

Геохимия льдов бугров пучения в долине р. Сенца (Окинское плоскогорье, Восточный Саян)

© 2018 г. С.В. Алексеев, Л.П. Алексеева

Институт земной коры Сибирского отделения РАН, Иркутск, Россия
lalex@crust.irk.ru

Geochemistry of ice in frost mounds in the valley of the River Sentsa (Oka plateau, East Sayan)

S.V. Alekseev, L.P. Alekseeva

Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia
lalex@crust.irk.ru

Received February 14, 2018

Accepted August 26, 2018

Keywords: *frost mound, genesis, ground ice, ice chemical composition, ice melt salinity, injection ice, perennially frozen rocks, segregation ice, surface water, water migration.*

Summary

The authors examined the chemical composition of underground ice sampled from the frost mounds located in the loose (unconsolidated) sediments of the Sentsa River valley (Oka plateau, Eastern Sayan) with the purpose of reconstruction the formation history of these cryogenic creations. Numerous frost mounds of various sizes are mainly composed of alternating icy loams, sandy loams, and lenses of pure ice. Samples of underground ice taken in the outcrops of the river ledges and cores from wells together with samples of river and lake waters were analyzed by traditional hydrochemical techniques (methods) in the center "Geodynamics and geochronology" (Institute of the Earth's Crust of the Siberian branch of RAS, Irkutsk). It was found that the chemical composition of pure ice melts from lenses and layers of the frost mounds is hydrocarbonate calcium (HCO_3 Ca, SO_4 - HCO_3 Ca and NH_4 - HCO_3 Ca) with mineralization of 6.5 – 15.6 mg/L, pH = 5.6÷6.1. Mineralization of melts of texture-forming ice, taken from icy ground (i.e. with fractions of enclosing loams) was much higher – from 50 to 792.5 mg/L. River and lake water is ultra-fresh with 99–132 mg/L salinity, and according to geochemical type it is hydrocarbonate calcium (HCO_3 Ca). The specific features of chemical composition of the underground ice (high content of ammonium salts and sulfates) depend on a water-rock interaction, the presence of organic matter in the loose (unconsolidated) sediments and a repeated volcanic activity in the late Pleistocene–Holocene. The frost mounds are confined to a lacustrine sediments area in the backwater zone that was formed by the Late Pleistocene terminal moraine. Their formation in the Holocene took place as a result of segregation ice formation during freezing of water-saturated lake sediments, and, presumably, repeated injections of underground waters of the under-channel and floodplain aquifers hydraulically connected with river waters. Thus, the genesis of the studied frost mounds is probably a mixed segregation-injection process.

Citation: Alekseev S.V., Alekseeva L.P. Geochemistry of ice in frost mounds in the valley of the River Sentsa (Oka plateau, East Sayan). *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018. 58 (4): 524–536. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-524-536.

Поступила 14 февраля 2018 г.

Принята к печати 26 августа 2018 г.

Ключевые слова: *бугор пучения, генезис, инъекционный лёд, миграция влаги, минерализация расплавов льда, многолетнемёрзлые породы, поверхностные воды, подземный лёд, сегрегационный лёд, химический состав льда.*

Многочисленные бугры пучения в долине р. Сенца на Окинском плоскогорье в Восточных Саянах сложены переслаивающимися льдистыми суглинками, супесями и линзами чистого льда. Установлено, что расплавы текстурообразующих льдов ультрапресные и пресные, по химическому составу – гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные и аммонийно-гидрокарбонатные кальциевые. Специфика химического состава подземных льдов обусловлена взаимодействием в системе вода – порода, наличием органики в рыхлых отложениях и неоднократной активизацией вулканизма в позднем плейстоцене–голоцене.

Введение

Подземные льды – важная составляющая мёрзлых пород, в том числе и бугров пучения. Их химический состав характеризует гидрогео-

химическую обстановку при формировании криогенных образований и вмещающих пород. Сравнительный анализ состава подземных льдов разных генетических типов, поверхностных вод и атмосферных осадков позволяет восстановить

Район исследования

палеогидрогеологические, палеогидрогеохимические условия, а также определить источник воды, сформировавшей текстурообразующие, пластовые и жильные льды [1–4 и др.].

Криогенные образования, содержащие в своей структуре чистый лёд или ледогрунт, т.е. бугры пучения, формируются в Прибайкалье и Забайкалье [5], на Алтае [6], а также в Китае [7], Монголии [8, 9], в Канаде, на Аляске, в Западной Европе [10–12], в Индии [13]. Подробное описание распространения и результатов исследования бугров пучения (пинго) в Северной Азии дано в работе [14]. Подземные льды минеральных бугров пучения (литальза) и в целом многолетнемерзлых пород в долине р. Сенца на Окинском плоскогорье в Восточных Саянах начали изучать сравнительно недавно [15–19]. На основе исследований изотопного состава ледогрунтовых толщ и радиоуглеродных датировок впервые сформулирован принципиальный вывод о голоценовом возрасте, генезисе ядер бугров (литальза) и возможных типах льдообразования. Настоящая работа посвящена характеристике и анализу основных геохимических особенностей подземных льдов в буграх пучения.

Река Сенца – левый приток р. Ока, берущей начало в оз. Окинское в Восточном Саяне и впадающей в р. Ангара. Её долина занимает юго-западную часть Окинской котловины, расположенной на северо-западе одноимённого плоскогорья с абсолютными отметками 1800–2500 м [20]. Широкая троговая долина р. Сенца с глубиной вреза 600–800 м в позднем плейстоцене была занята крупным ледником, который в 8,5 км от места впадения в р. Ока (в районе пос. Шаснур) оставил мощную конечную морену протяжённостью около 10 км [21]. Выше конечно-моренного вала река активно меандрирует, на поверхности долины широко развиты старичные и термокарстовые озёра различных размеров (рис. 1).

Аллювиальные, флювиогляциальные и озёрно-аллювиальные отложения долины р. Сенца представлены суглинками (от лёгких до тяжёлых), супесями, песками (разнозернистыми, иногда слоистыми), галечниками с валунами. Климат в пределах Окинского плоскогорья резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха отрицательная и изменяется в

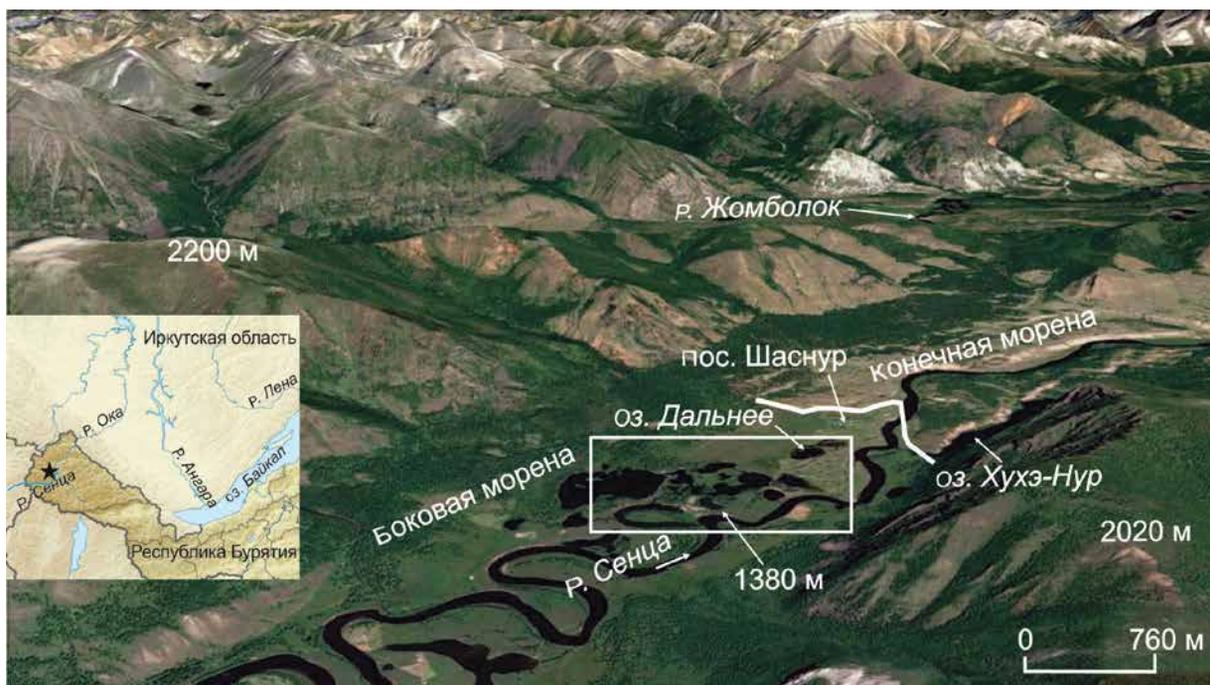


Рис. 1. Долина р. Сенца на Окинском плоскогорье (фото с сайта GoogleEarth). Граница конечной морены (сплошная линия) и район работ (прямоугольник и звёздочка на врезке)

