

УДК 551.345.3

БУГРЫ ПУЧЕНИЯ В ДОЛИНЕ РЕКИ СЕНЦА, ОКИНСКОЕ ПЛОСКОГОРЬЕ, ВОСТОЧНЫЙ САЯН

¹Алексеев С.В., ¹Алексеева Л.П., ²Васильчук Ю.К., ¹Козырева Е.А.,
¹Светлаков А.А., ¹Рыбченко А.А.

¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, e-mail: salex@crust.irk.ru;

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Москва, e-mail: vasilch_geo@mail.ru

Впервые исследованы бугры пучения в долине р. Сенца на Окинском плоскогорье Восточного Саяна. Охарактеризованы состав и текстуры вмещающих отложений и температурный режим сезонноталого слоя, морфология и структура одного из крупных бугров, химический состав льда, слагающего его ядро. Для режимных температурных наблюдений на одном из крупных бугров пучения в долине р. Сенцы пробурена скважина глубиной 4,8 м. Установлено, что с поверхности бугор пучения сложен переслаивающимися льдистыми суглинками и линзами чистого льда. Криотекстуры грунта слоистые, косослоистые, тонкошлировые, крупносетчатые, базальные. Химический состав расплавов линз подземного льда HCO_3 и $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Ca с минерализацией 6,5–153 мг/дм³. В вертикальном изотопном профиле вариации стабильных изотопов водорода и кислорода составляют: $\delta\text{D} - 157,9 \dots -142,7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O} - 20,27 \dots -18,61\text{‰}$, а d_{exc} изменяется от 11,78 до 2,58‰. Мерзлота в долине р. Сенца представлена льдистыми озерно-аллювиальными отложениями. Температура пород в активном слое на глубине 4,4 м понижается до $-1,6^\circ\text{C}$. В ходе промерзания отложений происходило формирование бугров пучения. Сформулирован вывод о том, что изученный бугор пучения сформировался в результате как сегрегационного, так и инъекционного льдообразования в рыхлых озерно-аллювиальных отложениях.

Ключевые слова: бугор пучения, многолетняя мерзлота, ледогрунт, инъекционный лед, сегрегационный лед, Восточный Саян

FROST MOUNDS IN THE SENTSA RIVER VALLEY, THE OKA PLATEAU, EAST SAYAN MTS

¹Alekseev S.V., ¹Alekseeva L.P., ²Vasilchuk Y.K., ¹Kozyreva E.A.,
¹Svetlakov A.A., ¹Rybchenko A.A.

¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, e-mail: salex@crust.irk.ru;

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, e-mail: vasilch_geo@mail.ru

Research has been conducted on the permafrost in the Sentsa River valley for the first time. The features of the permafrost that have been investigated are cryogenic structure of unconsolidated deposits and active layer temperature, the morphology and structure of large frost mound and the chemical composition of the core ice. On one of the large frost mound in the Sentsa River valley the borehole was drilled to a depth of 4,8 m for the regime geothermal observations. From the surface the frost mound consists of interlayering silts, ice-rich clayey silts and pure ice lenses, cryostructures are layered, cross-laminated, lenticular, reticulate and basal. The chemical composition of ground ice is HCO_3 and $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ Ca with salinity of 6,5–153 mg/L. The vertical isotope variations are from $-157,9$ to $-142,7\text{‰}$ δD , from $-20,27$ to $-18,61\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$, and 11,78 to 2,58‰ d_{exc} . The permafrost in the Sentsa River Valley is presented by ice-rich lacustrine-alluvial deposits. The active layer temperature decreases to $-1,6^\circ\text{C}$ at a depth of 4,4 m. Frost mounds were formed during sediments freezing. It has a cryogenic formation probably mixed segregation-injection genesis.

Keywords: frost mound, permafrost, ice-ground, intrusive ice, segregated ice, East Sayan Mountains

Бугры пучения – характерные образования в криолитозоне, формирующие специфический криогенный рельеф. Их возникновение обусловлено сегрегационным либо инъекционным льдообразованием в рыхлых отложениях или сочетанием этих процессов. Бугры пучения каждого генетического типа имеют особое строение, форму в плане и разрезе, особенности развития и время существования. Они широко развиты как в северной, так и южной геокриологических зонах.

