

КРИОГЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ И ОБРАЗОВАНИЯ

УДК 551.345.2

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ЛЕДОГРУНТОВОГО ЯДРА МИНЕРАЛЬНЫХ БУГРОВ  
ПУЧЕНИЯ В ДОЛИНЕ РЕКИ СЕНЦА, ВОСТОЧНЫЙ САЯН

Ю.К. Васильчук, С.В. Алексеев\*, С.Г. Аржанников\*, Л.П. Алексеева\*, Н.А. Буданцева,  
Ю.Н. Чижова, А.В. Аржанникова\*, А.К. Васильчук, Е.А. Козырева\*, А.А. Рыбченко\*,  
А.А. Светлаков\*

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический и геологический ф-ты,  
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; vasilch@geol.msu.ru, vasilch\_geo@mail.ru  
\* Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия*

Изучены ледоминаральные бугры пучения (литальза) в долине р. Сенца (Восточный Саян, западная Бурятия). Это первое детальное исследование многолетнемерзлых пород в данном регионе, которое основано на анализе криогенного строения и распределения стабильных изотопов кислорода и водорода во льду ледогрунтовых ядер бугров инъекционно-сегрегационного типа. В криогенном строении бугров преобладают сетчатые и ленточные криогенные текстуры, льдистость грунтов превышает 50–60 %. Вертикальное и латеральное распределение стабильных изотопов кислорода и водорода свидетельствует о каскадности формирования ледоминаральных залежей, в результате ледоминаральное ядро большого бугра образовалось на первом этапе, небольшого бугра – на втором этапе. Зарождение и начальный рост ледоминаральных бугров может происходить на стадии обмеления озерного водоема. Питание литальза водой идет в основном при промерзании водонасыщенных дисперсных грунтов, кроме того, существуют бугры-литальза с частично атмосферным и озерным типами питания. Скорость роста литальза, как правило, достаточно высока и составляет десятки сантиметров в год. Высота литальза возрастом 50–100 лет может достигать 5 м и более.

*Минеральные бугры пучения, многолетнемерзлые бугры, Восточный Саян, мерзлотное пучение, сегрегационный лед, инъекционный лед, внутренняя текстура, сетчатая криотекстура, мощные ледяные линзы*

ISOTOPE COMPOSITION OF LITHALSA ICE CORE  
IN SENTSA RIVER VALLEY, EASTERN SAYAN

Yu. K. Vasil'chuk, S. V. Alexeev\*, S. G. Arzhannikov\*, L. P. Alexeeva\*, N. A. Budantseva, Ju. N. Chizhova,  
A. V. Arzhannikova\*, A. C. Vasil'chuk, E. A. Kozyreva\*, A. A. Rybchenko\*, A. A. Svetlakov\*

*Lomonosov Moscow State University, Department of Geography and Geology,  
119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, Russia; vasilch@geol.msu.ru, vasilch\_geo@mail.ru  
\* Institute of the Earth Crust, SB RAS, 664033, Irkutsk, Lermontov str., 128, Russia*

A lithalsa has been studied in the Sentsa River valley, Eastern Sayan, Buryatia. This is the first detailed study of permafrost in this region, which is based on the analysis of cryostructure and distribution of stable isotopes of oxygen and hydrogen from ice and ice-soil core of the lithalsa of injection-segregation-type. The reticulate chaotic and lenticular cryostructures dominate in the core of the lithalsa. The ice content exceeds 50–60 %. The vertical and lateral distribution of the stable isotopes of oxygen and hydrogen favors the cascade lithalsa formation: at the first stage the ice-soil core of large lithalsa formed. The ice-soil core of small lithalsa formed at the second stage. Nucleation and initial growth of lithalsa can occur at the stage of shallowing of the lake reservoir. The water feeding of lithalsa takes place mainly due to ground water from freezing suspension, but lithalsa with atmospheric and lacustrine type of feeding may also occur. The growth rate of lithalsa is usually quite high and often reaches tens of centimeters per year. Lithalsas of 50–100 years old are usually more than 5 meters in height.

*Lithalsa, perennial frost mound, Eastern Sayan, frost heave, segregated ice, intrusive ice, internal structure, reticulate cryostructures, thick ice lenses*

## ВВЕДЕНИЕ

Криогенное пучение порождает разнообразные многолетние мерзлотные формы. Бугры с ледяным ядром чаще относятся к булгунням (гидролакколита, пинго). Большинство бугров с сильнольдистым ядром, перекрытым торфом, относится к миграционным буграм пучения, или пальза [Ушборн, 1988; Васильчук, 2008].

Для обозначения бугров, сложенных только мерзлыми минеральными грунтами, использовались термины “минерогенные пальза” [Åhman, 1976], “минеральные пальза” [Dionne, 1978], “пальзоподобный бугор” [Harris, 1993], “криогенные бугры” [Lagarec, 1982] и “минеральный многолетнемерзлый бугор” [Allard et al., 1986]. По аналогии с сильнольдистыми буграми, перекрытыми торфом, называемыми пальза, А. Писсар [Pissart, 2002] ледо-минеральные бугры предпочитает называть *литальза* (lithalsa).

Системное изучение ледо-минеральных бугров на территории российской криолитозоны пока не проводилось, а их встречаемость принято было связывать с разрушением некогда перекрывавших бугры торфяных покровов. Первым опытом таких исследований на современном этапе можно считать изучение японскими геокриологами Г. Ивахана и К. Фукуи совместно с алтайскими геологами Н. Михайловым и О. Останиным тебелеров в котловине оз. Акколь. Минеральные с поверхности бугры с сильнольдистым ядром в горных долинах Алтая называются тебелерами (от тюрк. – холм, макушка, вершина). В центральной части Чуйской впадины на буграх пучения голоценового возраста расположен пос. Тебелер. Тебелеры известны во многих высокогорных котловинах Южной Сибири. Особенно хорошо тебелеры изучены в днищах спущенных котловинных ледниково-подпрудных озер в Чуйской и Курайской впадинах. В Курайской котловине в урочище Джангысколь находится большое поле булгунняхов-тебелеров, ядра которых сильнольдистые или содержат мощные прослои чистого льда [Iwahana et al., 2012].

Ледо-минеральные бугры (литальза) исследованы Ф. Кальмелем с участием Г. Делиля и М. Алларда [Allard, Rousseau, 1999; Delisle et al., 2003; Calmels et al., 2008a, b] в Нунавике, Инуитская территория (абс. высота 160–185 м) северного Квебека к востоку от Гудзонова залива (56°36' с.ш., 76°12' з.д.). Район исследований расположен в области прерывистого распространения многолетнемерзлых пород. Исследуемый участок располагался в заболоченной долине, сложенной с поверхности голоценовыми морскими суглинками, отличительной особенностью которой являлось сочетание на одной территории пальза и литальза. Среднегодовая температура воздуха, по данным метеостанции в Шелдрейке, в 6 км от исследуемого участка за период 1990–2003 гг. варьировала от

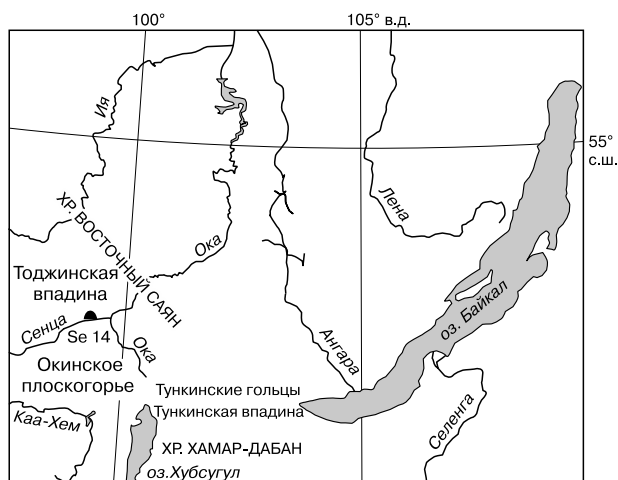
–2,7 до –7,5 °С, в среднем составляла –5,1 °С. Высота бугров здесь варьирует от 2 до 8 м, диаметр 50–100 м [Delisle et al., 2003; Calmels et al., 2008a, b]. Они сложены, как правило, суглинками и илами, иногда с прослоями заиленных песков. Засоленность и содержание органики незначительны. Объемная льдистость пород изменяется от 50 до 71 %, в одном из массивов бугров на глубине более 4 м она превышает 95 %, здесь встречены и линзы чистого льда. Содержание газов составило от 0,4 до 2–3 %. Компьютерно-томографический анализ многочисленных ледяных ядер бугров-литальза показал преимущественно сетчатую криотекстуру, при этом ядра имеют форму неправильных многогранников [Calmels, Allard, 2008].

Особенно крупным районом распространения бугров типа литальза является долина р. Большая Невольничья и окрестности оз. Большое Невольничье (Great Slave Lake) в Канаде. Закартировано около 1800 бугров высотой до 8 м и диаметром несколько сотен метров. Здесь литальза в основном приурочены к возвышенностям выше 205 м над уровнем моря и обычно встречаются на участках прерывистого существования многолетнемерзлых пород и распространения глин и илов, также важно отметить наличие обильных подземных вод [Wolfe et al., 2014].