Fig. 1. Sentsa river valley, Oka plateau (GoogleEarth). End moraine boundary (solid line) and study region (rectangle and asterisk on the insert-map)

зависимости от абсолютной высоты от $-5,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1372 м) до $-6,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2084 м). Многолетнемёрзлые породы имеют сплошное распространение на высоких хребтах, приподнятых плато и водоразделах. В среднегорье они характеризуются прерывистым распространением, переходящим в пределах низкогорий в островное. Сплошность уменьшается в западном и северо-северо-восточном направлениях, где она нарушается таликами: сквозными – в зонах разломов, которые картируются постоянно действующими источниками подземных вод, и несквозными, связанными с отепляющим влиянием поверхностных водотоков и водоёмов.

Мощность многолетнемёрзлых пород на междуречных пространствах в среднем составляет 170–200 м, а в долинах рек – 140–180 м [22]. Среднегодовая температура мёрзлых пород изменяется в пределах $-2,1 \div -8,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Мощность сезонно-протаивающего слоя на междуречных пространствах равна 1,0–1,5 м, достигая 3,5 м на южных склонах. Сезонно-промерзающий слой в ноябре–декабре сливается с многолетнемёрзлыми породами. В долине р. Сенца температура пород у поверхности (0,1 м) колеблется в диапазоне $-30,7 \div 20,7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Установленная глубина годовых теплооборотов составляет 10 м с температурой на подошве слоя $-2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (в пределах одного из изученных бугров пучения) [17, 23].

Материалы и методы исследования

В основу настоящей статьи положены материалы пятилетних полевых и лабораторных исследований строения бугров пучения и химического состава слагающих их подземных льдов. Полевые исследования включали в себя вскрытие, расчистку и детальную документацию разрезов с зарисовками и фотографированием, а также отбор образцов рыхлых отложений и льда из бугров пучения. Всего изучено семь разрезов бугров пучения и обнажений в уступе надпойменной террасы высотой от 1,8 до 10,7 м. В центральной части бугров пучения (Se-14-1, Se-16-1) были пробурены две скважины: Se-16-скв. 1 и Se-15-скв. 2 глубиной соответственно 20,4 и 13,4 м, из которых через каждые 0,3–0,7 м отбирался мёрзлый керн. Расстояние между скважинами – 240 м.

Для определения химического состава жидкой фазы прослойки чистого льда помещали в полиэтиленовые пакеты, из которых после оттаивания раствор сливали в специальные ёмкости. В случае невозможности отбора чистого льда в пакет помещали фрагменты мёрзлого керна с наибольшей видимой льдистостью для оттаивания. Талая вода после фильтрования сливалась в пластиковые бутылки (0,5 л), которые доставляли в лабораторию. В Центре коллективного пользования «Геодинамика и геохронология» Института земной коры СО РАН выполнен анализ химического состава речных и озёрных вод, а также расплавов подземных льдов различными методами [24]. Концентрации K^+ , Na^+ , Li^+ , Rb^+ , Cs^+ , Sr^{2+} определяли методом пламенной фотометрии на атомно-абсорбционном спектрофотометре SOLAAR M (Thermo Elemental, IN-TERTECH Corporation, США); Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- – титриметрическим методом; SO_4^{2-} , H_4SiO_4 – весовым методом; NO_3^- , NO_2^- , NH_4 – колориметрическим методом.

Подземные льды бугров пучения

Один из крупных изученных бугров пучения *Se-14-1* ($52^{\circ}39'79''$ с.ш., $99^{\circ}29'86''$ в.д.) высотой 10,7 м (по наклонной плоскости, угол наклона 45°) с ледогрунтовым ядром находится на левой надпойменной террасе р. Сенца; к нему примыкает озеро термокарстового происхождения (рис. 2). Многолетнемёрзлые породы залегают с глубины 1,1 м. Особенность разреза бугра, сложенного преимущественно голубовато-серыми пылеватыми средними и тяжёлыми суглинками, заключается в наличии двух ледяных линз мощностью 40 и 65 см. Верхняя линза залегает на глубине 2,85–2,35 м. Лёд молочно-белого цвета с редкими включениями суглинка размером 1–3 см. В нижней линзе (глубина 4,0–4,65 м) лёд другой – прозрачный, с многочисленными пузырьками округлой и вытянутой формы и минеральными включениями, представленными тёмно-серым суглинком размером 0,1–10 см (рис. 3, а). Общая видимая льдистость отложений увеличивается от поверхности вниз по разрезу от первых десятков до 70% (на глубине 4–8 м). Криогенная текстура – крупношлировая и базальная. Другой бугор пучения *Se-16-1*

