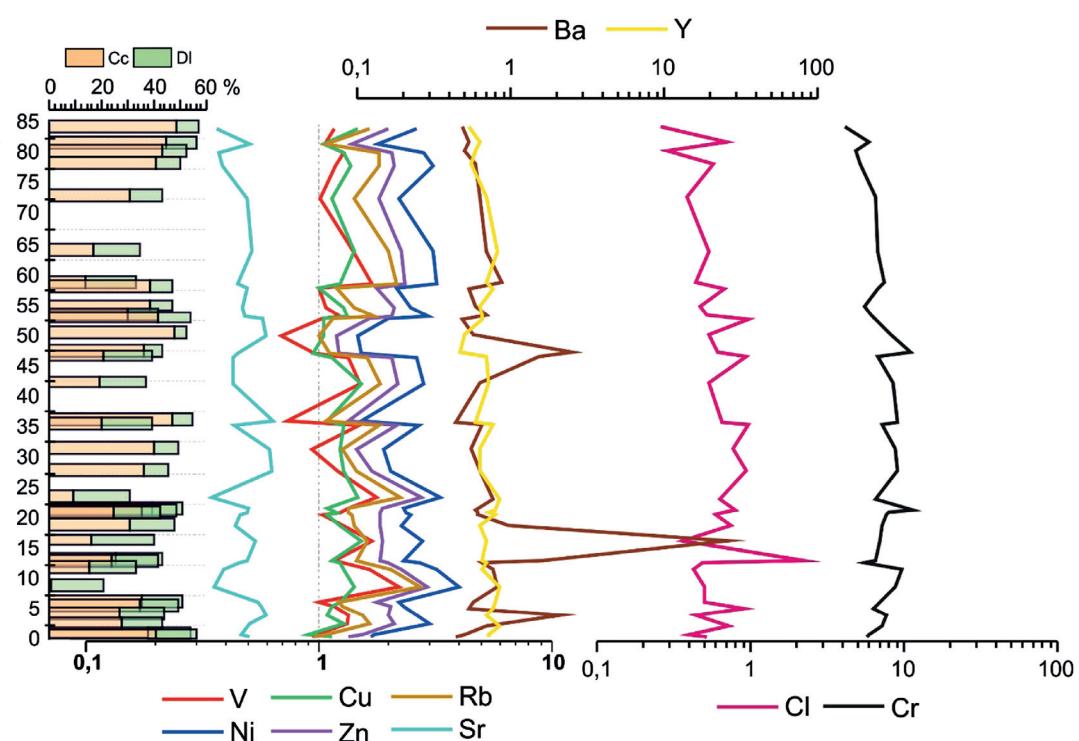
Нормативно-минеральный состав пород верхоленской серии

Образец	Ab	Pl	Or	Q	Ill	Cc	Dl	Ank
Ch128	2,4	2,6	0,3	16,3	18,9	48,4	8,2	4,5
Ch125	5,2	5,7	4,6	22,2	7,8	44,7	11,5	2,8
Ch122	2,3	2,6	0,3	18,1	20,2	43,1	9,3	5,6
Ch120	2,8	3,1	0,4	19,0	21,0	40,5	9,1	6,2
Ch111	6,6	7,3	4,3	28,4	11,8	30,7	12,4	4,4
Ch096	5,7	6,3	3,0	26,7	21,1	16,8	17,9	7,3
Ch091	5,6	6,2	2,9	26,9	22,1	13,7	19,3	8,1
Ch089	6,8	7,5	4,9	25,9	9,5	38,2	8,5	4,5
Ch086	6,2	6,9	4,5	24,3	11,5	38,8	8,0	5,4
Ch084	6,2	6,9	3,9	25,7	15,0	29,6	12,0	6,1
Ch083	6,0	6,7	3,4	23,0	9,0	41,8	12,0	3,4
Ch079	3,0	3,3	2,8	32,4	6,1	47,5	4,7	2,6
Ch076	2,3	2,5	2,1	39,6	8,8	36,1	6,6	3,8
Ch075	6,5	7,1	2,8	28,3	15,8	20,8	18,3	6,1
Ch070	4,8	5,3	1,7	27,8	19,9	18,9	18,3	7,3
Ch061	2,4	2,6	2,2	26,5	9,0	46,7	8,1	4,4
Ch060	6,2	6,8	2,5	27,3	17,7	19,6	19,2	6,1
Ch054	5,0	5,5	3,3	26,7	10,6	40,2	8,8	4,2
Ch050	3,3	3,7	2,4	28,6	14,3	36,4	8,9	5,1
Ch043	5,1	5,6	0,0	28,8	24,6	9,2	21,4	9,2
Ch042	4,6	5,0	1,5	24,4	13,3	39,5	11,3	4,1
Ch041	5,8	6,5	2,3	25,8	12,1	35,5	13,1	3,9
Ch040	7,5	8,3	3,8	27,8	12,4	24,7	17,6	4,6
Ch036	4,8	5,3	1,7	24,1	15,4	31,0	16,9	4,9
Ch032	5,5	6,1	1,8	26,9	18,1	15,8	24,5	5,3
Ch026	7,5	8,3	3,0	27,0	13,1	25,4	17,4	5,0
Ch025	7,4	8,1	2,6	27,2	14,9	23,6	17,7	5,0
Ch024	5,3	5,9	1,8	28,1	22,1	15,3	17,9	8,1
Ch020	4,8	5,3	1,4	29,1	30,4	0,5	19,9	12,6
Ch015	6,6	7,3	2,4	23,6	11,1	35,3	15,6	3,8
Ch013	6,6	7,3	2,5	24,6	11,8	34,9	14,0	4,1
Ch012	6,6	7,3	2,2	25,8	15,1	27,0	16,7	5,1
Ch010	5,7	6,3	2,2	26,2	15,7	27,4	15,3	6,1
Ch006	6,0	6,7	2,9	23,4	9,0	37,7	16,2	3,3
Ch005	6,4	7,1	3,5	22,8	6,9	40,8	15,2	2,8