Интересно, что литальза высотой 6–10 м позднеголоценового возраста с толстыми шпирями льда, активно развивающиеся в последние 60 лет, встречены в котловине соленого озера Цо Кар, в Ладакхе, в горах Малого Тибета, в Индии (33°18' с.ш., 78°00' в.д.) на высоте 4527 м над уровнем моря [Wünnemann et al., 2008, 2010].

Ранее подобные формы были обнаружены на мелководьях озер в горах Южной Америки [Hurlbert, Chang, 1984, 1988]. Ледо-грунтовые бугры-острова (типа литальза) в пределах мелких соленых озер в Андах на юго-западе Боливии и на северо-востоке Чили (между 21 и 24° ю.ш.) достигают в длину 1,5 км и возвышаются на 6–7 м над поверхностью озер (минерализация воды 60–292 г/л, глубина в среднем менее 30 см). Бугры располагаются на абсолютных высотах 4,1–4,7 км. Среднегодовое количество осадков здесь от 50 до 200 мм/год, среднегодовая температура воздуха от 0 до 3–6 °С. Крупные массивные острова сильнольдистых многолетнемерзлых отложений с линзами пресноводного льда, возможно, сформировались вследствие замерзания пресной воды в толще озерных отложений [Hurlbert, Chang, 1984, 1988]. Глубина озер ранее была больше, о чем свидетельствуют древние уровни береговой линии на высоте 10 м над современным уровнем водоемов.

Поверхность ледяных островов покрыта рыхлыми белыми отложениями, представленными главным образом арагонитом или кальцитом. Многолетнемерзлые отложения этих островов



**Рис. 1.** Карта района исследований бугров с ледогрунтовым ядром в долине р. Сенца, Восточный Саян.

сильнольדיстые (объемная льдистость от 10 до 87 %). Линзы и шпирь льда достигают мощности 1 м. Изотопный состав льда ( $\delta^{18}\text{O}$  около  $-11\text{‰}$ ) соответствует среднему изотопному составу атмосферных осадков в регионе и более отрицателен, чем изотопный состав современной воды озер ( $\delta^{18}\text{O}$  от 0 до  $+13,5\text{‰}$ ).

Настоящая работа посвящена изучению минеральных бугров пучения (литальза) в долине р. Сенца в западной Бурятии. Исследования бугров здесь были выполнены в 2011 и 2014 гг. Это первые исследования многолетнемерзлых пород в данном регионе, они основаны на описании естественных обнажений, бурении скважин в верхней

части бугров и на детальном анализе стабильных изотопов кислорода и водорода во льду ледогрунтового ядра. Возрастные привязки базируются на данных радиоуглеродных определений органики из отложений, слагающих бугры. Цель работы – охарактеризовать криогенное строение этих бугров пучения и сформировать представление о процессах их развития.

### ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЕГО МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ

Объектом исследований являются сильнольдистые ядра бугров пучения мощностью до 7 м, расположенные на первой террасе р. Сенца (рис. 1) в Окинском районе Республики Бурятия. Долина р. Сенца (притока Оки) врезана в западную часть Окинского плоскогорья (Восточный Саян) на глубину до 800 м. Большая часть долины р. Сенца занята листовенной тайгой с незначительной примесью березы и ели (см. рисунок на обложке).

Исследованное береговое обнажение р. Сенца находится в левом борту долины ( $52^{\circ}39,827'$  с.ш.,  $99^{\circ}29,858'$  в.д.).

На поверхности первой террасы (абсолютная высота 1387 м) обнаружен крупный бугор пучения (точка Se 14-1) высотой 7 м (рис. 2). Разрез бугра изучен в обнажении (рис. 3, табл. 1) и по керну скважины (рис. 4). Исследования выполнены в 2014 г.

В скважине, пробуренной на поверхности крупного бугра в 15 м к востоку от обнажения, описаны также отложения с преимущественно крупносетчатой криотекстурой, причем мощными (до 5–7 см) являются не только горизонтальные шпирь льда (рис. 4, а–в, д), но и вертикальные (рис. 4, з). В интервале 2,25–3,1 м шпирь льда до-



**Рис. 2.** Большой бугор (высотой 7 м) с ледогрунтовым ядром в долине р. Сенца, точка Se 14-1:

а – местоположение расчистки; б – местоположение скважины.



**Рис. 3. Строение разреза крупного бугра (высотой 7 м) с ледогрунтовым ядром в долине р. Сенца, точка Se 14-1:**

*а* – общий вид расчистки; *б* – ледяная линза в верхней части обнажения; *в* – лед из ледяной линзы в нижней части обнажения; *з* – криогенная текстура нижней части обнажения.

стигают мощности 10–12 см, на глубине 2,8–2,9 м встречено скопление веток и листьев болотных растений, подобных современной растительности на берегах р. Сенца. В интервале 3,1–3,6 м – косо-слоистая и неполносетчатая криотекстура. Мощ-

ность шлиров здесь от 0,5 до 2,0 см, мощность минеральных прослоев 0,3–2,0 см; льдистость составляет 50–60 %.

В 250 м к юго-востоку от описанного большого бугра на поверхности первой террасы (абс. вы-

Таблица 1. Состав отложений и криогенное строение ледоминарального бугра (литальза) в долине р. Сенца (Восточный Саян)

Глубина, м	Состав отложений	Криотекстура	Особенности криогенного строения
<i>Крупный бугор пучения высотой 7 м (точка Se 14-1)</i>			
0–0,8	Супесь светло-серая, талая, сухая. В верхней части (5–10 см) почвенно-растительный слой, ниже (до глубины 60 см) – однородная толща с редкими ожелезненными вертикальными и наклонными прожилками		
0,8–2,0	Супесь темно-серая, мерзлая, неравномерно-льдистая	Слоистая, чешуйчатая	В верхней части шлиры толщиной до 10 мм, на глубине около 2 м толщина линз и прослоев льда достигает 15 мм
2,0–2,3	Лед белый, чистый		Лед, образующий линзу, насыщен пузырьками воздуха диаметром до 2–3 мм, с редкими включениями грунта диаметром 2–3 мм
2,3–2,8	Супесь тяжелая, почти суглинок, темно-серая, мерзлая		В массе грунта выделяются блоки (до 10 мм) и линзы льда (до 5–8 мм)
2,8–3,35	Лед прозрачный серый, чистый	Залегание блоков льда чешуйчатое (черепитчатое)	Лед содержит многочисленные газовые пузырьки округлой и вытянутой формы. В левой части зачистки лед молочно-белый за счет газовых включений. Сквозь лед просвечивают крупные куски грунта
3,35–6,3	Ледогрунт	Криогенная текстура крупношлировая, местами базальная. Видимая льдистость 60–70%. При вытаивании ледяных прослоев грунт имеет вид слоеного пирога	В массе льда “плавают” блоки грунта – темно-серой супеси. Мощность шлиров льда 5–7 см, некоторых до 10 см, мощность минеральных прослоев 3–7 см, максимум 10 см
6,3–7,7	Суглинки желтовато-серые и голубовато-серые, мерзлые	Криотекстура в основном массивная и тонкошлировая	Редкие шлиры толщиной 1–2 мм расположены наклонно и горизонтально
7,7–9 м – урез озера	Осыпь		
<i>Небольшой бугор пучения высотой 3,0–3,5 м (точка Se 14-2)</i>			
0,0–0,1	Дерново-торфяной горизонт темно-коричневый		
0,2–0,6	Супесь тяжелая желтовато-серая, в сухом состоянии желтовато-белесая		
0,6–1,5	Суглинок коричневатого-серый	В интервале 1,0–1,8 м криотекстура среднекослоистая, в интервале 1,8–2,4 м криотекстура линзовидно-слоистая, в интервале 2,1–2,4 м – мелко- и микролинзовидная	Мощность шлиров 0,3–0,5 см, мощность грунтовых прослоев 0,5–1,0 см
1,5–2,4	Суглинок коричневатого-серый	Криотекстура крупнокососетчатая	Мощность шлиров 1–2 см, мощность грунтовых прослоев 1–3 см. В интервале 2,6–2,7 м – косонаклонный шлир льда мощностью около 5 см, в интервале 3,47–3,52 м – мощная горизонтальная линза льда. В суглинках в 2011 г. обнаружены стволы деревьев и обломки коренных пород
2,4–2,6	Песок темно-серый и коричнево-серый, мелко- и среднезернистый, горизонтально-слоистый, мерзлый; на контакте с суглинком наблюдаются прослои и гнезда оторфованья. Такой же песок залегает под современными аллювиальными желтыми песками, но там кровля темно-серого песка располагается ниже на 1,8 м (возможно, это результат выпучивания песка в пределах бугров)	Криотекстура песка на контакте редконеполюснослоистотонкошлировая	

