

УДК 631.4:551.345.3

ЦИКЛИТНОЕ СТРОЕНИЕ ИЗОТОПНОЙ ДИАГРАММЫ ЛЕДОМИНЕРАЛЬНОГО БУГРА ПУЧЕНИЯ И ЕГО РАДИОУГЛЕРОДНЫЙ ВОЗРАСТ, ДОЛИНА РЕКИ СЕНЦА, ВОСТОЧНЫЙ САЯН

Ю. К. Васильчук^{1,*}, Дж. Ю. Васильчук¹, С. В. Алексеев², Н. А. Буданцева¹,
Л. П. Алексеева², А. К. Васильчук¹, Е. А. Козырева², А. А. Светлаков²

Представлено академиком РАН Н.С. Касимовым 26.04.2019 г.

Поступило 13.05.2019 г.

Исследованы ледоминаральные бугры пучения — литальза, расположенные на первой террасе р. Сенца в Окинском районе Республики Бурятия. Наиболее характерной особенностью изотопных диаграмм, полученных по льду ледяного ядра, вскрытого 20-метровой скважиной, является их циклитное строение: три изотопных минимума на глубинах примерно 3–5, 9–12 и 18–21 м разделены двумя выраженными изотопными максимумами. Наиболее вероятно, что это связано с цикличностью трёхкратного подтопления растущего бугра и последующего активного испарения озёрно-болотной воды — основного источника влаги ледяного ядра литальза. На основании детального радиоуглеродного датирования органического материала из верхних горизонтов наиболее высокого и окружающих его бугров установлено время их образования. Активное накопление органического материала осушенных пучинистых грунтов происходило от 0,5 до 0,2 тыс. лет назад. Это время начала формирования многолетнемёрзлых толщ, активного льдообразования и связанного с ним пучения и формирования литальза. Возраст, по крайней мере, трёх из четырёх изученных бугров не старше 200 лет, он совпадает с похолоданием начала XIX в.

Ключевые слова: ледоминаральные бугры пучения, изотопные диаграммы, циклитное строение, голоцен, река Сенца.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524895506-511>

Цель работы — определить с помощью радиоуглеродного датирования время формирования ледоминаральных бугров пучения — литальза — и реконструировать условия их промерзания по изотопному составу льда. Ранее возраст ледоминаральных бугров пучения в долине р. Сенца оценивался поздним плейстоценом, а происхождение льда в ядре бугров связывалось с захоронением ледникового льда [1].

Исследованный участок (рис. 1) находится на левом берегу долины р. Сенца (52°39,827' с.ш., 99°29,858' в.д.) в западной части Окинского плоскогорья (Восточный Саян).

На поверхности первой террасы р. Сенца (абсолютная высота 1387 м) изучены и разбурены крупные литальза высотой от 4 до 7 м [2]. Температура грунтов самого крупного литальза (высотой 7 м) составляет –2,1 °С (на глубине 10 м) и –1,0 °С (на глубине 20,4 м) [3]. По данным геофизических

исследований [4] мощность многолетнемёрзлых пород здесь, скорее всего, не менее 30 м.

На склонах литальза развиты горно-степные ландшафтные комплексы, представленные кобрезиево-злаковыми и мелкодерновинно-злаковыми растительными сообществами на маломощных суглинистых подбурах. В межбугровом понижении расположено крупное заболоченное озеро, вокруг него растительность более гидрофильная: луговая и лугово-болотная. Вершина наиболее крупного из исследованных бугров (высотой 7 м) на левом берегу р. Сенца залесена, в древесном ярусе преобладает лиственница.

В скважине глубиной 20 м, заложенной на вершине самого высокого семиметрового бугра пучения (литальза) (пробуренной 16 июля 2016 г., 52°39,795' с.ш. и 99°29,877' в.д.), исследован литологический состав отложений и криогенное строение:

0–0,8 м. Супесь светло-серая талая сухая.

0,8–2,0 м. Супесь тёмно-серая мёрзлая неравномерно льдистая. В верхней части шлиры толщиной до 10 мм, на глубине около 2 м толщина линз и прослоев льда достигает 15 мм.