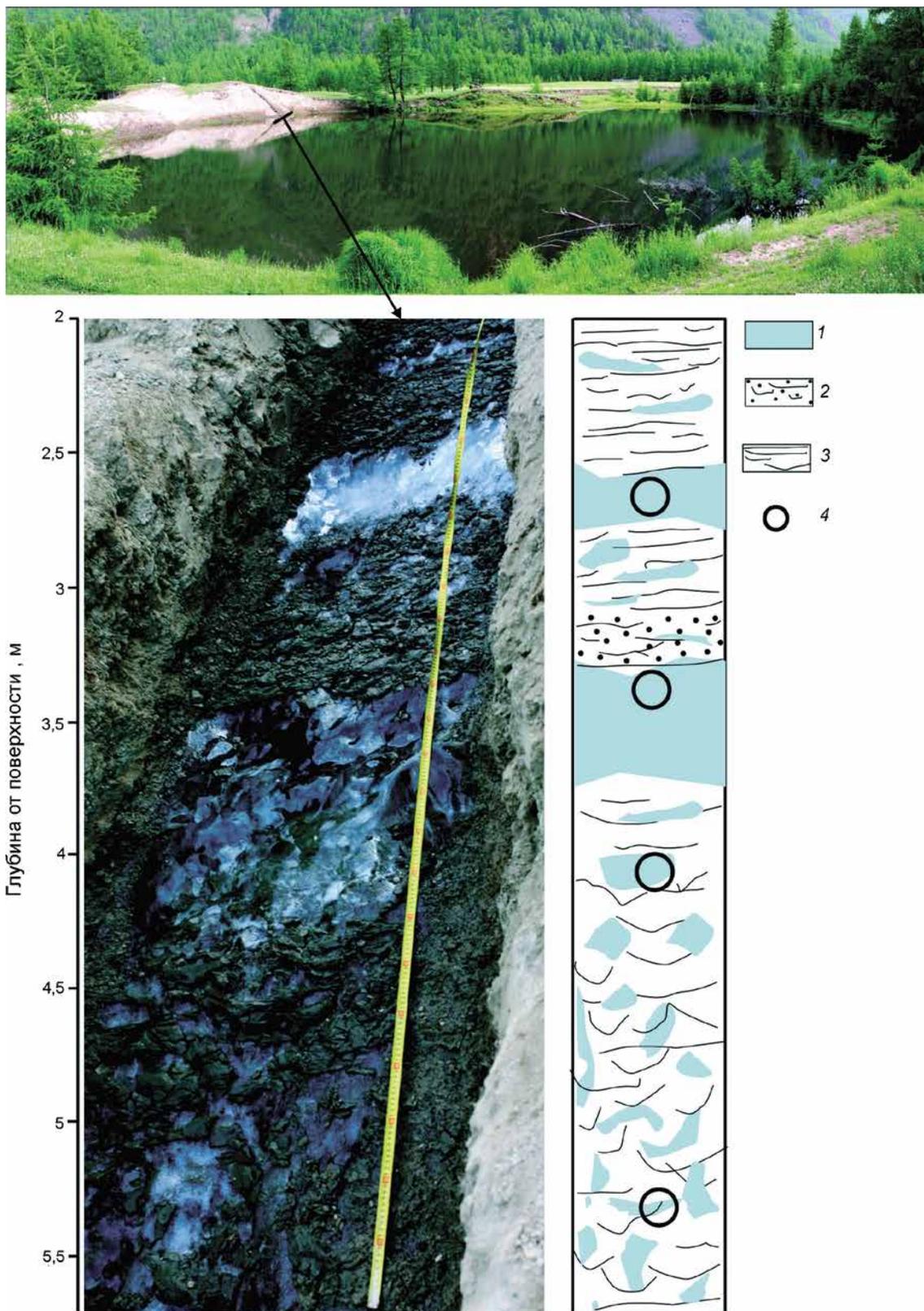


Рис. 2. Бугор пучения Se-14-1 с примыкающим озером и фрагмент его разреза:
1 – лёд; 2 – супесь; 3 – суглинок; 4 – место отбора проб льда

Fig. 2. Frost mound Se-14-1 with adjacent lake and fragment of its section:
1 – ice; 2 – silt; 3 – clayey silt; 4 – point of ice sampling

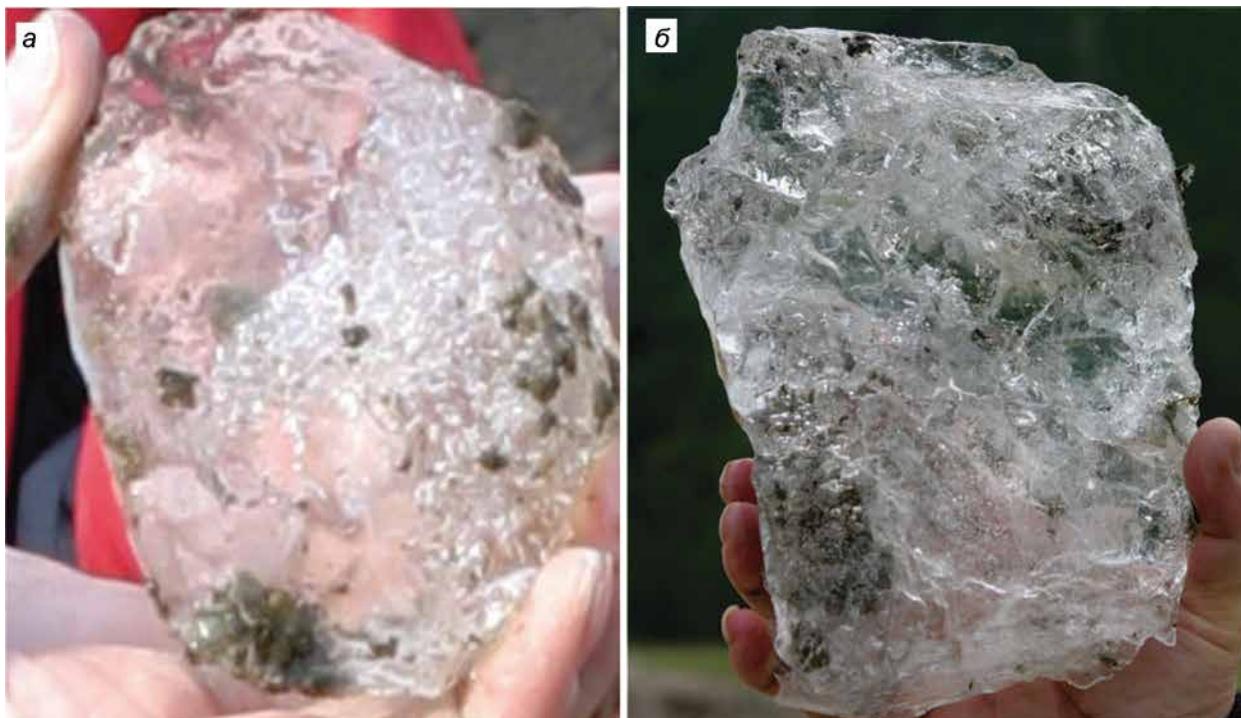


Рис. 3. Лёд из бугров пучения:
a – Se-14-1 (глубина 4,5 м); *б* – Se-16-1 (глубина 1,5 м)
Fig. 3. Ice from frost mounds:
a – Se-14-1 (4.5 m depth); *b* – Se-16-1 (1.5 m depth)

(52°39.892' с.ш., 99°29.816' в.д.) также находится на левом берегу р. Сенца и имеет высоту 5,8 м по наклонной плоскости с углом наклона 15° (рис. 4).

Выше кровли мёрзлых пород до глубины 1,15 м разрез сложен светло-серой супесью с тонкими ожелезнёнными прожилками. В верхней части мёрзлой толщи вскрыта наклонно залегающая ледяная линза мощностью 20–30 см. Лёд чистый, прозрачный, с пузырьками округлой формы, местами молочного цвета, с редкими включениями голубовато-серого суглинка и растительных остатков (см. рис. 3, *б*). Объёмная льдистость возрастает вниз по разрезу за счёт увеличения размеров ячеек льда, достигая к глубине 3,5 м значений 50–60%, толща становится лёдогрунтовой.

Лёд из керна двух скважин по внешнему виду и структурным особенностям не отличается ото льда, отобранного из расчисток с соответствующей глубины. Он чистый, прозрачный, с мелкими и крупными пузырьками газа (диаметром до 3 мм), округлой формы, местами с включениями суглинка размером до нескольких сантиметров; иногда лёд становится молочно-белым (рис. 5, *А*). Однако лёд, отобранный с большей глубины из

керны обеих скважин, имеет другие структурные особенности. В нём наблюдается чётко выраженное переслаивание прозрачных и мутных ледяных прослоек толщиной 0,3–1,0 см. Прослойки и шлиры льда горизонтальные, иногда наклонные (угол до 45°). Количество пузырьков во льду меньше или они вообще отсутствуют (см. рис. 5, *Б*).

Химический состав подземных льдов

Химический состав *расплавов чистого льда из линз бугров пучения* Se-14-1 и Se-16-1 – гидрокарбонатный кальциевый с минерализацией 6,5–15,6 мг/дм³, рН = 5,6 ÷ 6,1. Поясним, что ионно-солевой состав жидкой фазы даётся в виде двух самостоятельных прилагательных: первое – для анионов, второе – для катионов, на которые приходится более 25 %-экв. (из 100). В сложном прилагательном компоненты располагаются по принципу «оттенок–цвет», т.е. по возрастанию их содержания: преобладающий ион стоит в конце сложного прилагательного и определяет название химического типа воды или льда [25].