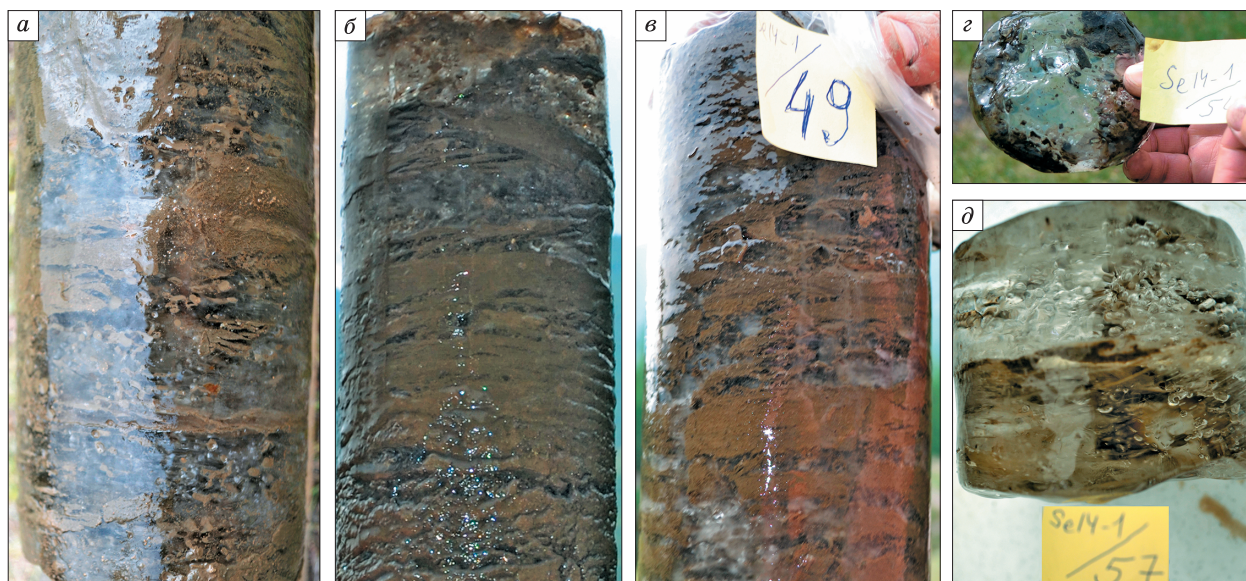


Рис. 4. Керн скважины на большом бугре (высотой 7 м) с ледогрунтовым ядром в долине р. Сенца, точка Se 14-1:

*a* – глубина 2 м; *б* – глубина 3 м; *в* – глубина 3,2 м; *г* – глубина 4,4 м; *д* – глубина 4,5 м.



Рис. 5. Небольшой бугор (высотой 3,5 м) с ледогрунтовым ядром в долине р. Сенца, точка Se 14-2:

*a* – местоположение расчистки.

сота 1382 м) обнаружен небольшой бугор пучения (точка Se 14-2) высотой 3,0–3,5 м (рис. 5). Разрез бугра изучен в обнажении (рис. 6, табл. 1). Исследования выполнены в 2011 и 2014 гг.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗОТОПНЫХ И РАДИОУГЛЕРОДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БУЛГУННЯХА

**Результаты радиоуглеродного датирования.** По органическим остаткам, отобранным из отложений террасы и по древесным остаткам, из-

влеченным изо льда, выполнен радиоуглеродный анализ (табл. 2). Установлено, что озерные суглинки формировались в период от 4,7 до 7 тыс. лет назад. В соседнем фрагменте обнажения также были отобраны образцы горелой древесины в основании озерной суглинистой толщи из контактной зоны с подстилающими осадками и из торфяного слоя, перекрывающего суглинки [Аржанников и др., 2013]. Радиоуглеродные датировки этих образцов подтвердили среднеголоценовый возраст озерных суглинков, вмещающих ледяную залежь.

**Результаты изотопных определений.** Для определения вариаций стабильных изотопов водорода и кислорода в ледогрунтовых ядрах обоих бугров был произведен поинтервальный отбор образцов из обнажений через 5 см (в 2011 г.) и через 10–20 см (в 2014 г.) и также отобраны образцы из скважины (через 10–20 см). Вариации стабильных изотопов во льду исследовались 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  $\delta\text{D} = 0,6 \text{ ‰}$ .



**Рис. 6.** Строение разреза небольшого бугра (высотой 3,5 м) с ледогрунтовым ядром в долине р. Сенца, точка Se 14-2:

*a* – общий вид расчистки; *б* – криогенная текстура нижней части обнажения; *в* – ледяная линза в нижней части обнажения; *з* – характер контакта ледогрунта с подстилающим песком.

В ледогрунтовой залежи, опробованной в обнажении большого бугра в долине р. Сенца, значения  $\delta D$  варьируют от  $-136,9$  до  $-153,6$  ‰, значе-

ния  $\delta^{18}O$  – от  $-18,44$  до  $-20,15$  ‰, а  $d_{\text{exc}}$  изменяется от  $15,44$  до  $4,12$  ‰ (табл. 3).

**Таблица 2. Радиоуглеродные датировки органического материала из разреза поймы р. Сенца и небольшого бугра пучения [Аржанников и др., 2013]**

Глубина, м	Материал	$^{14}C$ -датировка, лет	Калиброванный $^{14}C$ -возраст, лет	Лабораторный номер
0,3	Уголь	$835 \pm 65$	$788 \pm 77$	СОАН-8875
0,8	Уголь	$4200 \pm 90$	$4716 \pm 117$	СОАН-8874
0,8	Уголь	$4610 \pm 120$	$5279 \pm 187$	СОАН-5236
1,4	Древесина	$5865 \pm 80$	$6679 \pm 100$	СОАН-8876
4,5	Древесина	$6095 \pm 85$	$6989 \pm 129$	СОАН-8877

Изотопически наиболее тяжелым является лед нижней ледяной линзы, расположенной на глубине 2,80–3,35 м. Здесь значения  $\delta^{18}O$  во всех образцах выше  $-19$  ‰, а  $\delta D$  выше  $-146$  ‰. Скорее всего, эта ледяная линза сформировалась на начальной стадии образования бугра, когда из водонасыщенных дисперсных грунтов выделилась довольно мощная линза сегрегационного льда. Сюда была отжата вода на первой стадии диагенеза водонасыщенных суглинков. Как следует из экспериментов В.В. Рогова и В.Н. Конищева, отжатая влага в тонкодисперсных грунтах тяжелее исходной воды на  $3,0$ – $3,5$  ‰ по  $\delta^{18}O$  и на  $10$ – $27$  ‰ по  $\delta D$  [Конищев и др., 2014]. В дальнейшем промерзание продолжилось вверх, скорее всего, изотопически существенно более легкие шпильки льда, а

Таблица 3. Изотопный состав линз и шпиров в ядре большого бугра пучения (литальза) в долине р. Сенца (Восточный Саян)

Номер	Высота отбора, м	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰	$\delta\text{D}$ , ‰	$d_{\text{exc}}$ , ‰
<i>Обнажение большого бугра</i>				
Se 14-1/44	1,8	-19,54	-147,4	8,92
Se 14-1/41	2,1	-19,50	-146,1	9,90
Se 14-1/39	2,1	-19,23	-147,3	6,54
Se 14-1/38	2,1	-19,96	-148,5	11,18
Se 14-1/37	2,1	-19,50	-146,1	9,90
Se 14-1/40	2,2	-19,64	-150,0	7,12
Se 14-1/36	2,3	-19,44	-146,1	9,42
Se 14-1/43	2,5	-19,93	-144,0	15,44
Se 14-1/42	2,6	-19,82	-146,8	11,76
Se 14-1/35	3,0	-18,60	-138,6	10,20
Se 14-1/34	3,0	-18,60	-136,9	11,90
Se 14-1/33	3,0	-18,44	-143,4	4,12
Se 14-1/29	3,0	-18,65	-141,7	7,50
Se 14-1/32	3,0	-18,80	-145,1	5,30
Se 14-1/30	3,1	-18,83	-137,5	13,14
Se 14-1/31	3,2	-18,56	-143,9	4,58
Se 14-1/28	3,3	-18,80	-138,9	11,50
Se 14-1/26	4,1	-19,56	-155,8	0,68
Se 14-1/25	4,3	-19,43	-148,9	6,54
Se 14-1/24	4,4	-19,76	-147,6	10,48
Se 14-1/23	4,45	-19,53	-147,6	8,64
Se 14-1/22	4,5	-19,51	-149,1	6,98
Se 14-1/21	4,55	-20,14	-151,9	9,22
Se 14-1/20	4,6	-20,15	-150,8	10,40
Se 14-1/19	4,7	-19,95	-151,5	8,10
Se 14-1/18	4,8	-20,09	-153,6	7,12
Se 14-1/17	4,9	-19,87	-152,1	6,86
Se 14-1/16	5,0	-19,64	-146,6	10,52
Se 14-1/15	5,1	-19,68	-149,3	8,14
Se 14-1/13	5,2	-19,64	-151,7	5,42
Se 14-1/12	5,25	-19,71	-148,7	8,98
Se 14-1/11	5,35	-19,62	-150,7	6,26
Se 14-1/10	5,5	-19,53	-148,3	7,94
Se 14-1/9	5,7	-19,64	-149,0	8,12
Se 14-1/8	5,8	-19,88	-145,1	13,94
Se 14-1/7	5,85	-19,74	-152,4	5,52
Se 14-1/6	5,9	-20,00	-151,7	8,30
Se 14-1/4	6,0	-20,12	-150,2	10,76
Se 14-1/3	6,1	-19,18	-148,3	5,14
Se 14-1/2	6,3	-19,08	-145,6	7,04
<i>Скважина на большом бугре</i>				
Se 14-1/27	2,5	-18,94	-147,6	3,92
Se 14-1/45	2,6	-18,83	-142,2	8,44
Se 14-1/46	2,8	-18,61	-144,9	3,98
Se 14-1/47	2,9	-20,27	-150,4	11,76
Se 14-1/48	3,0	-19,92	-149,7	9,66
Se 14-1/49	3,2	-19,98	-149,3	10,54
Se 14-1/51	3,4	-20,06	-157,9	2,58
Se 14-1/52	4,0	-19,41	-150,4	4,88
Se 14-1/53	4,2	-19,48	-150,0	5,84
Se 14-1/54	4,4	-18,99	-142,7	9,22
Se 14-1/57	4,5	-19,31	-142,7	11,78
Se 14-1/58	4,7	-19,66	-151,3	5,98