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

²Институт земной коры Сибирского отделения Российской Академии наук, Иркутск

*E-mail: vasilch_geo@mail.ru

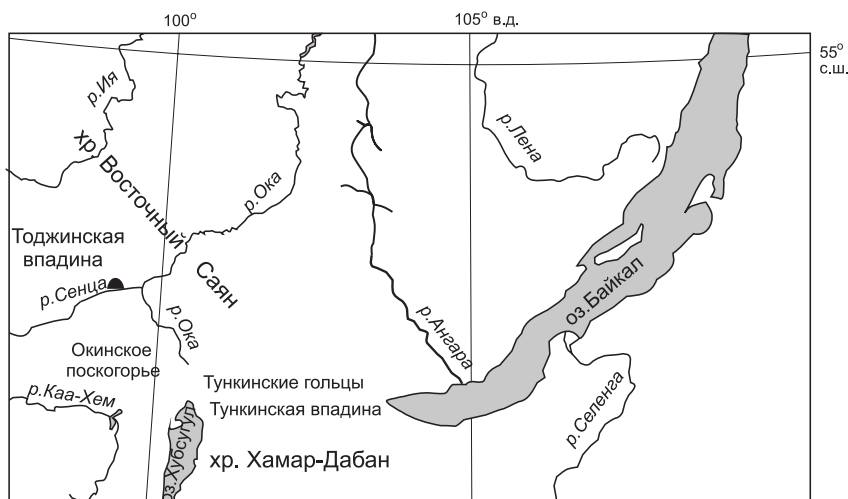


Рис. 1. Район исследований бугров с ледогрунтовым ядром — литальза — в долине р. Сенца, Восточный Саян.

2,0–2,3 м. Лёд белый, насыщен пузырьками воздуха диаметром до 2–3 мм, с редкими включениями грунта диаметром 2–3 см, образующий линзы.

2,3–2,8 м. Супесь тяжёлая, почти суглинок, тёмно-серая, мёрзлая, в массе грунта выделяются блоки (до 10 мм) и линзы (до 5–8 мм) льда.

2,8–3,35 м. Лёд прозрачный серый, чистый.

3,35–6,3 м. Супесь сильно льдистая (льдистость 60–70%): ледогрунт, криогенная текстура — крупношлировая и местами базальная. Мощность шпиров льда 5–7 см, некоторых — до 10 см, мощность минеральных прослоев 3–7 см, максимум 10 см.

6,3–7,7 м. Суглинок желтовато-серый и голубовато-серый, мёрзлый. Редкие шпирьы льда толщиной 1–2 мм расположены наклонно и горизонтально.

7,7–8,4 м. Суглинок сильнольдистый (льдистость более 60%): ледогрунт.

8,4–9,0 м. Голубовато-серая супесь с массивной криотекстурой и льдистостью около 10%.

9,0–20,4 м. Ритмичное переслаивание голубовато-серых суглинков толщиной 40–50 см и линз чистого льда толщиной от 1,5 до 10–15 см [5]. Криотекстура суглинка массивная, с глубины 18,5 м переходит в сетчатую. На глубине 18,0–18,6 м вскрыты три мощных шпирьа льда: 3, 4 и 7 см. Лёд в линзах прозрачный, с мелкими и крупными газовыми пузырьками (диаметром до 3 мм).

В отличие от нижней части ледяного ядра, где состав льда гидрокарбонатно-кальциевый, сегрегационный лёд в верхней части разреза аммонийно-гидрокарбонатный [6]. Вероятно, естественный источник аммония во льду — биохимическая деградация белковых веществ — прежде всего органического вещества животного происхождения — при-

жизненных выделений гидробионтов (бактерий, ракообразных и др.), а также других органических остатков, характерных для болот этого региона. Озёрные и болотные воды наравне с атмосферными могли быть источником питания ледогрунтового ядра литальза.

Отмечены значительные изотопные вариации во льду. Изменение значений $\delta^{18}\text{O}$ (от $-20,36$ до $-15,11\text{‰}$, среднее значение $-18,07\text{‰}$) и $\delta^2\text{H}$ (от $-157,9$ до $-120,1\text{‰}$, среднее значение $-138,2\text{‰}$) с глубиной в скважине составляет более 5 и 35% соответственно; заметно варьируется и значение d_{ex} от 16,65 до $-0,22\text{‰}$ (рис. 2). Это указывает на существенные изменения условий промерзания.

Наиболее характерной особенностью полученных изотопных диаграмм является их циклитное строение: три изотопных минимума на глубинах примерно 3–5, 9–12 и 18–21 м разделены двумя выраженными изотопными максимумами. Такое циклитное строение отражает не менее чем трехкратное изменение условий льдообразования при формировании сильнольдистого ядра семиметрового бугра, когда быстрое промерзание сменялось периодом стабилизации фронта промерзания. Вероятнее всего, это было связано с дополнительным обводнением массива при паводках.