Примечание. Q — кварц, минералы кремнезема, Pl — плагиоклаз, Or — ортоклаз, Ill — иллит, Cc — кальцит, Dl — доломит, Ank — анкерит, Fsp — полевые шпаты (плагиоклаз+ортоклаз), Pel — глинистые компоненты (монтмориллонит + иллит + хлорит + каолинит).

концентрации находятся в прямой зависимости от количества терригенной части и коррелируют с содержанием Al_2O_3 и глинистой части (рис. 4). Для дальнейшей интерпретации значения этих элементов были нормализованы на Al (рис. 5).

Рис. 2. Элементный состав, нормированный на стандарт, сопоставленный с содержанием карбонатов — кальциита и доломита по разрезу



Палеоклимат. Н.М. Страховым [1962] верхоленская формация отнесена к типу лагунных. В лагунно-себковых условиях палеобассейн периодически распадался на отдельные более мелкие водоемы, где большую роль наряду с морской водой играл сток вод с суши, вносящий массы мелкого обломочного материала с горных обрамлений Иркутского амфитеатра [Жарков, 1965, Иванов, Воронова, 1972]. Позднее, на основании данных по изотопному составу серы в сульфатах [Писарчик, Голубчина, 1979], а также пониженным по сравнению с одновозрастными отложениями других районов отношению $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в сульфатах и карбонатах [Виноградов и др., 2011] был подтвержден вывод о полной и быстрой изоляции Верхоленского бассейна. Изотопный состав стронция, определенный в карбонатах разреза р. Малая Чуя [Буякайте и др., 2019], подтверждает изоляцию палеобассейна: минимальные отношения $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ закономерно увеличиваются в рассматриваемом разрезе снизу-вверх, оставаясь ниже «океанских» в верхоленской и илгинской свитах. Смена фациально-палеогеографических обстановок, режима водно-солевого питания и интенсификация поступления рассолов и газов, по мнению исследователей [Беленицкая и др., 1990; Сизых, 2001, Виноградов и др., 2011], обусловлены активизацией тектонических событий, в наибольшей мере каледонских, в южном обрамлении Сибирской платформы. На фоне этих эпизодов возможно проследить климатические изменения.