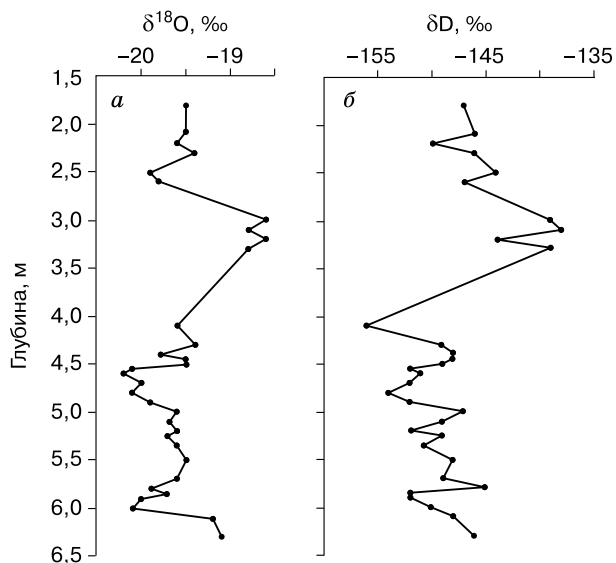


Рис. 7. Вариации стабильных изотопов кислорода (а) и водорода (б) в подземной ледогрунтовой залежи мощностью до 6 м, обнажение большого бугра (высотой 7 м) с ледогрунтовым ядром в долине р. Сенца, точка Se 14-1.

также лед верхней ледяной линзы образовались на заключительных стадиях промерзания бугра.

В ледогрунтовой залежи, опробованной в скважине, пробуренной на большом бугре в долине р. Сенца, диапазон изотопных вариаций не-

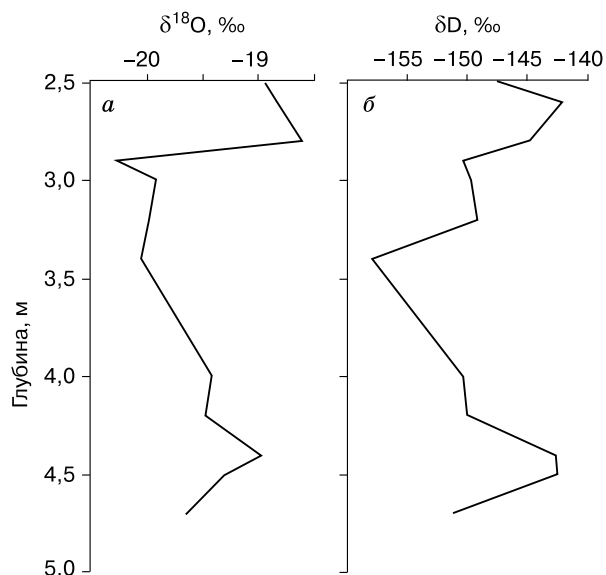


Рис. 8. Вариации стабильных изотопов кислорода (а) и водорода (б) в подземной ледогрунтовой залежи мощностью до 6 м, скважина на большом бугре (высотой 7 м) с ледогрунтовым ядром в долине р. Сенца, точка Se 14-1.

Таблица 4. Изотопный состав линз и шпиров в ядре небольшого бугра пучения (литальза) в долине р. Сенца (Восточный Саян)

Номер	Высота отбора, м	$\delta^{18}\text{O}$ , ‰	$\delta\text{D}$ , ‰	$d_{\text{exc}}$ , ‰
1	2	3	4	5
<i>Отбор 2014 г.</i>				
Se 14-2/10	1,0	-19,76	-149,6	8,48
Se 14-2/9	1,2	-19,94	-149,2	10,32
Se 14-2/8	1,4	-19,71	-150,6	7,08
Se 14-2/7	1,5	-19,67	-148,9	8,46
Se 14-2/6	1,7	-19,76	-150,6	7,48
Se 14-2/5	1,9	-19,83	-148,2	10,44
Se 14-2/4	2,0	-19,89	-148,5	10,62
Se 14-2/3	2,2	-20,02	-148,8	11,36
Se 14-2/2	2,3	-20,20	-149,2	12,40
Se 14-2/1	2,5	-20,00	-149,6	10,40
<i>Отбор 2011 г.</i>				
Se 11-1	1,85	-19,98	-148,4	11,44
Se 11-2	1,90	-20,41	-150,8	12,48
Se 11-3	1,95	-19,69	-149,1	8,42
Se 11-4	2,05	-20,41	-150,1	13,18
Se 11-6	2,10	-20,41	-149,7	13,58
Se 11-7	2,15	-19,73	-145,0	12,84
Se 11-8	2,20	-20,27	-149,4	12,76
Se 11-9	2,25	-20,48	-149,7	14,14
Se 11-10	2,30	-20,37	-150,1	12,86
Se 11-11	2,35	-20,09	-151,4	9,32
Se 11-12	2,40	-20,07	-153,5	7,06
Se 11-13	2,45	-20,46	-152,8	10,88
Se 11-14	2,50	-20,41	-148,4	14,88
Se 11-15	2,55	-20,24	-155,5	6,42
Se 11-16	2,60	-20,18	-147,7	13,74
Se 11-17	2,65	-19,91	-152,1	7,18
Se 11-18	2,70	-20,46	-150,8	12,88
Se 11-19	2,75	-20,18	-151,1	10,34
Se 11-20	2,80	-19,71	-141,9	15,78
Se 11-21	2,85	-20,32	-151,1	11,46
Se 11-22	2,90	-19,96	-153,5	6,18
Se 11-23	2,95	-20,66	-158,9	6,38
Se 11-24	3,00	-20,31	-152,5	9,98
Se 11-25	3,05	-20,20	-150,8	10,80
Se 11-26	3,10	-20,22	-148,7	13,06
Se 11-27	3,15	-19,88	-150,1	8,94
Se 11-28	3,20	-19,85	-147,0	11,80
Se 11-29	3,25	-19,96	-151,0	8,70
Se 11-30	3,30	-19,38	-149,7	5,40
Se 11-31	3,35	-20,11	-150,7	10,20
Se 11-32	3,40	-20,11	-150,4	10,50
Se 11-33	3,45	-19,60	-148,3	8,50
Se 11-34	3,50	-19,58	-150,0	6,60
Se 11-35	3,55	-20,03	-150,0	10,20
Se 11-36	3,60	-20,26	-154,0	8,00
Se 11-37	3,65	-20,24	-151,4	10,60
Se 11-38	3,70	-20,41	-153,4	9,90
Se 11-39	3,75	-20,32	-149,7	12,90
Se 11-40	3,80	-20,45	-149,3	14,30

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5
Se 11-41	3,85	-20,95	-149,7	17,90
Se 11-42	3,90	-20,99	-159,8	8,20
Se 11-43	3,95	-19,52	-152,0	4,10
Se 11-44	4,00	-20,81	-158,4	8,10
Se 11-45	4,05	-21,00	-151,7	16,30
Se 11-46	4,10	-20,46	-154,0	9,60

сколько уже. В вертикальном изотопном профиле большого бугра значения  $\delta\text{D}$  варьируют от  $-157,9$  до  $-142,7$  ‰, а значения  $\delta^{18}\text{O}$  – от  $-20,27$  до  $-18,61$  ‰,  $d_{\text{exc}}$  изменяется от 11,78 до 2,58 ‰ (рис. 7, табл. 3). В скважине изотопически высокое значение ( $-18,6$  ‰) зафиксировано только на глубине 2,8 м (рис. 8, табл. 3). Это, возможно, указывает на то, что скважиной вскрыто ледо-грунтовое ядро ближе к его периферийной части, где закономерно залегает изотопически более легкий лед.