Стадийность формирования ледяного ядра нам представляется следующим образом: вначале существовал заболоченный водоём старичного типа; интенсивное летнее испарение привело к его заметному обмелению, что снизило роль отепляющего влияния воды, началось промерзание; интенсивный поток изотопически всё более утяжеляющейся воды привёл к формированию первичного бугра пучения с сильнольдистым ядром, вершина которого подня-

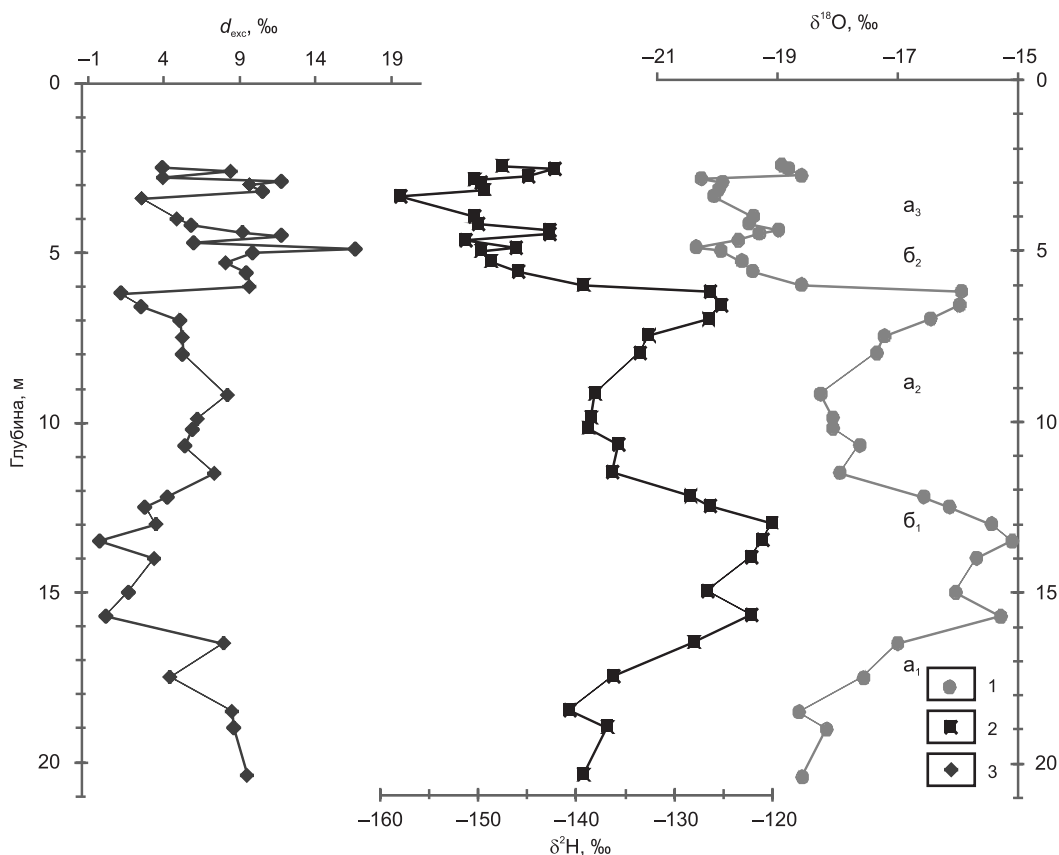


Рис. 2. Распределение по глубине $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exs} в 20-метровой скважине, вскрывшей ядро ледоминарального бугра пучения — литальза — высотой 7 м в долине р. Сенца.