На рис. 5 представлено изменение по разрезу величин отношений $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ (масс.%) и $\text{Ln}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ (молярные), по пикам которых выделены периоды аридизации/гумидизации климата. Относительно высокие значения $\text{Ln}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ от-

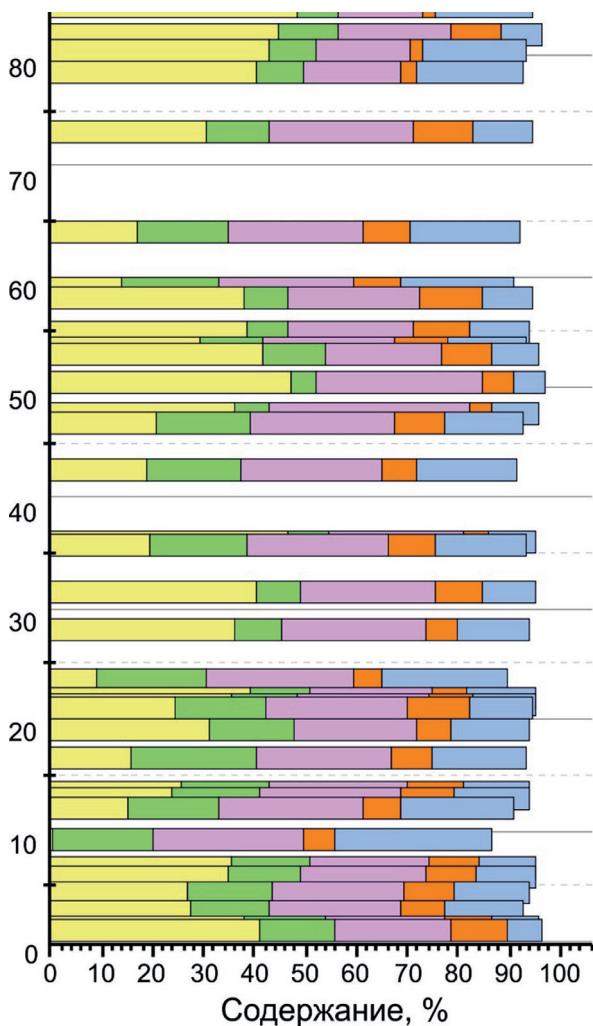


Рис. 3. Изменение нормативного минерального состава пород верхоленской серии в обнажении правого берега р. Малая Чуя. Условные обозначения см. табл. 3

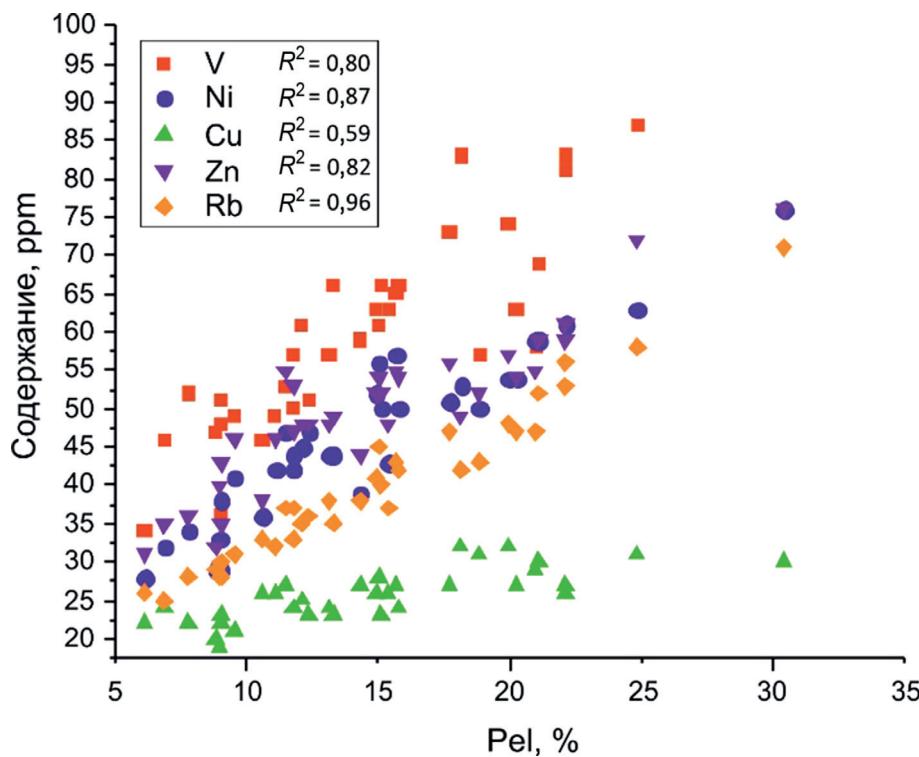


Рис. 4. Взаимоотношение ненормализованных содержаний микроэлементов и доли глинистой части в породах верхоленской серии