В ледо-грунтовой залежи, опробованной в обнажении небольшого бугра в долине р. Сенца, значения  $\delta\text{D}$  изменяются по образцам 2014 г. от  $-150,6$  до  $-148,2$  ‰, а значения  $\delta^{18}\text{O}$  – от  $-20,20$  до  $-19,67$  ‰,  $d_{\text{exc}}$  – от 11,36 до 7,08 ‰. По образцам, отобраным из ледо-грунтовой залежи небольшого бугра в 2011 г., значения  $\delta\text{D}$  варьируют от  $-159,8$  до  $-141,9$  ‰, а значения  $\delta^{18}\text{O}$  – от  $-21,0$  до  $-19,38$  ‰,  $d_{\text{exc}}$  изменяется от 15,78 до 4,10 ‰ (табл. 4). В вертикальном изотопном профиле

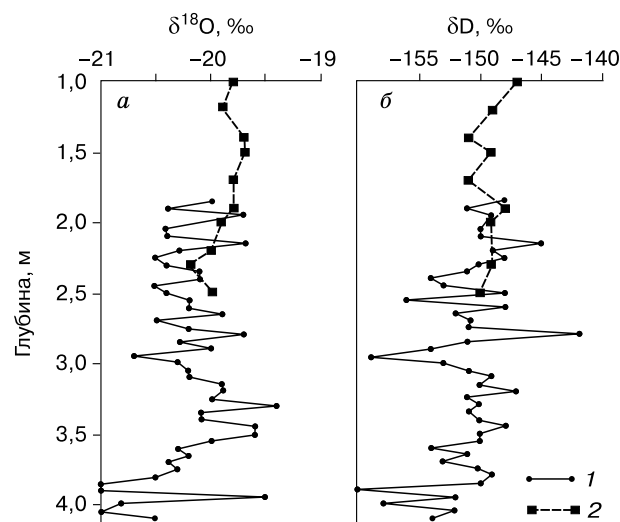
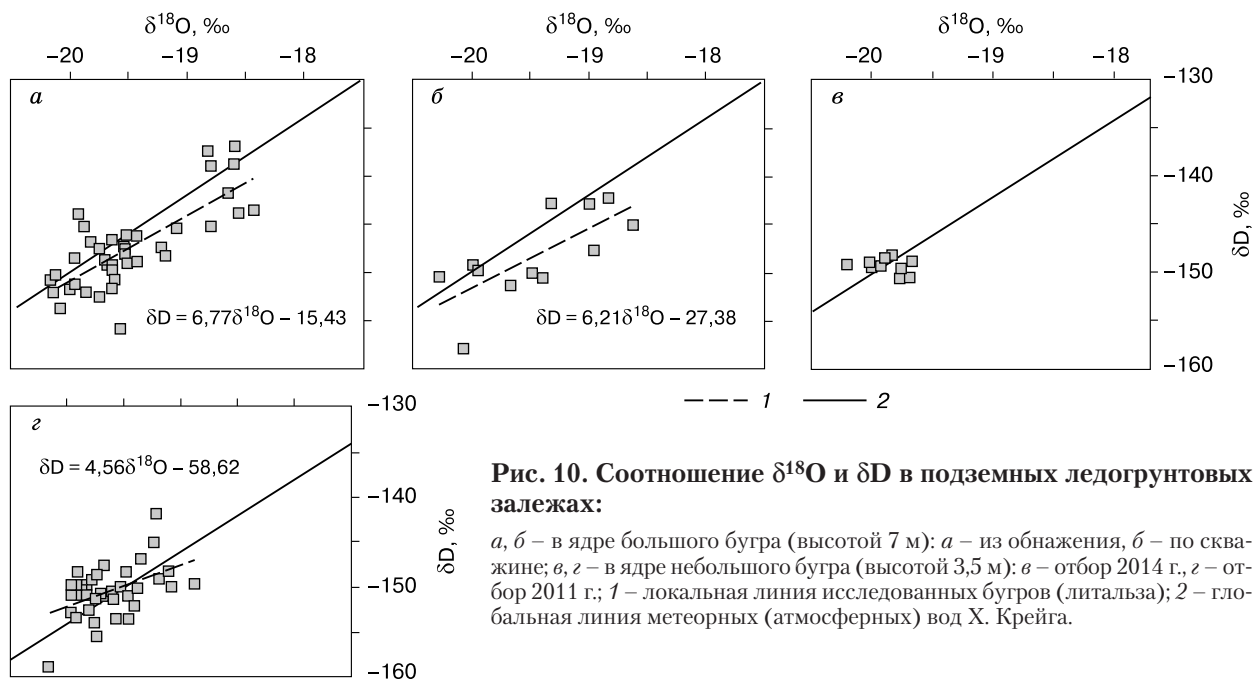


Рис. 9. Вариации стабильных изотопов кислорода (а) и водорода (б) в подземной ледо-грунтовой залежи мощностью до 3 м, небольшого бугра (высотой 3,5 м) с ледо-грунтовым ядром в долине р. Сенца:

1 – детальный отбор образцов, 2011 г.; 2 – контрольный отбор образцов, 2014 г.



**Рис. 10. Соотношение  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$  в подземных ледогрунтовых залежах:**

*a, б* – в ядре большого бугра (высотой 7 м): *a* – из обнажения, *б* – по скважине; *в, з* – в ядре небольшого бугра (высотой 3,5 м): *в* – отбор 2014 г., *з* – отбор 2011 г.; 1 – локальная линия исследованных бугров (литальза); 2 – глобальная линия метеорных (атмосферных) вод Х. Крейга.

небольшого бугра отчетливо фиксируется изотопный минимум в нижней части ледогрунтового ядра, где преобладает крупносетчатая толстошлировая криотекстура и встречаются небольшие линзы чистого льда (рис. 9).

В соотношении  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  отмечено достаточно хорошее совпадение локальных изотопных кривых, полученных по обнажению и по скважине на большом бугре (рис. 10, *a, б*), с уравнением глобальной линии метеорных вод (GMWL) Х. Крейга с коэффициентом 6,2–6,8 (напомним, соотношение  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в уравнении GMWL равно 8).

В соотношении  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  небольшого бугра зафиксировано существенное отличие от линии Х. Крейга. Здесь отношение  $\delta\text{D}$ – $\delta^{18}\text{O}$  снижается до 4,6 (рис. 10, *в, з*). Это указывает на разную степень изотопной истощенности водонасыщенных дисперсных грунтов во время формирования ледогрунтового ядра большого и небольшого бугров. В тех частях ледяных ядер, где зафиксированы несущественные вариации изотопного состава, формирование ледяных шпиров или небольших ледяных линз, вероятно, происходило в условиях открытой системы с подтоком воды извне. А в тех частях, где вариации изотопного состава заметны, формирование ледяных шпиров происходило в условиях закрытой (или полузакрытой) системы без подтока воды извне.

Для сопоставления состава льда литальза в 2014 г. был выполнен отбор и изотопный анализ наледного льда на р. Ока (притоком которой является р. Сенца, см. рис. 1): значения  $\delta\text{D}$  составляют от  $-92,5$  до  $-108,0$  ‰, значения  $\delta^{18}\text{O}$  – от  $-14,35$  до

$-14,75$  ‰, а  $d_{\text{exc}}$  – от 10 до 22,3 ‰. В воде Оки значения  $\delta\text{D}$  изменяются от  $-124,1$  до  $-129,3$  ‰, значения  $\delta^{18}\text{O}$  – от  $-16,80$  до  $-17,33$  ‰, а  $d_{\text{exc}}$  – от 9,34 до 10,3 ‰. Эти данные демонстрируют иное распределение изотопов и другой механизм формирования наледного льда по сравнению со льдом литальза.

### ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИТАЛЬЗА

Накопление массива озерных суглинков на исследуемом участке долины р. Сенца в Восточном Саяне – довольно необычное явление, и в других частях долины этой реки не зафиксировано. По-видимому, оно произошло в результате подпруживания реки в нескольких километрах ниже по течению. Причиной этого подпруживания послужило резкое сужение долины реки, а основным материалом для формирующейся дамбы были активно осыпавшиеся и размывавшиеся отложения позднеплейстоценовых морен, фиксируемых в этих местах на склонах долины р. Сенца [Arzhannikov et al., 2012]. Заложение этой дамбы произошло более 7 тыс. лет назад, а ее разрушение – около 4,7 тыс. лет назад. Оценивая возраст бугров в долине р. Сенца, можно считать установленным, что бугры сформировались не ранее 4,7 тыс. лет назад, когда завершилось накопление основной части толщи высокодисперсных переувлажненных озерных суглинков.

Сам процесс промерзания и пучения, по предположению авторов, происходил довольно быстро, и бугристый массив принял близкий к современному облик за несколько сотен и даже десятков

лет от начала промерзания. Сейчас нельзя однозначно утверждать, было ли это формирование одного гигантского ледоминарального бугра диаметром 200–300 м и высотой 8–10 м, так как впоследствии этот единый бугор мог быть видоизменен термокарстом и термоэрозией и разделен на отдельные бугры. Возможно, это было скопление бугров более высоких в центре и несколько меньших на периферии. В пользу предположения о первичном едином бугре свидетельствует кольцеобразная в плане цепочка бугров по внешнему контуру бугристого массива (см. фотографию на обложке), а также довольно близкий изотопный состав льда в ледогрунтовом ядре в центральной части массива, к которому приурочен большой бугор, и в ледогрунтовом ядре в периферийной части, где изучен небольшой бугор. Не противоречит этому и немного более изотопически тяжелый лед большого бугра (средние значения  $\delta^{18}\text{O} = -19,5\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = -148\text{‰}$ ) по сравнению с малым (средние значения  $\delta^{18}\text{O} = -20,3\text{‰}$ ,  $\delta\text{D} = -152\text{‰}$ ). Судя по

несущественным вариациям значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ , можно предположить, что интенсивный приток воды в процессе промерзания отложений и образования ледоминаральных бугров не привел к фракционированию изотопов, несмотря на постоянное изъятие изотопически более тяжелой воды на формирование сегрегационного льда [Васильчук, 2011].