В ходе проведения комплексных научно-исследовательских работ на Окинском плоскогорье Восточного Саяна в долине

р. Сенца впервые обнаружена серия крупных бугров пучения. В настоящее время генезис этих бугров является предметом дискуссии.

Район исследования

Окинское плоскогорье находится в восточной части Восточного Саяна. Оно расположено на высоте 1800–2400 м над уровнем моря и является водосбором Иркутка, Оки, Китоя, Урика. Приток р. Оки – Сенца – прорезает Окинское плоскогорье на глубину 800 м (рис. 1). Долина р. Сенца представляет собой классический трог с элементами ледникового рельефа в виде боковых и конечных морен позднелейстоценового возраста [5].

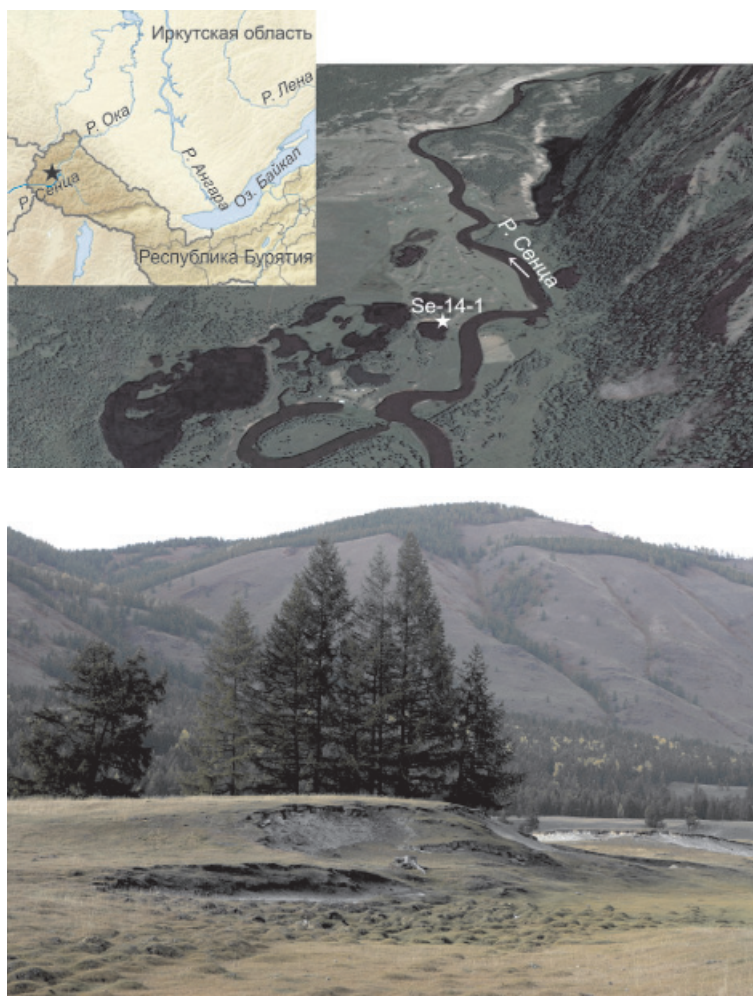


Рис. 1. Долина р. Сенца (Окинское плоскогорье, Восточный Саян, Республика Бурятия, фото с сайта Google Earth) и бугры пучения в долине

Меандрирующее русло реки и большое количество стариц и озер свидетельствуют о перегруженности долины осадочным материалом. Отложения аллювиального, озерного, гляциального, делювиального и пролювиального генезиса, выполняющие долину реки, представлены суглинками, супесями, песками, галечниками, валунами. Мелкозернистые отложения, формировавшиеся в озерных котловинах и речной долине при низких скоростях течения воды, явились благоприятной средой для активизации процессов пучения поверхности поймы и террасы р. Сенца в период многолетнего промерзания.

Климат в пределах Окинского плоскогорья резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха в зависимости от абсолютной высоты изменяется от $-5,6^{\circ}\text{C}$ (1372 м) до $-6,6^{\circ}\text{C}$ (2084 м) [3]. Криолитозона имеет сплошное распространение с тен-

денцией уменьшения в западном и северо-северо-восточном направлениях. Сплошность криолитозоны нарушается сквозными таликами в зонах разломов, которые картируются постояннодействующими источниками подземных вод, и несквозными таликами, связанными с отепляющим влиянием поверхностных водотоков и водоемов.