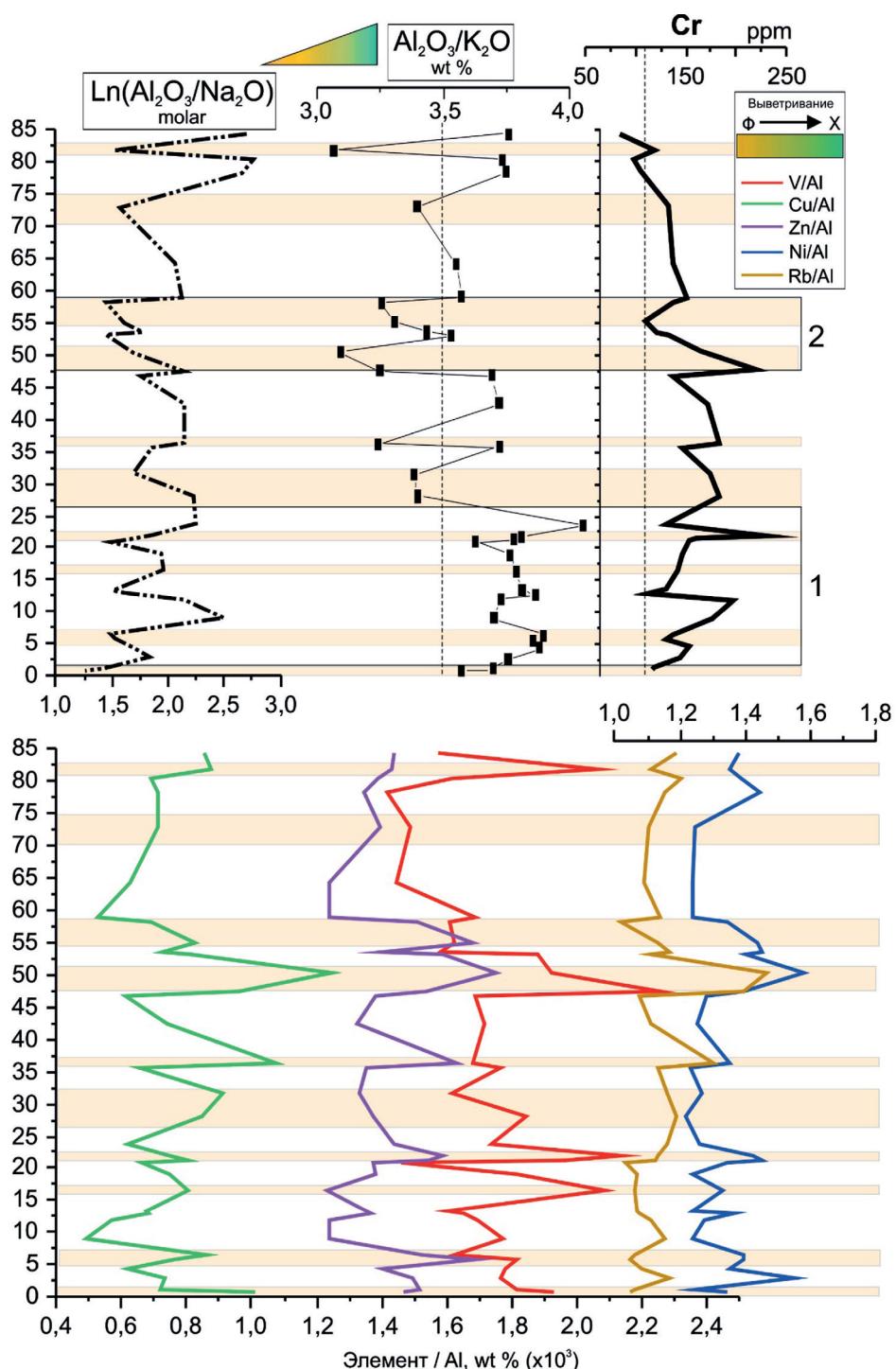
ражают рост атмосферных осадков и интенсивное химическое выветривание в теплом и/или влажном климате. Более низкие значения этого параметра указывают на снижение химического выветривания, что отражает прохладный и/или засушливый климат, с преобладанием физического выветривания [Montero-Serrano et al., 2015]. Содержания $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ выше в нижней части разреза, но на кривой $\text{Ln}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$ эта тенденция не наблюдается. В отечественной литературе широко известен натриевый модуль ($\text{HM} = \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$), характеризующий особенности процессов химического выветривания и созревания поступающей в бассейн кластики: чем меньше величина HM , тем меньше плагиоклазов поступило в область осадконакопления из питающей провинции [Маслов, 2006]. Можно сделать вывод, что происходило изменение источника сноса и/или «питающих» пород — в начале формирования толщи происходило поступление преимущественно плагиоклазов, далее увеличилась доля КПШ при относительно стабильном (в эти периоды) вкладе глинистых минералов. Нормативный расчет минерального состава также демонстрирует более высокие содержания плагиоклаза в нижней части разреза.