лась над уровнем воды. В этот период формировался лёд со всё более изотопически увеличивающимися значениями, зафиксированными возрастающей ветвью изотопной диаграммы (рис. 2, a_1). В результате повышения уровня р. Сенца произошло подтопление бугра. Поступление большого количества изотопически более лёгкой речной воды, чем испарявшаяся болотная вода, привело к подтоку к фронту промерзания продолжавшего формироваться бугра изотопически более лёгкой воды с исходным изотопным составом по значениям $\delta^{18}\text{O}$ около -17‰ . Первые порции нового сегрегационного (шлирового) льда вследствие криогенного фракционирования при льдообразовании [7] должны были иметь значения $\delta^{18}\text{O}$ около -15‰ . В результате формирования изотопически более тяжёлого льда вода становилась всё легче — процесс происходил в закрытой системе по закону Рэлея [8] с заметным изотопным истощением и из последующей порции воды с изотопным составом -19‰ формировался лёд с около -17‰ , а заключительное промерзание привело к образованию шлиров со значениями $\delta^{18}\text{O}$ около -20‰ . Так как ледоминарально ядро намерзло снизу—вверх, то в этот период формировался

лёд со всё более изотопически лёгкими значениями, зафиксированными убывающей ветвью изотопной диаграммы, и её можно назвать линией изотопного истощения (рис. 2, b_1). В дальнейшем вода вновь последовательно утяжелялась (т.е. происходило изотопное обогащение) в процессе активного летнего испарения. Происходило обмеление водоёма, инициировавшее интенсивное промерзание и дальнейший рост бугра.

Эта последовательно испаряющаяся влага шла на формирование льда со всё более изотопически тяжёлыми значениями, зафиксированными новой восходящей ветвью изотопной диаграммы, и её можно назвать линией изотопного обогащения (рис. 2, a_2). Это подчёркивается и локальным максимумом сульфатов (до 125 мг/дм^3 , т.е. более 27 %-экв.) и аммония (до $27,5 \text{ мг/дм}^3$, т.е. более 15 %-экв.) на гидрохимической диаграмме [6].

Ещё более существенное, чем первое, подтопление участка привело впоследствии к повторному притоку большого количества сравнительно изотопно более лёгкой воды и формированию стратиграфически выше льда со всё более изотопически лёгкими значениями, зафиксированными второй

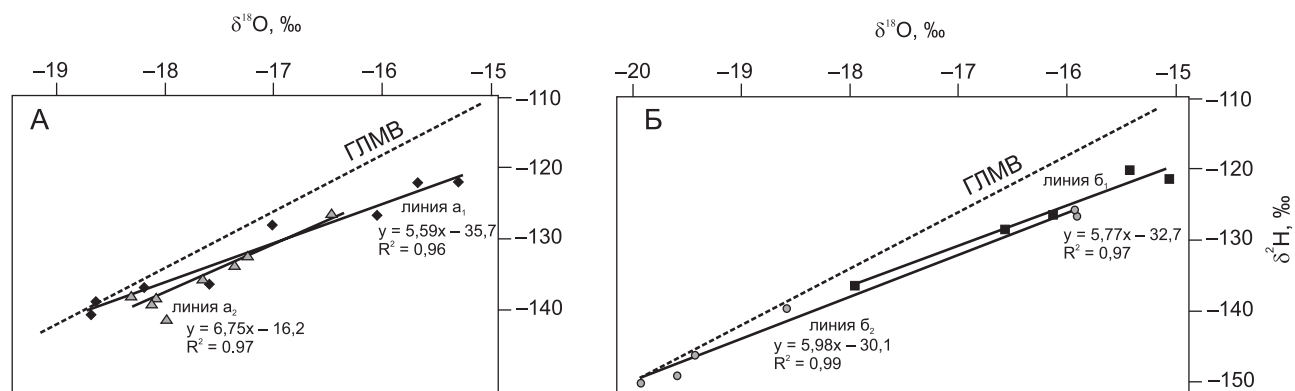


Рис. 3. Соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ в скважине, вскрывшей ядро ледоминерального бугра пучения — литальза — высотой 7 м в долине р. Сенца: а — в пределах возрастающих (связанных с промерзанием испаряющейся воды) фрагментов изотопной диаграммы, б — в пределах убывающих (связанных с криогенным фракционированием после подтопления) фрагментов изотопной диаграммы. ГЛМВ линия — глобальная линия атмосферных (метеорных) вод.

убывающей ветвью изотопной диаграммы (рис. 2, б₂). В этом интервале отмечен локальный минимум сульфатов и аммония [6].

Двугорбый характер возрастающей ветви изотопной диаграммы в самом верхнем фрагменте (рис. 2, а₃), вероятно, связан с поступлением атмосферной влаги (талого снега и дождя), которая служила дополнительным источником питания верхней части ледяного ядра. Это подтверждается и широким диапазоном значений дейтериевого эксцесса в пределах этого фрагмента изотопной кривой: от 2,58 до 16,45‰, обусловленным льдовыделением в условиях открытой системы.