Мощность многолетнемерзлых пород на междуречных пространствах в среднем равна 170–200 м, а в долинах рек составляет 140–180 м. Среднегодовая температура мерзлых пород изменяется в пределах $-3 \dots -8,5^{\circ}\text{C}$ [4]. Сезонно протаивающий слой на междуречных пространствах имеет мощность 1,0–1,5 м, достигая 3,5 м на южных склонах.

В основу настоящей статьи положены материалы полевых исследований бугров пучения 2011–2015 гг., которые включали полевые маршрутные исследования, вскрытие, расчистку и детальную документацию

разрезов с зарисовками и фотографированием, отбор образцов грунта и подземного льда из ядра бугра пучения. Для организации в центральной части круглогодичных температурных наблюдений была пробурена скважина бугра пучения глубиной 4,8 м, которая оборудована логгерами (одноканальными датчиками марки НОВО UA-001-64) на глубине 0,1; 1; 2; 3 и 4 м. В лабораторных условиях в ЦКП «Геодинамика и геохронология» (г. Иркутск) выполнен анализ химического состава расплавов льда и физическо-механических характеристик грунтов (гранулометрический и микроагрегатный состав) по стандартным методикам. Для определения вариаций стабильных изотопов водорода и кислорода в ледогрунтовым ядре бугра был произведён поинтервальный отбор образцов из вскрытого разреза и из скважины (через 10–20 см). Изотопные определения выполнялись в изотопной лаборатории географического факультета

МГУ на масс-спектрометре Delta-V со стандартной опцией газ-бенч. Для измерений использовали международный стандарт среднеокеанической воды V-SMOW ($\delta^{18}\text{O} = 0\text{‰}$, $\delta\text{D} = 0\text{‰}$), международный стандарт GISP ($\delta^{18}\text{O} = -24,76\text{‰}$, $\delta\text{D} = -189,5\text{‰}$) лабораторные стандарты МАГАТЭ (IAEA 12, $\delta^{18}\text{O} = -12,10\text{‰}$, $\delta\text{D} = -85,9\text{‰}$; IAEA 13, $\delta^{18}\text{O} = -33,35\text{‰}$, $\delta\text{D} = -257,2\text{‰}$), собственный лабораторный стандарт МГУ – снег ледника Гарабаши ($\delta^{18}\text{O} = -15,60\text{‰}$, $\delta\text{D} = -110,0\text{‰}$). Точность определений $\delta^{18}\text{O}$ составила 0,1‰, а $\delta\text{D} - 0,6\text{‰}$.

Строение бугра пучения

Один из крупных изученных бугров пучения (Se-14-1) высотой 10,7 м (по наклонной поверхности) с ледогрунтовым ядром находится на левой надпойменной террасе р. Сенца, примыкая к озеру, предположительно термокарстового происхождения. Подробный разрез бугра представлен на рис. 2.