В пользу версии о первоначальном образовании нескольких бугров говорит хорошо выраженный контур бугров по периферии и отсутствие сформированных термоэрозией вертикальных стенок этих бугров. В этом случае выявленные изотопные тенденции можно объяснить последовательностью возникновения бугров в массиве: вначале сформировался крупный бугор в центре, а затем из нескольких изотопически истощенных водонасыщенных дисперсных грунтов образовались более мелкие бугры по периферии массива. Достоверно установить количество бугров пучения можно на основе более детального радиоугле-

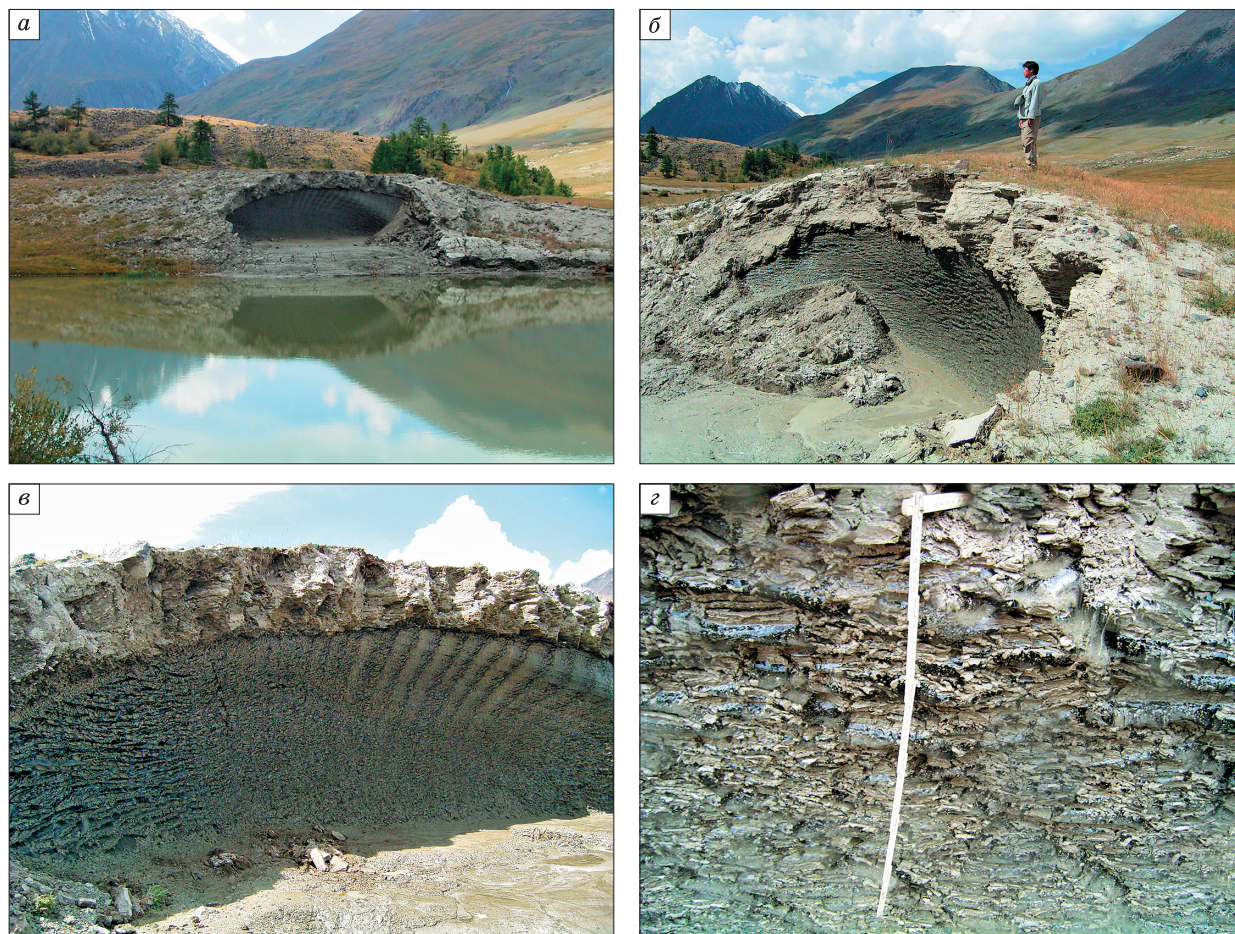


Рис. 11. Ледоминаральная залежь в разрезе небольшого бугра пучения (литальза) в горной котловине оз. Акколь на Алтае:

а – общий вид; б – детально исследованный бугор; в – разрез ядра; з – характер криотекстур. Фото Г. Ивахана.

родного датирования разрезов центральной и периферийной частей бугристого массива.

По предположению Ю.К. Васильчука, зарождение и первоначальный рост ледоминальных бугров могли происходить еще на стадии мелеющего озера водоема. При этом растущий бугор (или бугры) возвышался над поверхностью очень мелкого (глубиной до 1 м), но обширного водоема. Озерная вода могла быть источником дополнительной подпитки бугров, что обеспечило их высокую льдонасыщенность.

В детально изученном бугре-литальза в котловине оз. Акколь радиальные толстые шпирьы льда направлены от ядра к периферии бугра [Iwahana et al., 2012]. Высота этого бугра достигает 6 м, длина – 50 м. Его мерзлое ядро представлено озерными суглинками с сетчатыми криогенными текстурами. Самые мощные ледяные линзы, обнаруженные в одном из центральных фрагментов ядра бугра, достигают 16 см (в среднем 4,8 см). Содержание льда здесь максимальное для разреза литальза (66 %). Криогенное строение в нижней части разреза большого бугра на р. Сенца сходно с криогенным строением, описанным в этом фрагменте литальза в котловине оз. Акколь. Напомним, что в основании ледоминального ядра в большом бугре на р. Сенца мощность шпирьов льда в основном 5–7 см, иногда до 10 см, мощность минеральных прослоев 3–7 см, максимум 10 см. Видимая льдистость 60–70 %.

В остальных фрагментах ледяного ядра литальза в котловине оз. Акколь криогенное строение подобно криогенному строению небольшого бугра на р. Сенца: мощность шпирьов льда в среднем составляет 1,1–2,4 см, мощность грунтовых прослоев – от 1 до 2 см (рис. 11).

Сходство криогенного строения бугров на р. Сенца и в долине оз. Акколь [Iwahana et al., 2012] послужило основанием для сопоставления их изотопных кривых. Отмечены близкие диапазоны вариаций  $\delta^{18}\text{O}$ , а также сходный шаг изменчивости изотопных диаграмм во льдах двух объектов (рис. 12).

Изотопный состав льда в ледоминальных буграх (литальза) в Нунавике, к востоку от Гудзона залива, был исследован в типичном литальза диаметром 50 м и высотой около 3 м [Calmels, 2005]. До глубины 10 м бугор сложен тяжелым суглинком, мерзлым с глубины 1,5 м, льдонасыщенным с чередующимися слоями льда и грунта, ниже (на глубине 10–11 м) отмечен прослой песка с мелким гравием, который залегает на коренных породах (гнейсах).

Для установления происхождения источника воды, формирующей лед, и особенностей процессов сегрегации были выполнены определения  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  и трития в подземном льду и поверхностных водах. В интервале глубин 1,6–6,6 м образцы

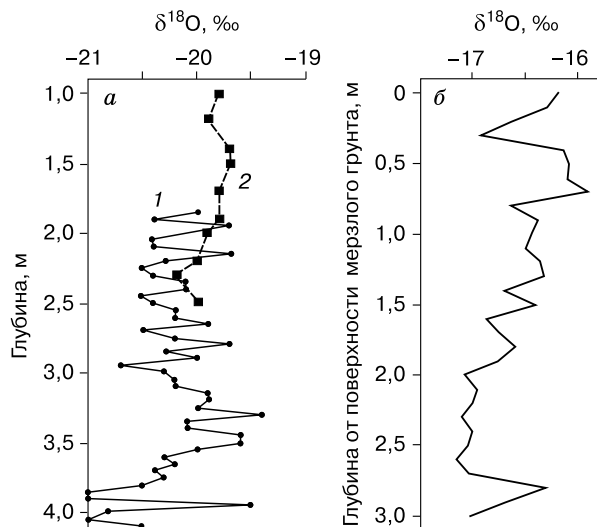


Рис. 12. Изотопные диаграммы подземных ледоминальных залежей в разрезе небольшого бугра на р. Сенца (а) и бугра пучения (литальза) в горной котловине оз. Акколь на Алтае (б).

Условные обозн. см. рис. 9.

были отобраны из керна скважины через каждые 20 см, в интервале глубин от 4,61 до 4,86 м образцы отбирались через каждый сантиметр. Результаты изотопных определений показали, что соотношения  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta\text{D}$  в воде и подземном льду имели взаимосвязь, типичную для линии метеорных вод, за исключением одного значения  $\delta\text{D}$  (около –50 ‰) на глубине 6 м [Calmels, 2005]. Значения  $\delta^{18}\text{O}$  варьировали от –14,33 до –16,19 ‰ со средним –15,20 ‰, а значения  $\delta\text{D}$  – от –100,64 до –123,25 ‰ со средним –111,70 ‰.