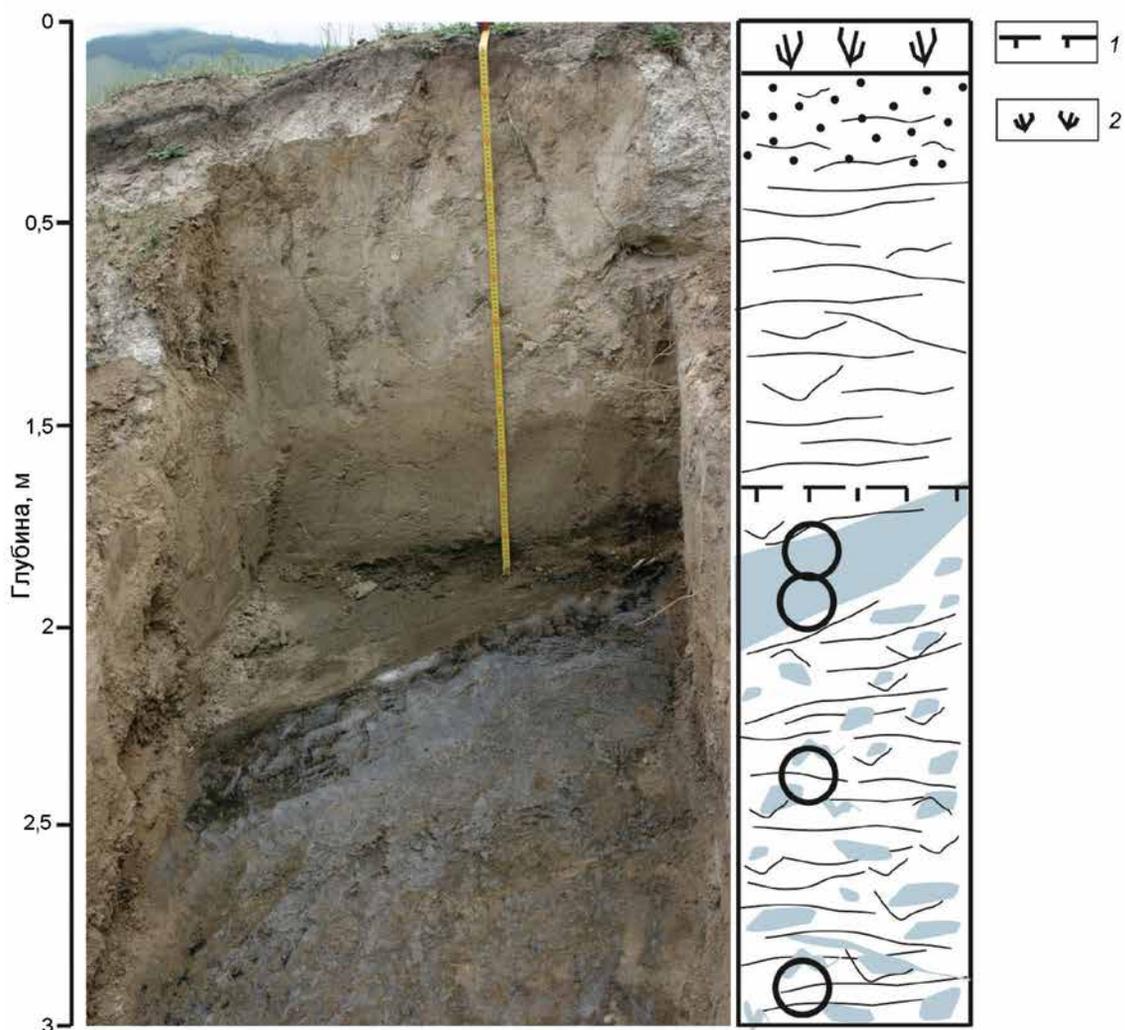


Рис. 4. Бугор пучения Se-16-1 и фрагмент его разреза:

1 – кровля мерзлоты; 2 – растительно-дерновый слой; остальные усл. обозначения см. рис. 2

Fig. 4. Frost mound Se-16-1 and fragment of its section:

1 – permafrost table; 2 – vegetation-turf layer; other conditional denotations see Fig. 2

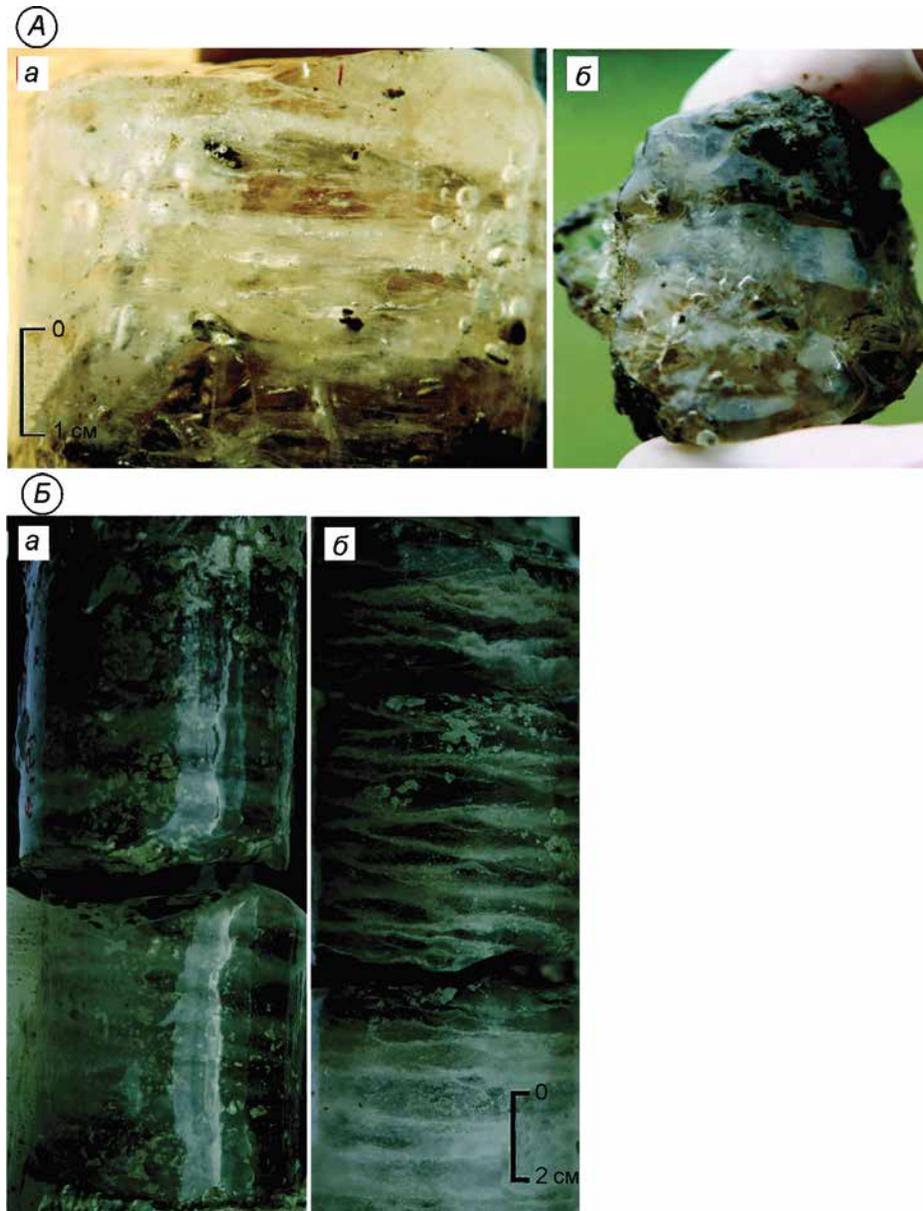


Рис. 5. Лёд из скважин:

A – Se-16-скв. 1: *a* – глубина 4,5 м, *б* – глубина 18,5–19,0 м; *B* – Se-15-скв. 2: *a* – глубина 4,7 м, *б* – глубина 11–11,5 м

Fig. 5. Ice from boreholes:

A – Se-16-drill hole 1: *a* – 4.5 m depth, *б* – 18.5–19.0 m depth; *B* – Se-15- drill hole 2: *a* – 4.7 m depth, *б* – 11–11.5 m depth

Минерализация льда, отобранного из ледогрунта (т.е. вместе с включениями вмещающего суглинка), выше на порядок.

Содержание основных ионов – Ca^{2+} и HCO_3^- , формирующих геохимический тип подземного льда, с глубиной не испытывает колебаний и составляет от 35 до 50 %-экв. от суммы катионов и от 55 до 70 %-экв. от суммы анионов соответственно. Увеличение минерализации текстурообразующего льда вниз по разрезу в обоих буграх происходит

за счёт роста доли сульфатов – до 43 %-экв. и аммония – до 38 %-экв., и в результате геохимический тип льда становится сульфатно-гидрокарбонатным или даже аммонийно-гидрокарбонатным. Концентрация Cl^- и Na^+ вниз по разрезу уменьшается до 2 и менее 4 %-экв. соответственно.