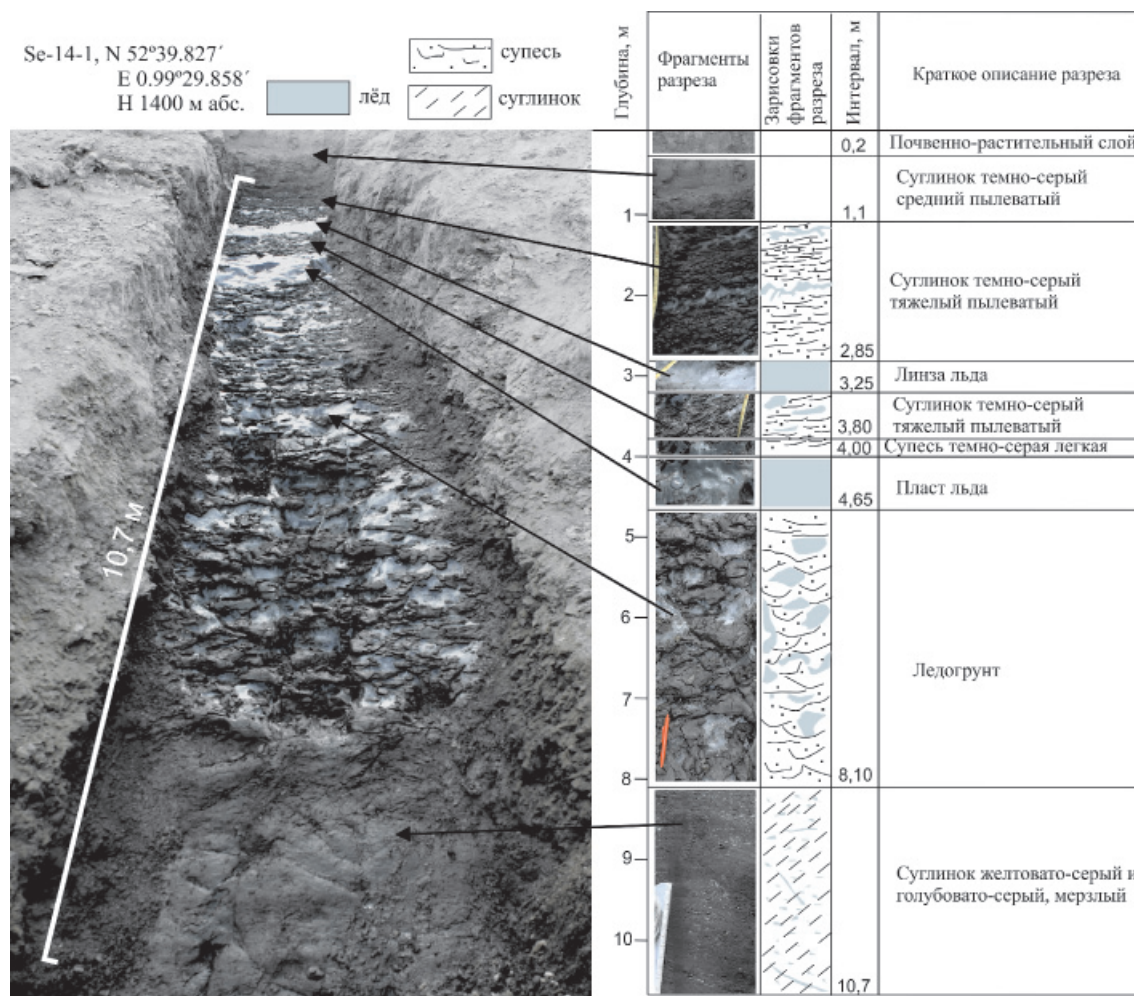


Рис. 2. Фото и зарисовки фрагментов разреза бугра пучения (Se-14-1) в долине р. Сенца

Описание разреза (по наклонной поверхности):

0–0,2 м – почвенно-растительный слой.

0,2–0,6 м – суглинок; однородная буровато-серая толща с редкими железистыми вертикальными и наклонными прожилками сменяется темно-серым суглинком.

0,6–1,1 м – суглинок темно-серый средний пылеватый, микроструктура – агрегированно-скелетная. Глинистость суглинка 21,2%.

1,1–2,85 м – суглинок темно-серый тяжелый пылеватый, микроструктура – агрегированно-скелетная. Глинистость суглинка 29,7%. Мерзлый, неравномерно льдистый. В верхней части шпирь льда имеют толщину до 10 мм; в средней части, на глубине около 2 м – толщина линз и прослоев льда достигает 15 мм. Криотекстура грунта слоистая, чешуйчатая.

2,85–3,25 м – линза льда. Лёд молочно-белого цвета, с редкими включениями кусочков грунта размером 2–3 см.

3,25–3,80 м – суглинок темно-серый тяжелый пылеватый, микроструктура – агрегированно-скелетная. Глинистость суглинка 30,5%. Мерзлый. В массе грунта выделяются блоки (до 10 мм) и линзы льда (до 5–8 мм). В интервале 3,25–3,60 м криотекстура грунта базально-слоистая.

3,80–4,0 м – супесь темно-серая легкая.

Микроструктура – агрегированно-скелетная. Мерзлая. Криотекстура слоисто-чашуйчатая.

4,0–4,65 м – пласт льда. Лед – прозрачный, с многочисленными пузырьками округлой и вытянутой формы и обломками грунта.