Сходство состава грунтов и криогенного строения ледоминальных бугров на р. Сенца и в Нунавике послужило основанием для сопоставления характера их изотопных диаграмм (рис. 13). Отмечено, что изотопный максимум в бугре на р. Сенца располагается в верхней части разреза, тогда как в бугре в Нунавике наименее отрицательные изотопные значения приходится на основание ледяного ядра. По нашему мнению, это связано с локализацией первичного формирования ледяной линзы: если на р. Сенца промерзание шло от зоны, расположенной примерно на трети глубины от поверхности ядра, вверх и вниз, то в Нунавике оно, вероятно, шло из нижней части ледяного ядра вверх (ср. рис. 13, а, в).

Ф. Кальмель полагает, что исследуемый минеральный бугор формировался в XX в. в более холодных условиях, т. е. при среднегодовой температуре воздуха в целом ниже современной на 0,5–3,0 °С.

Если осреднить изотопные измерения с интервалом 20 см, то в распределении значений  $\delta^{18}\text{O}$

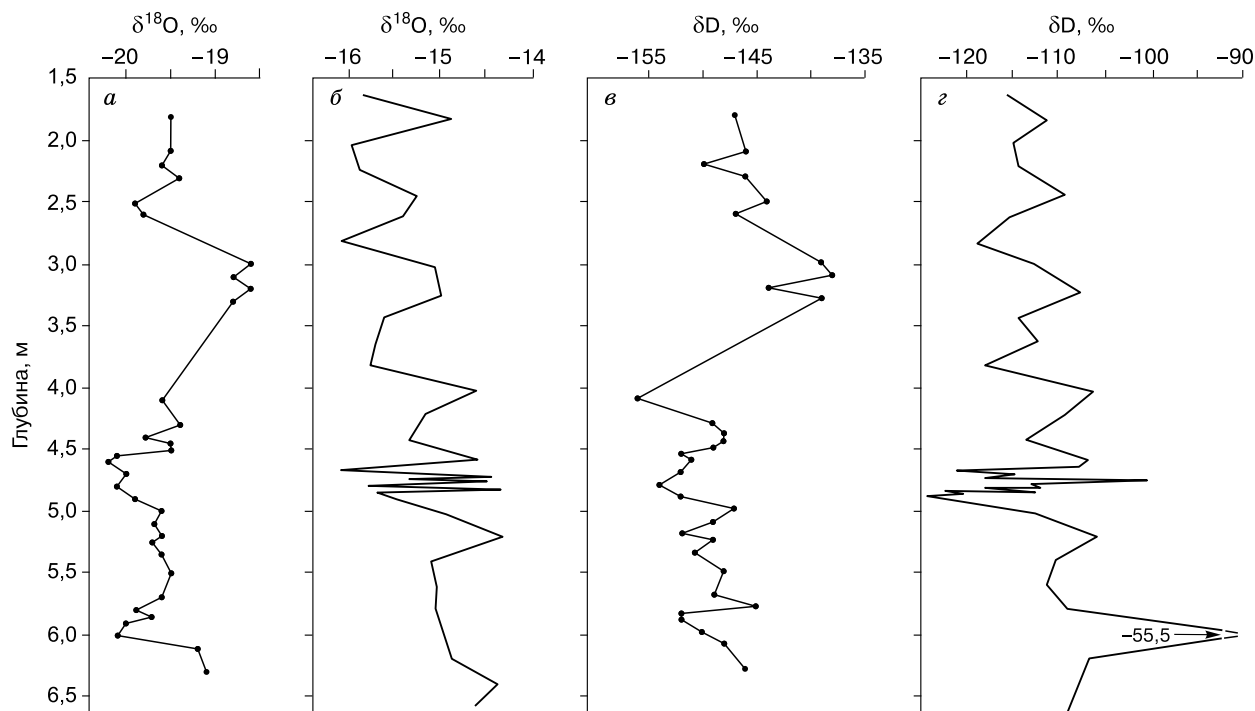


Рис. 13. Изотопные диаграммы подземных ледоминаеральных залежей в разрезе большого бугра на р. Сенца (а, в) и бугра пучения (литальза) в Нунавике, Северный Квебек, Канада (б, з) [Calmels, 2005].

и  $\delta D$  сверху вниз очевиден изотопный тренд от более легких к более тяжелым значениям (см. рис. 13, б, з). Возможное объяснение этому Ф. Кальмель видит в том, что наиболее древний текстурообразующий лед находится вблизи поверхности и образовался в течение наиболее холодного периода, в то время как залегающий глубже лед формировался в более теплых климатических условиях [Calmels, 2005]. Авторам представляется, что это скорее результат проявления криогенного фракционирования при последовательном формировании вначале изотопически более тяжелого льда в нижней части ядра, затем более легкого вверху, по тому же сценарию, что и в большом бугре в долине р. Сенца.

Бугры-литальза в долине р. Большая Невольничья и окрестности оз. Большое Невольничье достигают высоты 8 м и сложены преимущественно суглинками [Wolfe et al., 2014]. Детальное криостратиграфическое исследование литальза в районе ручья Баундари продемонстрировало существование сильнольдистого ядра с сегрегационными шпирями до глубины 5 м. Формирование литальза, по мнению С. Вульффе, произошло в течение последних 700 лет за счет интенсивного сегрегационного льдовыделения.

Наиболее крупный бугор-литальза в котловине соленого озера Цо Кар в Ладакхе, в горах Мало-

го Тибета, достигает высоты 10 м [Wünnemann et al., 2008, 2010]. Он сложен сильнольдистыми озерными илами с мелкосетчатой криотекстурой, датированными средним голоценом ( $6109 \pm 106$  калиброванных лет). Второй из исследованных бугров имеет высоту 6 м и диаметр около 50 м, расположен на абсолютной высоте 4528 м над уровнем моря. Зияющие трещины, расположенные на поверхности бугра параллельно склонам, и субвертикальные трещины в озерных илах, по мнению Б. Вюннеманна, свидетельствуют о молодом возрасте и быстром росте этого бугра. В обнажении на южной стороне бугра в 2005 г. был описан слой черных мерзлых озерных илов со слоистой и сетчатой криогенной текстурой, мощностью более 3 м в основании бугра. Объемная льдистость здесь превышает 50 %. Над черными илами залегают прослой мощностью 2–6 см, сложенный уплотненными остатками озерных водорослей.

Бугор высотой 10 м расположен на абсолютной высоте 4527 м, его длина более 180 м, ширина около 100 м. Этот бугор лишен растительного покрова из-за толстой рыхлой солевой присыпки на поверхности. Черные озерные илы на глубине 380–330 см (около 4,2 м над уровнем озера) перекрыты легкой серой глиной до глубины 285 см. Эти отложения содержат многочисленные ледяные линзы мощностью в несколько сантиметров и

формируют крупносетчатую криогенную текстуру. Глины и озерные илы содержат переотложенную органику, датированную 34–12 тыс. лет назад. Возраст этих глин около 6 тыс. лет, судя по датировке органики *in situ* вблизи кровли озерных отложений. Б. Вюннеманн полагает, что отложения в ядре 10-метрового литальза были подняты в результате пучения по крайней мере на 8–10 м. В придонном слое серого суглинка, подстилаемого черным илом, подземный лед формирует строгую сетчатую криотекстуру с величиной ячеек до 15 см. Криогенное строение этих суглинков в этой части разреза практически идентично криотекстуре, вскрытой в нижней части большого бугра в долине р. Сенца.

Размеры ячеек изменяются от крупных к мелким, криотекстура становится мелкосетчатой вниз по разрезу в связи с увеличением содержания органического материала в этом направлении. В целом, рассматривая вскрытый 4-метровый разрез 10-метрового бугра, можно отметить особенности криогенного строения ледоминарального ядра: в верхней его части криотекстуры мелкосетчатые и слоистые, в нижней – крупносетчатые и блоковые.

Оценивая возраст ледоминарального бугра (литальза) в долине оз. Акколь, Г. Ивахана с соавторами рассчитали, что основная часть отложений в ядре могла накопиться за 1230 лет после освобождения долины от ледника Софийского, существовавшего здесь между 7650 и 5700 лет назад [Iwahana et al., 2012]. Согласно Ф. Кальмелю и М. Алларду, литальза в Иннуитском регионе также формировались после отступления ледников, между 8200 и 3500 лет назад. В течение периодов похолодания климата (1550–1000 и 500–100 лет назад) ледоминаральные бугры пучения росли более интенсивно [Calmels, Allard, 2008]. Ф. Кальмель с соавторами получили очень низкие значения трития в сегрегационном льду литальза – от 0,8 ТЕ в нижней части разреза до 2 ТЕ в верхней [Calmels et al., 2008a]. Это указывает на то, что с начала 1960-х гг. поверхностные воды не участвовали в формировании льдистого ядра ледоминарального бугра или же их участие было очень ограниченным, в виде незначительной примеси к более древним водам, имеющим низкие концентрации трития. Комментируя эти исследования литальза в северном Квебеке, А. Писсар [Pissart, 2010] вернулся к уже забытой идее о росте бугров не только за счет формирования сегрегационного льда, но и за счет изменения плановой конфигурации бугров, высказанной около 100 лет назад [Eakin, 1916].

Согласно Б. Вюннеманну, существенное сокращение соленых озер в высокогорной котловине Цо Кар в Индии произошло около 4000 лет назад, а последнее сокращение площади озер до современных размеров – 60 лет назад. С этими события-

ми Б. Вюннеманн связывает активизацию роста литальза [Wünnemann et al., 2008, 2010].