Выделенным периодам усиления физического выветривания соответствуют пики концентраций V, Cu, Zn, нормализованных на Al (чтобы уменьшить влияние от изменения содержания терригенной составляющей по разрезу, как упоминалось выше). Пики V, Cu, Zn имеют разную интенсивность по разрезу в пределах выделенных интервалов, что демонстрирует различную степень обогащения этими элементами и форму нахождения при схожих климатических условиях формирования. Cu и Zn довольно подвижны в пресноводных гумид-

ных ландшафтах, имея тенденцию к концентрации в аридных бассейнах с повышенной минерализацией вод [Юдович, Кетрис, 2011]. Эти элементы косвенно могут указывать на соленость вод палеобассейна, так как главные формы переноса Cu — хлоридные комплексы. Это же свойственно и для Zn. Непропорциональный рост содержаний V (относительно пики Cu и Zn), по-видимому, связан с разным вкладом тяжелых минералов-носителей (титаномагнетит, ильменит). Косвенно на это может указывать сильная корреляция V с TiO_2 (0,83) и Fe_2O_3 (0,9). Rb изоморфно замещает калий в калишпатах и слюдах (причем КПШ беднее Rb, чем слюды) [Юдович, Кетрис, 2011]. Возможно, в связи с этим пики на кривой Rb не всегда совпадают с таковыми на кривых V, Cu, Zn и выделенными периодами изменения выветривания — Rb обогащает разные фазы. Пики на кривой нормализованных содержаний Ni противопоставлены таковым для V, Cu, Zn, что указывает на обогащение осадков палеобассейна преимущественно в условиях относительной гумидизации. Таким образом, в изученном фрагменте разреза верхоленской серии можно выделить наиболее достоверно (исходя из частоты отбора проб) два крупных интервала (рис. 5; 6, А): 1 — интервал преимущественного усиления химического выветривания, связанный с потеплением или гумидизацией климата; 2 — физического выветривания, которое усиливается за счет похолодания или аридизации.

Различные интерпретации кембрийского положения континентов и отсутствие немодельных оценок палеотемператур воздуха/поверхности в области денудации не позволяют в полной мере оценить достоверность тех или иных палеоклиматических реконструкций. На рис. 6, Б приведен

Рис. 5. Интервалы относительного изменения климата в пределах источника сноса Верхоленского палеобассейна по геохимическим данным. Выветривание: Φ — физическое, X — химическое



общий график разброса региональных данных по палеотермометрии вод в среднем-позднем кембрии по литературным данным.

При общем обогащении Cr (от 83 до 228 ppm, в среднем 145 ppm), превышающем кларк в стандарте PAAS (средний постархейский австралийский глинистый сланец, 110 ppm) [Taylor, McLennan, 1985], закономерности, влияющие на его распределение по разрезу, менее ясны. Для Cr не установлены сильные (и даже средние) корреляционные связи ни с петрогенными оксидами, ни с анализируемыми элементами, ни с нормативно пересчитанными минералами. Cr является индикатором основного и ультраоснов-

ного петрофонда, даже в сильно выветрелых средах. В магматических породах присутствует преимущественно в виде Cr^{3+} . Помимо основного минерала (хромита) находится в шпинели, может обогащать пироксен, амфибол, слюды [Ure, Berrow, 1982], магнетит и ильменит [Wedepohl, 1978]. В процессе выветривания поведение Cr^{3+} схоже с поведением Fe^{3+} и Al^{3+} , что приводит к накоплению во вторичных оксидах и глинах. Так, в водной среде катионы Cr^{3+} демонстрируют pH-зависимую адсорбцию на поверхности частиц глинистых минералов [Charlet, Manceau, 1992; Corker et al., 1991] и оксигидроксидов Al и Fe [Richard, Bourg, 1991; Fendorf, 1995]. Отсут-