4,65–8,10 м – ледогрунт. В массе льда «плавают» блоки грунта – темно-серой супеси. Прослой и линзы льда имеют толщину 5–7 см, прослой грунта – 3–7 см. Видимая льдистость 60–70%. Криогенная текстура – крупношлировая и местами базальная. При вытаивании ледяных прослоев грунт имеет вид «слоеного пирога».

8,10–10,7 м – суглинок желтовато-серый и голубовато-серый, мерзлый. Криотекстура в основном массивная и тонкошлировая, редкие шпирь толщиной 1–2 мм расположены неравномерно (наклонно и горизонтально).

Химический состав льда

Химический состав расплавов из ледяных линз и пластов в теле бугра пучения – гидрокарбонатный кальциевый с минерализацией 6,5–11,2 мг/дм³, рН = 5,6–6,1 (таблица). Минерализация текстурообразующего льда в нижележащем ледогрунте (желтовато-серых и голубоватых суглинках) гораздо выше – 153 и 128 мг/дм³.

Химический состав подземного льда из бугра пучения на р. Сенца и речных вод

Глубина и место отбора пробы, м	рН	мг/дм ³ Ионный состав: мг-экв/дм ³ %-экв.											Сумма ионов, мг/дм ³
		NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	H ₄ SiO ₄	
2,1–2,2 (лед)	6,15	0,30	0,42	0,39	0,12	0,60	1,06	<2,00	7,32	1,00	<0,44	<2,00	11,22
		0,02	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03		0,12	0,02			
		19,72	12,74	20,11	11,86	35,57	17,47		69,87	12,66			
2,9–3,3 (лед)	5,65	0,10	0,15	0,21	0,12	0,60	1,06	<2,00	4,27	<0,01	<0,44	<2,00	6,52
		0,01	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03		0,07				
		9,47	6,56	15,61	17,09	51,27	30,00		70,00				
4,1–4,3 (ледогрунт)	6,75	12,50	2,35	1,57	2,68	15,43	1,06	36,62	58,58	0,05	<0,44	22,00	152,84
		0,69	0,06	0,07	0,22	0,77	0,03	0,76	0,96	0,00			
		38,25	3,32	3,77	12,15	42,51	1,71	43,48	54,75	0,06			
5,2–5,3 (ледогрунт)	6,6	8,75	1,84	1,26	1,82	14,43	1,06	30,45	52,48	0,25	0,44	15,00	127,78
		0,49	0,05	0,05	0,15	0,72	0,03	0,63	0,86	0,01	0,01		
		33,29	3,23	3,76	10,30	49,42	1,95	41,26	55,97	0,35	0,46		
Термо-карстовое озеро (2,9 м)	7,25	<0,10	1,71	1,34	3,40	30,46	1,06	17,08	93,97	0,75	<0,44	10,00	159,78
			0,04	0,06	0,28	1,52	0,03	0,36	1,54	0,02			
			2,30	3,06	14,72	79,92	1,54	18,31	79,30	0,84			
Речная вода (р. Сенца)	7,65	<0,10	0,83	1,28	1,95	17,84	1,06	5,55	63,46	<0,01	0,44	7,00	99,40
			0,02	0,06	0,16	0,89	0,03	0,12	1,04		0,01		
			1,88	4,94	14,20	78,98	2,52	9,69	87,20		0,60		
Речная вода (р. Ока)	7,85	<0,10	0,51	1,03	4,01	22,44	1,06	7,00	85,43	<0,01	0,44	10,00	131,93
			0,01	0,04	0,33	1,12	0,03	0,15	1,40		0,01		
			0,87	2,97	21,89	74,28	1,90	9,21	88,45		0,45		

Содержание основных ионов, формирующих геохимический тип подземного льда, Ca^{2+} и HCO_3^- с глубиной не испытывает колебаний, составляя 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 с поверхности бугра до глубины 4 м происходит за счет роста доли сульфатов – до 43%-экв и аммония – до 38%-экв, в результате чего химический тип льда становится сульфатно-гидрокарбонатным. Концентрации Na^+ и Cl^- вниз по разрезу уменьшаются до 1–3%-экв.

Вода в термокарстовом озере у подножья бугра пучения и в рр. Сенца и Ока имеет гидрокарбонатный кальциевый состав и минерализацию 99–160 мг/дм³.