С.А. Харрис [Harris, 1993] исследовал литальза на южном берегу оз. Фокс (юго-западная часть территории Юкон в Канаде). Он проследил этапы формирования от низких травяных бугров до бугров, покрытых кустарниками, и крупных зрелых бугров (высотой 3 м и более) с произрастающими на них высокими деревьями. По данным [Harris, 1993], средняя продолжительность роста литальза составляет как минимум 380 лет. Исследования растительного и лишайникового покрова показали, что наиболее подходящие условия для роста и сохранения бугров в стабильном состоянии существовали примерно от 1600 до 1987 г.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Ледоминаральные бугры (литальза) чаще встречаются в тонкодисперсных многолетнемерзлых отложениях горных котловин. Их местонахождения известны в Восточном Саяне, Горном Алтае, северном и южном Тибете, на плато Альтиплано в Андах. Морфология литальза различных районов земного шара характеризуется следующими чертами: высота их изменяется от 5 до 10 м, диаметр – от десятков до первых сотен метров. В криогенном строении преобладают средние и крупносетчатые криогенные текстуры.

- Зарождение и первоначальный рост ледоминаральных бугров может происходить на стадии обмеления озерного водоема. Питание литальза водой происходит в основном при промерзании водонасыщенных дисперсных грунтов. Существуют также литальза с частично атмосферным и озерным типами питания. Скорость роста литальза, как правило, достаточно высока и составляет нередко десятки сантиметров в год. Высота литальза возрастом 50–100 лет достигает 5 м и более.

- Изотопные значения в ядре льда литальза обычно изменяются в пределах 3–4 ‰ по  $\delta^{18}\text{O}$  и до 20 ‰ по  $\delta\text{D}$ . Более высокие изотопные значения обычно маркируют горизонт инициализации промерзания.

- Вскрытые ледогрунтовые залежи представляют собой ядра минеральных бугров пучения инъекционно-сегрегационного типа (литальза).

- Вертикальное и латеральное распределение стабильных изотопов кислорода и водорода свидетельствует в пользу каскадности формирования ледоминаральных залежей: на первом этапе образуется ледоминаральное ядро большого бугра, на втором – небольшого бугра.

- Немного более изотопически тяжелый лед большого бугра (значения  $\delta^{18}\text{O}$  от –18,4 до –20,3 ‰) по сравнению со льдом небольшого бугра (значения  $\delta^{18}\text{O}$  от –19,7 до –21,0 ‰) может указывать на постепенное отжатие изотопически более легких вод по мере промерзания водонасы-

ценных дисперсных грунтов от центральных к периферийным частям бугристого массива. Судя по незначительным вариациям значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta\text{D}$ , можно предположить, что в течение промерзания и формирования ледоминальных бугров происходил интенсивный приток воды, поэтому, несмотря на постоянное изъятие изотопически более тяжелой воды на формирование сегрегационного льда, не произошло заметного изотопного фракционирования в процессе промерзания и шпирового льдообразования от центральных к периферийным частям массива.

• Местоположение горизонта первичного промерзания с более высокими изотопными значениями зависит от геокриологической ситуации, он может находиться как в верхней, так и в средней части ледоминального ядра.

Авторы выражают благодарность Го Ивахане за предоставленные фотографии литальза на оз. Акколь, а также проф. В.В. Рогову за конструктивные замечания.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект 13-05-01075, 13-05-00361), а также в рамках Программы Президиума РАН 4.11 "Реконструкция процессов опустынивания в Центральной Азии по ледникам и ледниковым комплексам"; Ю.К. Васильчук, Н.А. Буданцева и Ю.Н. Чижова выполнили работу при поддержке РНФ (№ 14-27-00083).

### Литература

- Аржаников С.Г., Иванов А.В., Аржаникова А.В., Демонтерова Е.И. Долина вулканов в Восточном Саяне // Наука из первых рук, 2013, № 5/6 (53/54), с. 67–82.
- Васильчук Ю.К. Выпуклые бугры пучения многолетнемерзлых массивов / Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук, Н.А. Буданцева, Ю.Н. Чижова. М., Изд-во Моск. ун-та, 2008, 558 с.
- Васильчук Ю.К. Экспериментальное изучение изотопного фракционирования при конжеляционном льдообразовании // Криосфера Земли, 2011, т. XV, № 3, с. 51–55.
- Конищев В.Н., Голубев В.Н., Рогов В.В., Сократов С.А., Токарев И.В. Экспериментальное исследование изотопного фракционирования воды в процессе сегрегационного льдообразования // Криосфера Земли, 2014, т. XVIII, № 3, с. 3–10.
- Уошборн А.Л. Мир холода. Геокриологические исследования / А.Л. Уошборн. М., Прогресс, 1988, 382 с.
- Åhman R. The structure and morphology of minerogenic palsas in northern Norway // Biuletyn Peryglacjalny, 1976, No. 26, p. 25–31.
- Allard M., Rousseau L. The internal structure of a palsa and peat plateau in the Riviere Boniface region, Québec: inferences on the formation of the ice segregation // Géographie physique et Quaternaire, 1999, vol. 53, No. 3, p. 373–387.
- Allard M., Seguin M.K., Levesque R. Palsas and mineral permafrost mounds in northern Québec // Intern. Geomorphology, Pt II / Ed. V. Gardiner, London, John Wiley, 1986, p. 285–309.
- Arzhannikov S.G., Braucher R., Jolivet M. et al. History of Late Pleistocene glaciations in the central Sayan-Tuva Upland (southern Siberia) // Quatern. Sci. Revs., 2012, vol. 49, p. 16–32.
- Calmels F. Genèse et structure du pergélisol. Étude de formes périglaciaires de soulèvement au gel au Nunavik (Québec nordique), Canada / Thèse de doctorat ... Philosophiac Doctor (Ph. D), Université Laval, 2005, 169 p.
- Calmels F., Allard M. Segregated ice structures in various heaved permafrost landforms through CT Scan // Earth Surf. Process. and Landf., 2008, vol. 33, p. 209–225.
- Calmels F.C., Allard M., Delisle G. Development and decay of a lithalsa in Northern Québec: a geomorphological history // Geomorphology, 2008a, vol. 97, iss. 3–4, p. 287–299.
- Calmels F.C., Delisle G., Allard M. Internal structure and the thermal and hydrological regime of a typical lithalsa: significance for permafrost growth and decay // Can. J. Earth Sci., 2008b, vol. 45, No. 1, p. 31–43.
- Delisle G., Allard M., Fortier R., Calmels F., Larriveé É. Umiujaq, northern Québec: innovative techniques to monitor the decay of a lithalsa in response to climate change // Permafrost and Periglacial Processes, 2003, vol. 14, iss. 4, p. 375–385.
- Dionne J.-C. Formes et phenomenes periglaciaires en Jamesie, Québec subarctique // Géographie physique et Quaternaire, 1978, vol. 32, p. 187–247.
- Eakin H.M. The Yukon Koyukok Region // U.S. Geol. Surv., 1916, bull. 631, 88 p.
- Harris S.A. Palsa-like mounds developed in a mineral substrate, Fox Lake, Yukon Territory // Proc. of the Sixth Intern. Permafrost Conf., Beijing, China, 1993, vol. 1, p. 238–243.
- Hurlbert S.H., Chang C.C.Y. Ancient ice islands in salt lakes of the Central Andes // Science, 1984, vol. 224, No. 4646, p. 299–302.
- Hurlbert S.H., Chang C.C.Y. The distribution, structure, and composition of freshwater ice deposits in Bolivian salt lakes // Hydrobiologia, 1988, vol. 158, No. 1, p. 271–299.
- Iwahana G., Fukui K., Mikhailov N., Ostanin O., Fujii Y. Internal structure of a lithalsa in the Akkol Valley, Russian Altai Mountains // Permafrost and Periglacial Processes, 2012, vol. 23, iss. 2, p. 107–118.
- Lagarec D. Cryogenic mounds as indicators of permafrost conditions, northern Québec // Proc. of the Fourth Canadian Permafrost Conf., Roger Brown Memorial Volume, Ottawa, Canada, 1982, p. 43–48.
- Pissart A. Palsas, lithalsas and remnants of these periglacial mounds. A progress report // Progress in Phys. Geography, 2002, vol. 26, p. 605–621.
- Pissart A. The side growth of lithalsas: some comments on observations in Northern Québec // Permafrost and Periglacial Processes, 2010, vol. 21, p. 362–365.
- 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, vol. 204, p. 302–313.
- Wünnemann B., Reinhardt C., Kotlia B.S., Riedel F. Observations on the relationship between lake formation, permafrost activity and lithalsa development during the last 20,000 years in the Tso Kar basin, Ladakh, India // Permafrost and Periglacial Processes, 2008, vol. 19, p. 341–358.
- Wünnemann B., Demske D., Tarasov P.E. et al. Hydrological evolution during the last 15 kyr in the Tso Kar lake basin (Ladakh, India), derived from geomorphological, sedimentological and palynological records // Quatern. Sci. Revs., 2010, vol. 29, iss. 9–10, p. 1138–1155.

Поступила в редакцию  
2 сентября 2014 г.