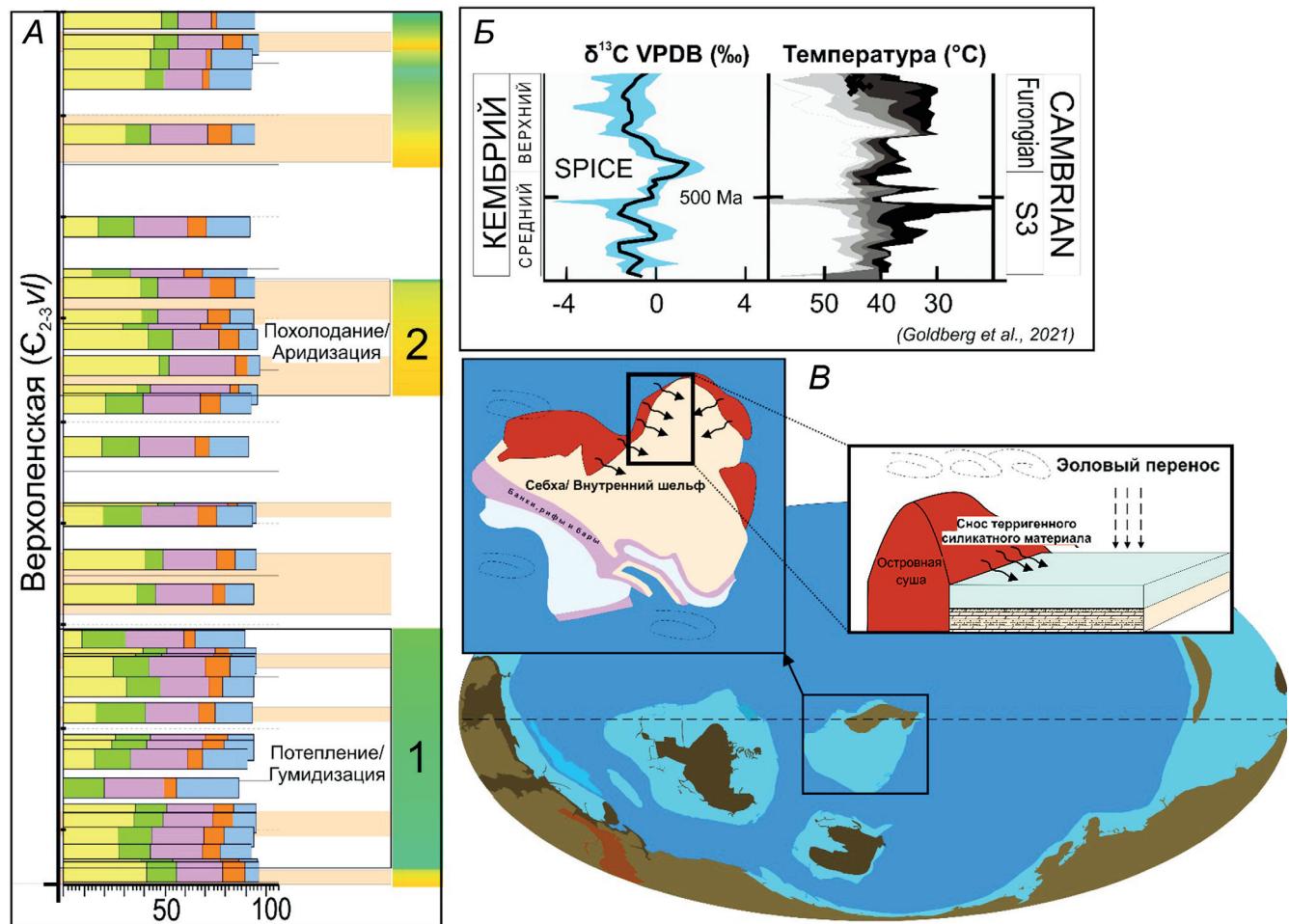


Рис. 6. Сводные палеогеографические данные для верхоленской серии. А — выделенные интервалы климатических изменений в разрезе р. Малая Чуя. Б — вариации региональных данных по палеотермометрии вод в среднем-позднем кембрии по [Goldberg et al., 2021]. В — концептуальная схема поступления материала в исследуемую часть Верхоленского бассейна. Глобальная основа по [Scotese, 2014], региональная для Сибирской платформы по [Стратиграфия ..., 2016]