Изотопный состав льда

В ледогрунтовой залежи, опробованной во вскрытом разрезе бугра пучения, значения δD изменяются от –136,9 до –153,6‰, значения $\delta^{18}\text{O}$ от –18,44 до –20,15‰, а d_{exc} составляет от 15,44 до 4,12‰. Изотопически более тяжелым является лед нижнего пласта – здесь значения $\delta^{18}\text{O}$ во всех образцах выше –19‰, а δD выше –146‰ [2].

В ледогрунтовой залежи, опробованной в скважине в интервале глубины 2,5–4,75 м, диапазон изотопных вариаций несколько уже. В вертикальном профиле вариации стабильных изотопов водорода и кислорода составляют: δD –157,9...–142,7‰, $\delta^{18}\text{O}$ –20,27...–18,61‰, а d_{exc} изменяется от 11,78 до 2,58‰ (рис. 3). В скважине не зафиксировано столь высоких изотопных значений, как отмечалось в ледяной линзе разреза. Это, возможно, указывает на то, что скважиной вскрыто ледогрунтовое ядро ближе к его периферийной части. Здесь закономерно залегают изотопически более легкий лед.

Режимные геотермические наблюдения в течение года в скважине показали, что наибольшие вариации температуры происходят в интервале 0–2 м. Глубже двух метров в годовом цикле температура горных пород отрицательная. На глубине 4,4 м она изменяется от –0,8 до –1,6°C.

Дискуссия

Бугры пучения различных размеров хаотично расположены в долине р. Сенца (рис. 1). В основном они приурочены к области распространения суглинистых озерных отложений в зоне подпора, образованного барражом неопределенного генезиса (обвалы, залповые выбросы материала из боковых долин и др.).

В голоцене после спуска древнего озера водонасыщенные отложения подверглись прогрессирующему всестороннему промерзанию.

При миграции влаги в сезонноталом или сезонномерзлом слоях происходило сегрегационное льдовыделение, приводившее к пучению рыхлых отложений. Сегрегационное льдовыделение, возможно, сопровождалось дополнительным притоком воды, которая при благоприятных условиях (наличие в грунтовой толще ослабленных литологических контактов, неоднородностей, возросшее артезианское давление и т.д.) внедрялась в рыхлые отложения и при замерзании формировала инъекционный лед. В результате могла образоваться обширная площадь с множеством бугров пучения разного размера либо один гигантский бугор, который в настоящее время, вероятно, разделен на отдельные фрагменты вследствие активного термокарста на надпойменной террасе и термоэрозии берегов р. Сенца.

Приуроченность бугра пучения к озерно-аллювиальным отложениям р. Сенца, местами заболоченным, является свидетельством формирования его ядра в результате не только сегрегационного льдообразования при промерзании водонасыщенных осадков, но и неоднократного внедрения вод подруслового и пойменного водоносных горизонтов, гидравлически связанных с речными водами. Линзы чистого льда мощностью 40 см на глубине 2 м и 65 см на глубине 3 м образовались, видимо, в результате наиболее мощных напорных инъекций воды, что привело к дополнительному росту бугра пучения. Текстурообразующий лед нижележащих суглинков по сравнению со льдом этих линз более минерализован, обогащен NH_4^+ и SO_4^{2-} , что свидетельствует о разных источниках воды, сформировавшей эти льды. Естественными источниками азотосодержащих веществ (в том числе аммонийных солей) в водах служит органическое вещество животного происхождения – прижизненные выделения гидробионтов (бактерий, ракообразных и рыб) и озерные и озерно-болотные отложения, изобилующие органическими осадками. Обогащение воды сульфатами могло произойти за счет атмосферных осадков, насыщенных вулканическими газами в результате активной вулканической деятельности на Окинском плоскогорье 13 тыс. лет назад [1, 6]. Однако вопрос об источнике воды, сформировавшей линзы чистого льда, остается открытым, в основном из-за очень низкой минерализации расплавов льда, которая характерна для атмосферных осадков.