В пределах возрастающих (связанных с промерзанием испаряющейся воды) фрагментов изотопной диаграммы соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ имеет коэффициент 5,59, а в пределах убывающих (связанных с криогенным фракционированием после подтопления) фрагментов изотопной диаграммы соотношение $\delta^2\text{H}-\delta^{18}\text{O}$ имеет коэффициент 5,77, тогда как для Глобальной линии метеорных вод оно равно 8,0.

В долине р. Сенца изучены разрезы верхних горизонтов грунтов, слагающих четыре бугра пучения. На вершинах и склонах бугров пучения встречаются разрозненные линзы торфа. Вероятно, они маркируют время начала процесса пучения.

Радиоуглеродные датировки из озёрных суглинков, слагающих бугры, показали, что суглинки формировались в период от 4,7 до 7 тыс. лет назад [1, 2]. Распределение ^{14}C -датировок в верхнем горизонте грунтов, перекрывающем озёрные суглинки (рис. 4), убедительно свидетельствует, что активное накопление органического материала на поверхности вышедших из-под воды суглинков происходило от 0,5 до 0,2 тыс. лет назад.

С этим временем можно связывать начало формирования многолетнемерзлых толщ на осушенных участках, активное льдообразование и связанное с ним пучение и формирование ледоминеральных бугров пучения. Это значит, что возраст, по крайней мере, трёх бугров пучения не старше 200 лет, он совпадает с похолоданием начала XIX в. Полученная нами изотопная диаграмма является самой представительной из всех изотопных диаграмм, ранее полученных для литальза, и отражает сложную историю формирования бугров, связанную с изменениями гидрологического режима р. Сенца. Сопоставив полученные данные с материалами возраста литальза в других исследованиях, можно говорить о весьма молодом возрасте бугров в долине р. Сенца.

На южном берегу оз. Фокс, юго-западная часть территории Юкон в Канаде, прослежены 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, средняя продолжительность роста литальза составляет как минимум 380 лет [9]. Однако наиболее подходящие условия для роста и сохранения бугров в стабильном состоянии существовали примерно от 1600 до 1987 гг. [9].

Датирование органического материала из верхней части литальза в окрестностях оз. Бол. Невольничье (здесь закартировано около 1800 бугров высотой до 8 м) показало, что от 1200 до 700 лет назад накапливались глинистые илы. Во временном интервале 700 и 300 лет назад произошло формирование литальза и пучение, обусловленное формированием многолетнемерзлых пород и образованием ледяного ядра литальза [10]. Здесь также выполнен изотопный анализ льда в пяти скважинах, пробуренных на од-