Химический состав *расплавов подземного льда в оттаявших суглинках* из керна скважин – гидрокарбонатный кальциевый магниевый-кальциевый и кальциевый-магниевый. Минерализация распла-

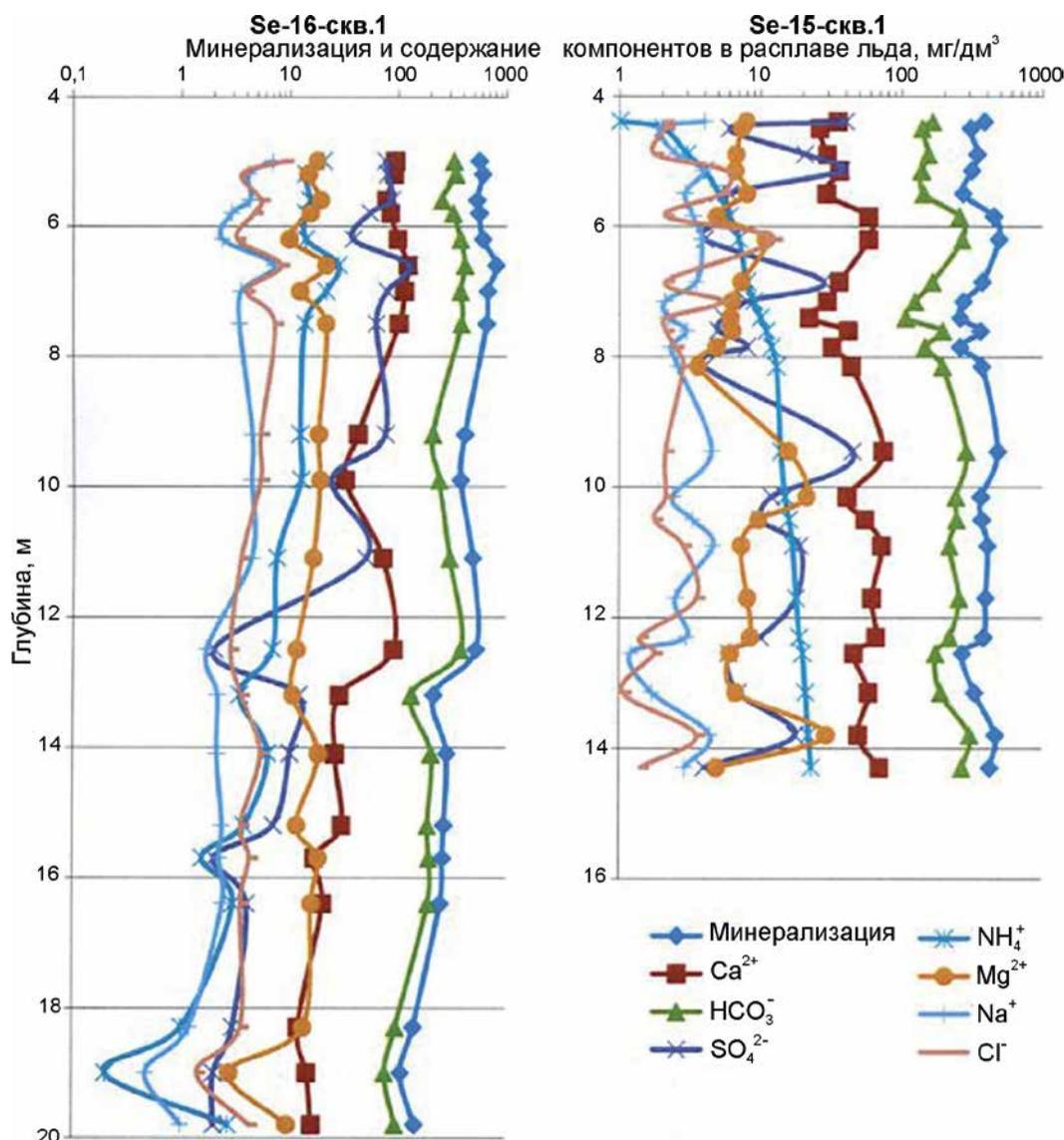


Рис. 6. Изменение химического состава расплавов льда в оттаявших льдистых суглинках с глубиной (в логарифмическом масштабе)

Fig. 6. Change of chemical composition of the melt ice in the thawed icy clayey silts along depth (in the log scale)

вов изменяется от 105,7 до 792,5 мг/дм³ в разрезе скв. 1 и от 178,4 до 488,6 мг/дм³ в разрезе скв. 2, при величине рН от слабокислой до слабощелочной. С глубиной минерализация расплавов понижается (рис. 6). Возможно, это связано не только с особенностями строения разреза, но и с процессами взаимодействия в системе вода–порода. Из керна скв. 1, ниже 13 м, за счёт значительной льдистости разреза и мощности ледяных прослоев удавалось отобрать достаточное для анализа количество практически чистого льда, поэтому расплав отличается минимальной минерализацией и концентрацией макрокомпонентов.

В оттаявших льдистых суглинках в результате взаимодействия (либо до промерзания рыхлых отложений, либо за время контакта жидкой и твёрдой фаз в ёмкости до аналитических определений) могли быть созданы условия для перехода в раствор легкорастворимых солей из породы, что привело к повышению суммы и содержания ионов. В целом в обеих скважинах изменение содержания компонентов по разрезу имеет схожий характер. В составе жидкой фазы доминируют кальций и гидрокарбонат-ион. Содержание Ca^{2+} и HCO_3^- равно соответственно 32–86 и 53–98 %-экв. В весовом выражении кальция в

Химический состав речных и озёрных вод Окинского плоскогорья*

Место отбора проб воды	рН	Единицы измерения	Содержание компонентов											Сумма ионов, мг/дм ³
			NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ³⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	H ₄ SiO ₄	
Р. Сенца	7,7	мг/дм ³	< 0,1	0,8	1,3	2,0	17,8	1,1	5,6	63,5	< 0,01	0,4	7,0	99,4
		мг-экв/дм ³		0,0	0,1	0,2	0,9	0,0	0,1	1,0		0,0		
		%-экв.		1,9	4,9	14,2	79,0	2,5	9,79	87,2		0,6		
Р. Ока	7,9	мг/дм ³	< 0,1	0,5	1,0	4,0	22,4	1,1	7,0	85,4	< 0,01	0,4	10,0	131,9
		мг-экв/дм ³		0,0	0,0	0,3	1,1	0,0	0,2	1,4		0,0		
		%-экв.		0,9	3,0	21,9	74,3	1,9	9,2	88,5		0,5		
Озеро у бугра Се-14-1 (с глубины 2,9 м)	7,3	мг/дм ³	< 0,1	1,7	1,3	3,4	30,5	1,1	17,1	94,0	0,8	< 0,4	10,0	159,8
		мг-экв/дм ³		0,0	0,1	0,3	1,5	0,0	0,4	1,5	0,0			
		%-экв.		2,3	3,1	14,7	79,9	1,5	18,3	79,3	0,8			
Озеро у бугра Се-14-1 (с поверхности)	7,1	мг/дм ³	< 0,1	1,5	1,4	3,9	25,7	1,4	16,1	83,0	< 0,01	0,7	2,0	135,6
		мг-экв/дм ³		0,0	0,1	0,3	1,3	0,0	0,3	1,4		0,0		
		%-экв.		2,3	3,6	18,8	75,3	2,3	19,2	78,0		0,6		
Озеро у бугра Се-15-3	6,8	мг/дм ³	< 0,1	0,8	1,1	2,9	15,0	1,8	10,3	58,6	< 0,01	0,5	10,0	101,0
		мг-экв/дм ³		0,0	0,1	0,2	0,8	0,1	0,2	1,0		0,0		
		%-экв.		2,0	4,6	22,7	70,8	4,1	17,4	77,9		0,7		
Оз. Дальнее	6,7	мг/дм ³	< 0,1	2,2	3,7	8,3	30,1	2,1	46,9	92,8	< 0,01	2,0	5,0	192,3
		мг-экв./дм ³		0,1	0,2	0,7	1,5	0,1	1,0	1,2		0,3		
		%-экв.		2,3	6,6	28,4	62,7	2,3	37,7	58,7		1,3		
Оз. Хухэ-Нур	7,6	мг/дм ³	< 0,1	1,0	1,6	0,9	21,7	1,1	6,0	75,7	< 0,01	< 0,4	4,0	111,8
		мг-экв/дм ³		0,03	0,07	0,07	1,08	0,0	0,1	1,2				
		%-экв.		2,1	5,6	5,6	86,7	2,2	9,0	88,9				

*Содержание отдельных компонентов приведены только в одних единицах измерения (в мг/дм³), а в других не пересчитывается из-за малого их содержания.