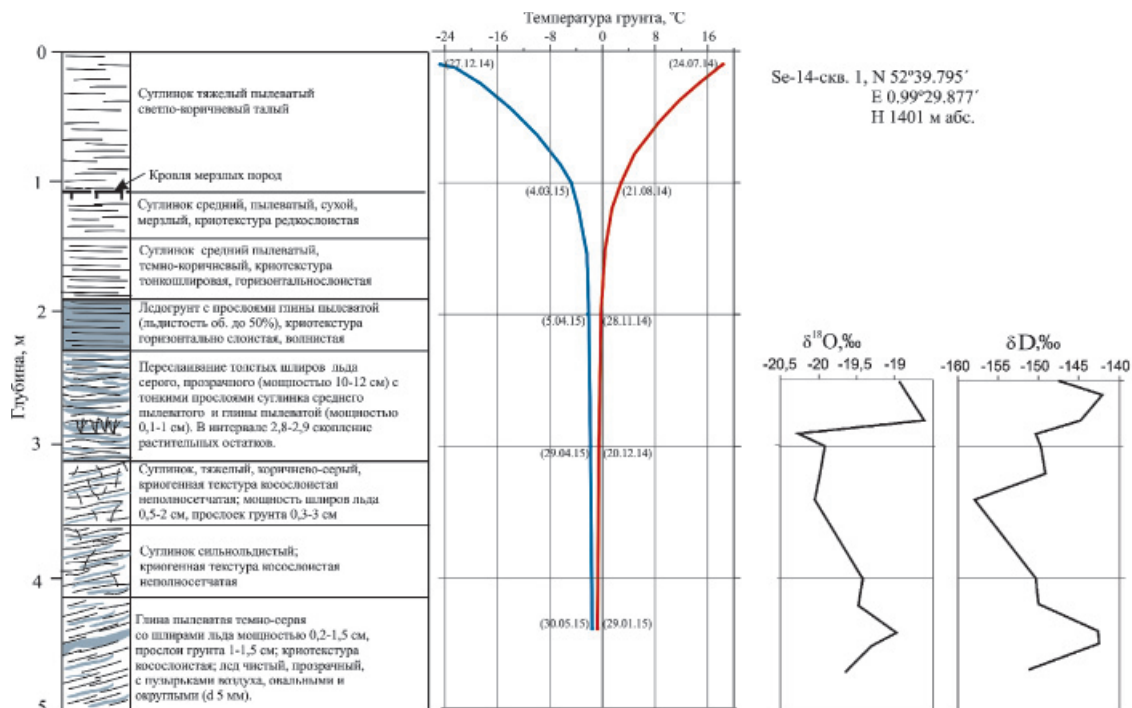


Рис. 3. Литология, температура пород и изотопный состав подземного льда бугра пучения

Незначительные вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD также дают основание предположить интенсивный приток новых порций воды в ходе промерзания и образования бугра пучения, т.е. формирование ледяных пластов происходило в условиях открытой системы с подтоком воды извне. Заметного изотопного фракционирования в процессе промерзания и шлирового льдообразования не происходило. Значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD очень близки к изотопным значениям для современных среднезимних и позднесенних атмосферных осадков. Они прямо указывают на голоценовый возраст льда.

Заключение

Изученный бугор пучения, один из многих, обнаруженных в пределах долины р. Сенца, представляет собой криогенное образование, вероятно, смешанного сегрегационно-инъекционного генезиса. Об этом свидетельствуют его строение (переслаивание линз и пластов чистого льда и мерзлого

неравномерно льдистого грунта со слоистой, чешуйчатой и базально-слоистой криотекстурой) и химический состав расплавленного льда в ядре бугра, отражающий неоднократную инъекцию вод.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 16-05-00115.

Список литературы

1. Аржанников С.Г., Иванов А.В., Аржанникова А.В., Демонтерова Е.И. Долина вулканов в Восточном Саяне // Наука из первых рук. – 2013. – № 5/6 (53/54). – С. 66–83.
2. Васильчук Ю.К., Алексеев С.В., Аржанников С.Г., Алексеева Л.П., Буданцева Н.И., Чижова Ю.Н. и др. Изотопный состав ледогрунтового ядра минеральных бугров пучения в долине реки Сенца, Восточный Саян // Криосфера Земли. – 2015. – Т. XIX, № 2. – С. 52–66.
3. Геокриология СССР. Горные страны юга СССР / под ред. Э.Д. Ершова. – М.: Недра, 1989. – 360 с.
4. Гидрогеология СССР. Том XXII. Бурятская АССР. – М.: Недра, 1970. – 432 с.
5. Олонин В.Н. Неотектоника и оледенение Восточного Саяна. – М.: Наука, 1965. – 127 с.
6. 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.