ствие корреляции с Al_2O_3 (коэффициент $-0,08$), Na_2O (0,22), TiO_2 ($-0,11$), Fe_2O_3 (0,08), V (0,11), Ni ($-0,15$) исключает прямую связь с вышеперечисленными минералами в составе терригенного стока, который, как описано выше, предполагается в качестве основного источника поступления обломочного материала в Верхоленский палеобассейн. При этом наблюдается слабая прямая корреляция с SiO_2 (0,51) и Zr (0,49). Zr же, в свою очередь, имеет средние (около 0,6) корреляционные связи с TiO_2 , V , Y , Nb , что вполне закономерно объясняется нахождением в тяжелых титан- и цирконий содержащих минералах, которые тяготеют к источнику сноса.

По результатам Rb-Sr исследований силикатной составляющей мергелей и аргиллитов верхоленской серии в разрезе р. Малая Чуя и Иркутском амфитеатре, исследователями [Буякайте и др., 2019] был получен возраст продуктов выветривания гранитов, обнажавшихся на юге и западе от Сибирской платформы в среднем-верхнем кембрии, а также сделан вывод о преимущественно эоловом пути их поступления в Верхоленский бассейн. Можно предположить, что связь Cr с Zr обусловлена именно тем, что Cr -содержащие минералы привносились

вместе с частью цирконов именно эоловым путем и по этой причине Cr не демонстрирует зависимости от изменения общего поступления обломочного материала. В таком случае, Cr может являться индикатором интенсивности эоловых процессов в средне-верхнекембрийское время на данной территории. На рис. 6, В представлена концептуальная схема поступления материала в исследуемую часть Верхоленского бассейна.

Выводы. В разрезе верхней части верхоленской серии вблизи изотопного события SPICE по геохимическим данным отчетливо выделяются интервалы изменения характера выветривания в области денудации, фиксируемые по вариациям величин отношений $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$, $\text{Ln}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O})$, содержаний V , Cu , Zn , Rb , Ni , нормативного минерального состава. В изученном фрагменте разреза верхоленской серии также выделяются два крупных интервала: преимущественного усиления химического выветривания, что связано с потеплением или гумидизацией климата, и физического выветривания, которое усиливается за счет похолодания или аридизации.

Cr , по-видимому, во время формирования пород серии поступал в бассейн исключительно

эоловым путем и маркирует периоды усиления ветрового переноса. В условиях тектонической активизации и прогрессирующей изоляции Верхоленского бассейна, рассмотренные литолого-геохимические особенности дают информацию о сопутствующих этим событиями климатических изменениях.

Благодарности. Авторы выражают благодарность В.Э. Павлову (ИФЗ РАН) за предоставление