расплавах льда содержится в среднем 60 мг/дм³, а гидрокарбонат-иона – 250 мг/дм³. По величине концентрации за кальцием следует магний – 2,8–29,3 мг/дм³ или 12–59 %-экв. В нижней части разреза на глубине 13–19 м его содержание даже больше чем кальция.

В скв. 1 на глубине 6,4–6,8 м в пробах зафиксировано высокое содержание аммония – до 27,5 мг/дм³ (более 15 %-экв) с тенденцией уменьшения вниз по разрезу до 0,2 мг/дм³ в интервале 18,6–19,3 м. Концентрация сульфат-иона на глубине 6,4–6,8 м достигает 125 мг/дм³ (более 27 %-экв.), поэтому геохимический тип льда становится сульфатно-гидрокарбонатным. Ниже по разрезу содержание SO₄²⁻ уменьшается и на глубине 19,3–20,4 м равно 2,0 мг/дм³. В скв. 2 содержание аммония также повышенное – до 17,5 мг/дм³, более 25 %-экв. (на глубине 2,8–3,0 м). В результате химический состав расплавок изменяется на аммонийно-гидрокарбонатный. Характер распределения содержания NH₄⁺ по разрезу не синхронен с другими компо-

нентами. Присутствие в пробах достаточно высокого содержания аммония, а также нитратов и нитритов – характерная особенность ионного состава расплавок подземного льда.

Вода рек Сенцы и Оки – ультрапресная, с минерализацией 99–132 мг/дм³, по химическому составу – гидрокарбонатная кальциевая (таблица). В озёрах, примыкающих к подножию бугров пучения (в том числе в оз. Дальнее), минерализация воды составляет 101–192 мг/дм³, что коррелирует с минерализацией речных вод. Однако в анионном составе озёрных вод содержится гораздо больше сульфатов (до 38 %-экв.), а среди катионов, кроме кальция, установлено повышенное содержание магния (до 28,4 %-экв.). По химическому составу вода озёр сульфатно-гидрокарбонатная магниевокальциевая. Повышенное содержание сульфатов в воде в настоящее время связано, скорее всего, с полустойным режимом озёр. Гидравлическая связь с речными водами проявляется только в результате поднятия уровня воды в реке

более чем на 1 м, что происходит не каждый год. В результате этого в периоды полустойного режима озёрная вода обогащается сульфатами за счёт окислительно-восстановительных и биологических процессов в непроточном водоёме. Вода в оз. Хухэ-Нур, которое протокой связано с р. Сенца, по составу — гидрокарбонатная кальциевая с минерализацией 112 мг/дм³.

Обсуждение результатов

Бугры пучения, расположенные в долине, имеют различные размеры и приурочены в основном к области распространения озёрных отложений в зоне подпора, образованной барражом ледникового генезиса — конечной мореной [21] или/и гравитационного происхождения обвалами, залповыми выбросами материала из боковых долин и др. Меандрирующее русло реки и большое число стариц и озёр указывают на перегруженность долины осадочным материалом. Мелкозернистые отложения, формировавшиеся в озёрных котловинах и речной долине при низких скоростях течения воды, служили благоприятной средой в период многолетнего промерзания для активизации процессов пучения поверхности поймы и террасы р. Сенца. В голоцене, после спуска палеоозера, в водонасыщенных отложениях подозёрного талика, подвергшихся прогрессирующему всестороннему промерзанию, в результате миграции влаги происходило сегрегационное льдообразование, которое приводило к пучению рыхлых отложений.

Приуроченность бугров пучения к озёрно-аллювиальным отложениям р. Сенца, местами заболоченным, позволяет предполагать, что пучение и формирование бугров происходили не только в результате сегрегационного льдообразования при промерзании водонасыщенных озёрных осадков, но и при неоднократном внедрении вод подруслового и пойменного водоносных горизонтов, гидравлически связанных с речными водами. Линзы чистого льда мощностью 40–65 см образовались, видимо, за счёт наиболее мощных напорных инъекций воды, что привело к дополнительному росту бугров пучения. На сложность и разнообразие процессов кристаллизации воды указывают газовые включения в ледяных линзах, которые характеризуются

хаотичной ориентировкой и группировкой в скопления круглых, плоских, вытянутых и изогнутых пузырьков. По вертикали в прослоях льда выделяются несколько слоёв с разной насыщенностью газовыми включениями. Небольшие размеры и округлая форма пузырьков в газонасыщенном слое льда указывают на быструю кристаллизацию внедряющихся в грунт напорных подземных вод, в процессе которой растворённый газ захватывался льдом. В тех слоях льда, где газовых пузырьков гораздо меньше, они имеют вытянутую (эллипсоидную) форму и больший размер, что может указывать на невысокую скорость льдообразования [26, 27]. В результате напорных инъекций воды могла образоваться обширная площадь либо с множеством бугров пучения разного размера, либо один гигантский бугор, который в настоящее время, вероятно, разделён на отдельные фрагменты в результате активного термокарста на надпойменной террасе и термоэрозии берегов р. Сенца.

Текстурообразующие льды в суглинках по сравнению с прослоями льда более минерализованы, обогащены NH_4^+ и SO_4^{2-} . Данные компоненты не свойственны поверхностным водам региона. Накапливаясь эти компоненты во льду могли в результате взаимодействия воды с вмещающими озёрными отложениями до начала их промерзания. Естественный источник азотосодержащих веществ (в том числе аммония) во льду — органическое вещество животного происхождения — прижизненные выделения гидробактерий (бактерий, ракообразных и рыб), а также озёрные и озёрно-болотные отложения, избыточные органическими остатками.

Установлено несколько этапов вулканической активности на Окинском плоскогорье, датированных радиоуглеродным анализом растительных остатков и углей, а также дендрохронологическим анализом живой и погибшей древесины: I этап — 13 250–13 550, II — 7000–13 500, III — 4600–5450 и IV — 500–800 лет [28, 29]. Возможность увеличения содержания сульфатов в поверхностных и подземных водах обусловлена выбросом сернистых газов и пепла, а также выпадением кислотных дождей при вулканических извержениях. Радиоуглеродные датировки органических и древесных остатков, отобранных из отложений террасы, показывают, что озёрные суглинки, вмещающие бугры пучения, формировались в период от

4,7 до 7 тыс. лет назад [18]. В этот период вулканическая активность II и III этапов несомненно оказала определённое влияние на химический состав гидросферы и накапливающихся отложений.

Заключение

Многочисленные бугры пучения различных размеров или фрагменты одного бугра расположены на левой надпойменной террасе р. Сенца в зоне подпора, образованной конечной мореной позднплейстоценового возраста. Они сложены переслаивающимися озёрно-аллювиальными льдистыми суглинками, супесями и линзами чистого льда. Бугры пучения представляют собой криогенные образования, вероятно, смешанного сегрегационно-инъекционного генезиса, на что указывает их характерное строение — переслаивание линз чистого льда и льдистых рыхлых отложений.

Расплавы подземных льдов бугров пучения — ультрапресные и пресные. Минерализация чистого льда из линз и прослоев составляет 6,5–15,6 мг/дм³, в текстурообразующем льде она увеличивается на порядок. По химическому составу льды бугров пучения — гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные и аммонийно-гидрокарбонатные кальциевые. Специфика

геохимии подземных льдов обусловлена взаимодействием в системе вода — порода, наличием органики в рыхлых отложениях и, предположительно, неоднократной активизацией вулканизма в позднем плейстоцене—голоцене, в результате которой в составе поверхностных и подземных вод содержание таких компонентов, как сульфаты, возрастало.