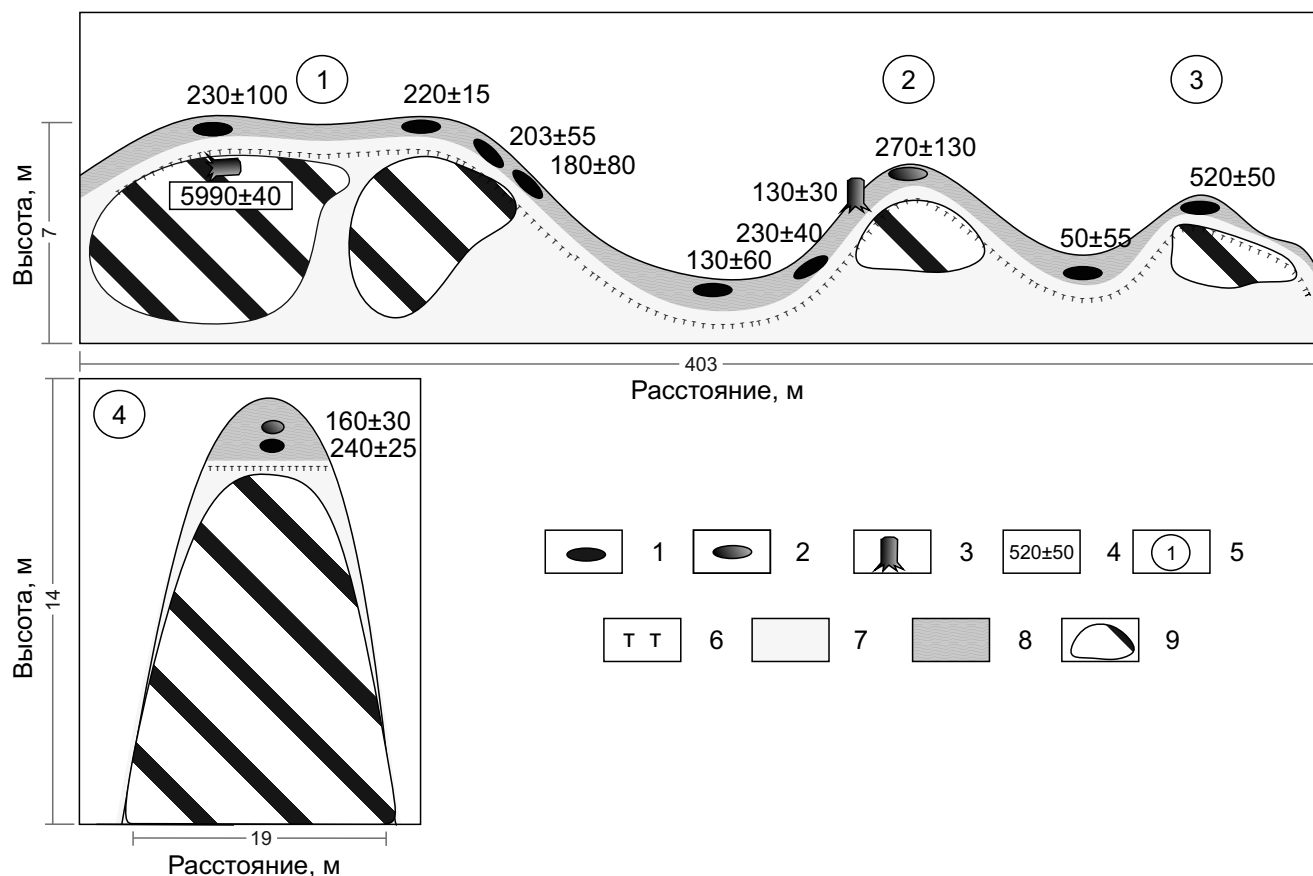


Рис. 4. Радиоуглеродные датировки в почвенном покрове литальза в долине р. Сенца: 1 — линзы торфяных горизонтов; 2 — разложенная древесина; 3 — древесные остатки (корни, ветки); 4 — ^{14}C -возраст, лет назад; 5 — порядковый номер бугра пучения; 6 — граница сезонно-талого слоя; 7 — мёрзлый суглинок; 8 — сезонно-талый слой; 9 — линзы льда.

ном бугре, — литальза высотой около 4 м ($62^{\circ}32'$ с.ш., $114^{\circ}58'$ з.д., на высоте 156 м н.у.м., в 30 км западнее г. Йеллоунайф, северо-западная территория Канады). По всем скважинам получены в целом убывающие изотопные диаграммы [10]. По данным бурения 8,4-метровой скважины на вершине бугра, в которой на глубине 4 м получена ^{14}C -датировка 720–660 калибр. лет, значения $\delta^{18}\text{O}$ в ледоминарльном ядре снижались примерно от $-15,2\%$ до $-18,5\%$. По [10] вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ во льду литальза указывают на то, что источником подземных вод являются прежде всего современные поверхностные воды.

В ядре литальза, расположенного вблизи пос. Умиуяк, в Нунавике, Северный Квебек, вблизи побережья Гудзонова залива ($56^{\circ}36,63'$ с.ш., $76^{\circ}12,85'$ з.д., на высоте 185 м н.у.м.) значения $\delta^{18}\text{O}$ по данным бурения семиметровой скважины варьировались от $-14,33\%$ до $-16,19\%$, в среднем составляя $-15,20\%$, а значения $\delta^2\text{H}$ от $-100,64\%$ до $-123,25\%$, в среднем составляя $-111,70\%$ [11]. Изотопная диаграмма в целом убывающая — отмечена общая тенденция

снижения изотопных значений снизу—вверх, т.е. процесс формирования ледяного ядра был односторонним и происходил в закрытой системе по модели рэлеевского истощения.

Рост литальза на р. Сенца могли активизировать в периоды минимумов солнечной активности Маундера [12] (~ с 1645 по 1715 г.) и Дальтона [13] (~ с 1790 по 1830 г.), которые приводили к понижению средних глобальных температур. Но основными причинами, вероятно, явились понижение уровня воды в реке, выход на поверхность сильно пучинистых тонкодисперсных толщ, неоднократное их подтопление, а также развитие оторфованности грунтов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А.А. Рыбченко, Д.В. Котелевцу и А.В. Дубынину за помощь в проведении полевых работ и Ю.Н. Чижовой за участие в изотопных измерениях.