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беленицкая Г.А., Задорожная Н.М., Иогансон А.К. и др. Рифогенные и сульфатоносные формации фанерозоя СССР. М.: Недра, 1990.
2. Буякайте М.И., Колесникова А.А., Покровский Б.Г., Петров О.Л. Крупнейший изолированный бассейн палеозоя: С-, О-, S- и Rb-Sr — изотопная систематика терригенно-сульфатно-карбонатных отложений верхоленской свиты, средний-верхний кембрий Сибирской платформы // XXII симпозиум по геохимии изотопов имени академика А.П. Виноградова (29–31 октября 2019 г.) Расширенные тезисы докладов, ГЕОХИ РАН. М.: Акварель, 2019. С. 70–78.
3. Виноградов В.И., Беленицкая Г.А., Покровский Б.Г., Буякайте М.И. Изотопно-геохимические особенности отложений верхоленской свиты среднего-верхнего кембрия Сибирской платформы // Литология и полез. ископаемые. 2011. № 1. С. 79–93.
4. Григорьев Н.А. Распределение химических элементов в верхней части континентальной коры. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2009.
5. Жарков М.А. Кембрийская соленосная формация Сибирской платформы // Советская геология. 1966. № 2.
6. Жарков М.А. Основные вопросы тектоники юга Сибирской платформы в связи с перспективами калиеносности // Тектоника юга Сибирской платформы и перспективы ее калиеносности: Сб. М.: Наука, 1965.
7. Иванов А.А., Воронова М.Л. Галогенные формации (минеральный состав, типы и условия образования; методы поисков и разведки месторождений минеральных солей). М.: Недра, 1972.
8. Карапев И.П., Муляк В.С., Титоренко Т.Н., Файзулина З.Х. Палеонтологическая характеристика позднекембрийских и кембрийских отложений Иркутского амфитеатра // Советская геология. 1966. № 5.
9. Королюк И.К., Писарчик Я.К. Южная часть Сибирской платформы. Стратиграфия СССР. Том 3. Кембрийская система. Т. III. М.: Недра, 1965.
10. Маслов А.В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2005.
11. Писарчик Я.К., Голубчина М.Н. Существовал ли региональный перерыв в осадконакоплении в среднем кембрии на Сибирской платформе? // Литология и полез. ископаемые. 1979. № 6. С. 104–118.
12. Региональная стратиграфическая схема кембрийских отложений Сибирской платформы. Объяснительная записка: Решения Всероссийского стратиграфического совещания по разработке региональных стратиграфических схем верхнего докембия и палеозоя Сибири (Новосибирск, 2012) (Кембрий Сибирской платформы) / Под ред. С.С. Сухова, Т.В. Пегель, Ю.Я. Шабанова. Новосибирск: СНИИГиМС, 2021.
13. 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.
14. Розен О.М., Аббясов А.А., Мигдисов А.А., Ярошевский А.А. Программа MINLITH для расчета минерального состава осадочных пород: достоверность результатов в применении к отложениям древних платформ // Геохимия. 2000. № 4. С. 431–444.
15. Сизых В.И. Шарьядно-надвиговая тектоника окраин древних платформ. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «ГЕО», 2001.
16. Солнцев Н.А. Учение о ландшафте (избранные труды). М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001, 384 с.
17. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири. Кембрий Сибирской платформы: В 2 т. Т. 1. Стратиграфия / Ред. А.Э. Конторович. Новосибирск: Изд-во ИНГГ СО РАН, 2016. 497 с.
18. Страхов Н.М. Основы теории литогенеза. Т. III. М.: Изд-во АИ СССР, 1962.
19. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимические индикаторы литогенеза (литологическая геохимия). Сыктывкар: Геопринт, 2011. 742 с.
20. Charlet L., Manceau A.A. 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 // J. Colloid and Interface Sci. 1992. Vol. 148. P. 443–458.
21. Corker J., Evans J., Rummey J. EXAFS studies of pillared clay catalysts // Materials Chemistry and Physics. 1991. Vol. 29. P. 201–209.
22. Fendorf S.E. Surface reactions of chromium in soils and waters // Geoderma. 1995. Vol. 67. P. 55–71.
23. Goldberg S.L., Present T.M., Finnegan S., Bergmann K.D. A high-resolution record of early Paleozoic climate // Proc Natl Acad Sci USA. 2021. Vol. 118(6). e2013083118.
24. Hearing T. W., Harvey T. H. P., Williams M. et al. An early Cambrian greenhouse climate // Science advances. 2018. Vol. 4 (5) eaar5690.
25. Montero-Serrano J.C., Föllmi K.B., Adatte T. et al. Continental weathering and redox conditions during the early Toarcian Oceanic Anoxic Event in the northwestern Tethys: Insight from the Posidonia Shale section in the Swiss Jura Mountains // Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 2015. Vol. 429. P. 83–99.
26. Nesbitt H. W., Young G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. Vol. 299. P. 715–717.
27. Richard F.C., Bourg A.C.M. Aqueous geochemistry of chromium: A review // Water Res. 1991. Vol. 25. P. 807–816.

28. *Scotese C.R.* Atlas of Cambrian and Early Ordovician Paleogeographic Maps (Mollweide Projection), Maps 81–88, Volumes 5, The Early Paleozoic, PALEOMAP Atlas for ArcGIS, PALEOMAP Project, Evanston, IL. 2014.
29. *Taylor S.R., McLennan S.M.* The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, Oxford, 1985. 312 p.
30. *Ure A.M., Berrow M.L.* The chemical constituents of soils // Environmental chemistry. Bowen, H.J.M. (Ed.). Royal Society of Chemistry, UK, London: Burlington House. 1982. P. 94–202.
31. *von Eynatten H., Barceló-Vidal C., Pawlowsky-Glahn V.* Modelling compositional change: the example of chemical weathering of granitoid rocks // Mathematical Geology. 2003. Vol. 35. P. 231–251.
32. *Wedepohl K.K.* Handbook of geochemistry. Vol. 2, Part 5. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1978. 1546 p.

Статья поступила в редакцию 16.05.2023,
одобрена после рецензирования 05.06.2023,
принята к публикации 16.08.2023