Геохимический тип расплавов чистого льда и текстурообразующего подземного льда в целом одинаков — гидрокарбонатный кальциевый, а состав идентичен составу озёрных и речных вод. К общей черте химического состава льдов относится наличие ионов аммония, нитратов и нитритов. Однако минерализация чистого льда на порядок ниже солёности расплава ледогрунта (подземного льда и вмещающих пород).

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 16-05-00115. Авторы благодарны А.А. Рыбченко, А.А. Светлакову и А.В. Дубынину за существенную помощь в проведении полевых работ.

Acknowledgments. This study was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant № 16-05-00115. The authors thank A.A. Rybchenko, A.A. Svetlakov, and A.V. Dubynin for assistance with field works.

Литература

1. Волкова В.П., Романовский Н.Н. О химическом составе подземных льдов в четвертичных отложениях южной части Яно-Индибирской низменности // Проблемы криолитологии: Вып. 4. М.: Изд-во МГУ, 1974. С. 199–208.
2. Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 152 с.
3. Анисимова Н.П. Особенности гидрогеохимических исследований подземных льдов // Региональные геокриологические исследования в Восточной Азии. Якутск: изд. Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1983. С. 12–19.
4. Алексеева Л.П., Алексеев С.В., Кононов А.М. Геохимические особенности подземных текстурообразующих льдов алмазоносных районов Западной Якутии // Лёд и Снег. 2014. № 1 (125). С. 101–113.
5. Васильчук Ю.К., Алексеев С.В., Аржанников С.Г., Алексеева Л.П., Аржанникова А.В., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Чижова Ю.Н. Изотопный состав инъекционно-сегрегационной залежи в долине реки Сенца, Восточный Саян // ДАН. 2016. Т. 471. № 6. С. 697–702. doi: 10.7868/S0869565216360226.

References

1. Volkova V.P., Romanovskiy N.N. On chemical composition of ground ice in the Holocene sediments of south part of the Yana-Indigirka lowland. *Problemy kriolitologii*. Cryolithology Problems. M.: Moscow State University, 1974, 4: 199–208. [In Russian].
2. Anisimova N.P. *Kriogidrohimiicheskie osobennosti kriolitozony*. Cryohydrochemical peculiarities of cryolithozony. Novosibirsk: Nauka, 1981: 152 p. [In Russian].
3. Anisimova N.P. Specificity of ground ice researches. *Regionalnye geokriologicheskie issledovaniya v Vostochnoy Azii*. Regional geocryological studies in the Eastern Asia. Yakutsk: Institute of Permafrost Studies, Siberian Branch, USSR Academy of Sciences, 1983: 12–19. [In Russian].
4. Alekseeva L.P., Alexeev S.V., Kononov A.M. Geochemical features of texture-forming ground ice of diamondiferous areas of western Yakutia. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 1 (125): 101–113. [In Russian].
5. Vasil'chuk Yu.K., Alexeev S.V., Arzhannikov S.G., Alekseeva L.P., Arzhannikova A.V., Budantseva N.A., Vasilchuk A.C., Chizhova Yu N. Isotope composition of injective-segregative ice-ground bed in Sentsa river valley, East Sayan Mtn. *Doklady Akademii Nauk*. Proc. of

6. Iwahana G., Fukui K., Mikhailov N., Ostanin O., Fuj'ii Y. Internal structure of a lithalsa in the Akkol Valley, Russian Altai Mountains // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2012. V. 23. P. 107–118. doi: 10.1002/ppp.1734.
7. Wang B., French H.M. Permafrost on the Tibet Plateau, China // *Quaternary Science Reviews*. 1995. V. 14. P. 255–274.
8. Yoshikawa K., Natsagdorj Sh., Sharkhuu A. Groundwater hydrology and stable isotope analysis of an open-system pingo in Northwestern Mongolia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2013. V. 24. P. 175–183. doi: 10.1002/ppp.1773.
9. Ishikava M., Yamkhin J. Formation chronology of Arsain Pingo, Darhad Basin, Northern Mongolia // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016. V. 27. P. 297–306. doi: 10.1002/ppp.1877.
10. Mackay J.R. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula Area, Western Arctic Coast, Canada: A long-term field study // *Geographie physique et Quaternaire*. 1998. V. 52. P. 271–323.
11. Pissart A. Palsas, lithalsas and remnants of these periglacial mounds: a progress report // *Progress in Physical Geography*. 2002. V. 26. P. 605–621. doi: 10.1191/0309133302pp354ra.
12. Wolfe S.A., Stevens C.W., Gaanderse A.J., Oldenborger G.A. Lithalsa distribution, morphology and landscape associations in the Great Slave Lowland, Northwest Territories, Canada // *Geomorphology*. 2014. V. 204. P. 302–313. doi: org/10.1016/j.geomorph.2013.08.014.
13. Wünnemann B., Demske D., Tarasov P.E., Kotlia B.S., Bloemendal J., Diekmann B., Hartmann K., Reinhardt C., Riedel F., Arya N. Hydrological evolution during the last 15 kyr in the Tso Kar lake basin (Ladakh, India), derived from geomorphological, sedimentological and palynological records // *Quaternary Science Reviews*. 2010. V. 29. Is. 9–10. P. 1138–1155. doi: 10.1016/j.quascirev.2010.02.017.
14. Grosse G., Jones B.M. Spatial distribution of pingos in northern Asia // *The Cryosphere*. 2011. V. 5. P. 13–33. doi: 10.5194/tc-5-13-2011.
15. Алексеев С.В., Аржанников С.Г., Алексеева Л.П., Васильчук Ю.К. Бугры пучения в долине реки Сенца, Окинское плоскогорье, Восточный Саян // *Тр. Междунар. конф. Тюмень: Изд-во «Эпоха»*, 2015. С. 12–15.
16. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Васильчук Ю.К., Козырева Е.А., Светлаков А.А., Рыбченко А.А. Бугры пучения в долине реки Сенца, Окинское плоскогорье, Восточный Саян // *Успехи современного естествознания*. 2016. № 3. С. 121–126.
17. Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Васильчук Ю.К., Козырева Е.А., Светлаков А.А. Многолетняя мерзлота Очинского плоскогорья (Восточные Саяны) // *Материалы Пятой конф. геокриологов России (14–17 июня 2016 г., МГУ имени М.В. Ломоносова)*. Т. 2. М.: Университетская книга, 2016. С. 148–153.
18. Васильчук Ю.К., Алексеев С.В., Аржанников С.Г., Алексеева Л.П., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н., Аржанникова А.В., Васильчук А.К., Козырева Е.А., the Academy of Sciences. 2016, 471 (6): 697–702. doi: 10.7868/S0869565216360226. [In Russian].
6. Iwahana G., Fukui K., Mikhailov N., Ostanin O., Fuj'ii Y. Internal structure of a lithalsa in the Akkol Valley, Russian Altai Mountains. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2012, 23: 107–118. doi: 10.1002/ppp.1734.
7. Wang B., French H.M. Permafrost on the Tibet Plateau, China. *Quaternary Science Reviews*. 1995, 14: 255–274.
8. Yoshikawa K., Natsagdorj Sh., Sharkhuu A. Groundwater hydrology and stable isotope analysis of an open-system pingo in Northwestern Mongolia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2013, 24: 175–183. doi: 10.1002/ppp.1773.
9. Ishikava M., Yamkhin J. Formation chronology of Arsain Pingo, Darhad Basin, Northern Mongolia. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016, 27: 297–306. doi: 10.1002/ppp.1877.
10. Mackay J.R. Pingo growth and collapse, Tuktoyaktuk Peninsula Area, Western Arctic Coast, Canada: A long-term field study. *Geographie physique et Quaternaire*. 1998, 52: 271–323.
11. Pissart A. Palsas, lithalsas and remnants of these periglacial mounds: a progress report. *Progress in Physical Geography*. 2002, 26: 605–621. doi: 10.1191/0309133302pp354ra.
12. Wolfe S.A., Stevens C.W., Gaanderse A.J., Oldenborger G.A. Lithalsa distribution, morphology and landscape associations in the Great Slave Lowland, Northwest Territories, Canada. *Geomorphology*. 2014, 204: 302–313. doi: org/10.1016/j.geomorph.2013.08.014.
13. Wünnemann B., Demske D., Tarasov P.E., Kotlia B.S., Bloemendal J., Diekmann B., Hartmann K., Reinhardt C., Riedel F., Arya N. Hydrological evolution during the last 15 kyr in the Tso Kar lake basin (Ladakh, India), derived from geomorphological, sedimentological and palynological records. *Quaternary Science Reviews*. 2010, 29 (9–10): 1138–1155. doi: 10.1016/j.quascirev.2010.02.017.
14. Grosse G., Jones B.M. Spatial distribution of pingos in northern Asia. *The Cryosphere*. 2011, 5: 13–33. doi: 10.5194/tc-5-13-2011.
15. Alexeev S.V., Arzhannikov S.G., Alekseeva L.P., Vasil'chuk Yu.K. Bugry pucheniya v doline reki Sentsa, Okinskoe ploskogorie, Vostochnyi Sayan. *Trudy mezhdunar. konf. Frost mound in the Sentsa river valley, Oka plateau, East Sayan Mtn. Proc. of the Intern. Conf. Tyumen: Epoch*, 2015: 12–15. [In Russian].
16. Alekseeva L.P., Alexeev S.V., Vasil'chuk Yu.K., Kozyreva E.A., Svetlakov A.A. Frost mound in the Sentsa river valley, Oka plateau, East Sayan Mtn. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. *Advances in current natural sciences*. 2016, 3: 121–126. [In Russian].
17. Alekseeva L.P., Alexeev S.V., Vasil'chuk Yu.K., Kozyreva E.A., Svetlakov A.A. Permafrost of Oka Plateau (East Sayan Mnt.). *Materialy 5 konf. geokriologov Rossii*. Proc. of the 5th Conf. on the Permafrost of Russia (14–17 June 2016, Moscow State University). V. 2. Moscow: University Book, 2016: 148–153. [In Russian].
18. Vasil'chuk Yu.K., Alexeev S.V., Arzhannikov S.G., Alekseeva L.P., Budantseva N.A., Chizhova Yu N., Arzhannikova A.V., Vasilchuk A.C., Kozyreva E.A., Rybchenko A.A., Svetlakov A.A. Isotope composition of ice-ground core of mineral frost mounds in Sentsa river valley, East Sayan

- Рыбченко А.А., Светлаков А.А. Изотопный состав ледогрунтового ядра минеральных бугров пучения в долине реки Сенца, Восточный Саян // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 2. С. 52–66.
19. Vasil'chuk Yu.K., Alexeev S.V., Arzhannikov S.G., Alekseeva L.P., Budantseva N.A., Chizhova Ju N., Arzhannikova A.V., Vasilchuk A.C. Lithals in the Sentsa river valley, Eastern Sayan Mountains, Southern Russia // Permafrost and Periglacial Processes. 2016. V. 27. Is. 3. P. 285–296. doi: 10.1002/ppp.1876.
 20. Атлас Забайкалья (Бурятская АССР и Читинская область) / Гл. ред. В.Б. Сочава. М. –Иркутск: изд. ГУГК, 1967. 176 с.
 21. Аржанников С.Г., Броше Р., Жоливе М., Аржанникова А.В. К вопросу о позднеплейстоценовом оледенении юга Восточного Саяна и выделении конечных морен MIS 2 на основе бериллиевого датирования (^{10}Be) ледниковых комплексов // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 11. С. 1917–1933.
 22. Гидрогеология СССР: Т. XXII. Бурятская АССР. М.: Недра, 1970. 432 с.
 23. Светлаков А.А., Козырева Е.А., Алексеев С.В. Температурный режим многолетнемерзлых грунтов в долине р. Сенца // Материалы XXVII Всерос. молодёжной конф. с участием исследователей из других стран «Строение литосферы и геодинамика». Иркутск: изд. Ин-та земной коры СО РАН, 2017. С. 205–206.
 24. Резников А.А., Муликовская Е.П., Соколов И.Ю. Методы анализа природных вод. М.: Недра, 1970. 488 с.
 25. Основы гидрогеологии: Общая гидрогеология. Новосибирск: Наука, 1980. 225 с.
 26. Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.
 27. Втюрина Е.А., Втюрин Б.И. Льдообразование в горных породах. М.: Наука, 1979. 279 с.
 28. Рассказов С.В., Логачев Н.А., Брандт И.С., Брандт С.Б., Иванов А.В. Геохронология и геодинамика позднего кайнозоя (Южная Сибирь – Южная и Восточная Азия). Новосибирск: Наука, 2000. 288 с.
 29. Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., Demonterova E.I., Arzhannikova A.V., Orlova L.A. Jom-Bolok Holocene volcanic field in the East Sayan Mts., Siberia, Russia: structure, style of eruptions, magma compositions, and radiocarbon dating // Bulletin of Volcanology. 2011. V. 73. P. 1279–1294. doi: 10.1007/s00445-011-0485-9.
 - Mtn. Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere. 2015, 19 (2): 52–66. [In Russian].
 19. Vasil'chuk Yu.K., Alexeev S.V., Arzhannikov S.G., Alekseeva L.P., Budantseva N.A., Chizhova Ju N., Arzhannikova A.V., Vasilchuk A.C. Lithals in the Sentsa river valley, Eastern Sayan Mountains, Southern Russia. Permafrost and Periglacial Processes. 2016, 27 (3): 285–296. doi: 10.1002/ppp.1876.
 20. Atlas Zabaikaliya (Buryatskaya ASSR i Chitinskaya oblast'). Atlas of Transbaikalia (Buryat ASSR and Chita region). Ed. V.B. Sochava. Moscow–Irkutsk: GUGK, 1967: 176 p. [In Russian].
 21. Arzhannikov S.G., Broshe R., Zholive M., Arzhannikova A.V. To the problem of Late Pleistocene glaciation of south of the East Sayan and distinguish of end moraines MIS 2 on the base of beryllium dating (^{10}Be) of glacial complexes. *Geologiya i geofizika*. Geology and Geophysics. 2015, 56 (11): 1917–1933. [In Russian].
 22. *Gidrogeologiya SSSR. Tom XXII. Buryatskaya ASSR*. Hydrogeology of the USSR. V. XXII. Buryat ASSR. Moscow: Nedra, 1970: 432 p. [In Russian].
 23. Svetlakov A.A., Kozyreva E.A., Alexeev S.V. Thermal regime of permafrost in the Sentsa river valley. *Materialy XXVII vseros. molod. konf. s ychastiem issledovately iz drugich stran «Stroenie litosfery i geodinamika»*. Irkutsk: Institute of Earth Crust, Siberian Branch of RAS, 2017: 205–206 p. [In Russian].
 24. Reznikov A.A., Mulikovskaya E.P., Sokolov I.Yu. *Metody analiza prirodnykh vod*. Methods of natural water analyses. Moscow: Nedra, 1970: 488 p. [In Russian].
 25. *Osnovy gidrogeologii: Obshchaya gidrogeologiya*. Hydrogeology basis: General hydrogeology. Novosibirsk: Nauka, 1980: 225 p. [In Russian].
 26. Shumsky P.A. *Osnovy strukturnogo ledovedeniya*. Principles of structural ice study. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1955: 492 p. [In Russian].
 27. Vtyurina Ye.A., Btyurin B.I. *L'doobrasovanie v gornyykh porodakh*. Ice formation in the rocks. M.: Nauka, 1979: 279 p. [In Russian].
 28. Rasskazov S.V., Logachev N.A., Brandt I.S., Brandt S.B., Ivanov A.V. *Geokhronologiya i geodinamika pozdnego kainozoya (Yuzhnaya Sibir' – Uzhnaya i Vostochnaya Aziya)*. Geochronology and geodynamics of Late Cenozoic (South Siberia – South and East Asia). Novosibirsk: Nauka, 2000: 288 p. [In Russian].
 29. Ivanov A.V., Arzhannikov S.G., Demonterova E.I., Arzhannikova A.V., Orlova L.A. Jom-Bolok Holocene volcanic field in the East Sayan Mts., Siberia, Russia: structure, style of eruptions, magma compositions, and radiocarbon dating. *Bulletin of Volcanology*. 2011, 73: 1279–1294. doi: 10.1007/s00445-011-0485-9.