Источники финансирования. Исследования частично финансировались РФФИ (грант 18–05–60272 Арктика, радиоуглеродный анализ) и РНФ (грант 19–17–00126, изотопные определения).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Arzhannikov S.G., Braucher R., Jolivet M., Arzhannikova A.V., Vassallo R., Chauvet A., Bourles D., Chauvet F.* // *Quaternary Science Reviews*. 2012. V. 49. P. 16–32.
2. *Vasil'chuk Yu.K., Alekseev S.V., Arzhannikov S.G., Alekseeva L.P., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N., Arzhannikova A.V., Vasilchuk A.C.* // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2016. V. 27. Iss. 3. P. 285–296. DOI: 10.1002/ppp.1876.
3. *Светлаков А.А.* Особенности температурного режима грунтов в условиях южной геокриологической зоны Восточной Сибири: Дис. ... канд. геол.-минер. наук. Иркутск, 2018. 153 с.
4. *Котелевец Д.В., Васильчук Дж.Ю.* // *Арктика и Антарктика*. 2018. № 1. С. 122–132. DOI: 10.7256/2453-8922.2018.1.25935.
5. *Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Светлаков А.А., Козырева Е.А., Васильчук Ю.К.* // *Арктика и Антарктика*. 2017. № 2. С. 136–149. DOI: 10.7256/2453-8922.2017.2.23037.
6. *Алексеев С.В., Алексеева Л.П.* // *Лед и снег*. 2018. Т. 58. № 4. С. 524–536. DOI: 10.15356/2076-6734-2018-4-524-536.
7. *Васильчук Ю.К.* // *Криосфера Земли*. 2011. Т. XV. № 3. С. 51–55.
8. *Rayleigh J.W.S.* // *Philosophical Magazine. Ser. 5*. 1896. V. 42. № 259. P. 493–498. DOI: 10.1080/14786449608620944.
9. *Harris S.A.* // *Proc. Sixth Int. Permafrost Conf. Beijing, China*. 1993. V. 1. P. 238–243.
10. *Gaanderse A.J.R., Wolfe S.A., Burn C.R.* // *Earth Surface Processes and Landforms*. 2018. V. 43. Iss. 5. P. 1032–1043. DOI: 10.1002/esp.4302.
11. *Calmels F.* Genèse et Structure du Pergélisol. Étude de Formes Périglaciaires de Soulèvement au Gel au Nunavik (Québec Nordique), Canada: Thèse de doctorat, Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec, 2005. 169 p.
12. *Eddy J.A.* // *Science. New Series*. 1976. V. 192. № 4245. P. 1189–1202.
13. *Wagner S., Zorita E.* // *Climate Dynamics*. 2005. V. 25. Iss. 2/3. P. 205–218.

**CYCLIC STRUCTURE OF THE ISOTOPIC DIAGRAM
OF THE LITHALSA AND ITS RADIOCARBON AGE,
SENTSA RIVER VALLEY, EASTERN SAYAN**

**Yu. K. Vasil'chuk¹, J. Yu. Vasil'chuk¹, S. V. Alexeyev², N. A. Budantseva¹,
L. P. Alexeyeva², A. C. Vasil'chuk¹, Ye. A. Kozyreva², A. A. Svetlakov²**

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation*

²*Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Irkutsk, Russian Federation*

Presented by Academician of the RAS N.S. Kasimov April 26, 2019

Received May 13, 2019

The lithalsa, located on the first terrace of the Sentsa River in Okinsky district of the Republic of Buryatia, were studied. The most typical features of isotopic diagrams, obtained from the ice core from the 20-meter borehole, is their stage structure: three isotope minima at depths of approximately: 3–5, 9–12, and 18–21 m are separated by two distinct isotope maxima. Most likely, this is due to the cycle of the triple flooding of the growing permafrost mound and the subsequent active evaporation of the lake water — the main source of water in the ice core of lithalsa. Based on the detailed radiocarbon dating of organic material from the upper layers of the highest and surrounding lithalsas, the time of their formation was established. The active accumulation of organic material in dried heaving soils occurred from 0,5 to 0,2 ka BP. This is the time of the beginning of the formation of permafrost, active ice formation and the associated heaving process and lithalsa growth. The age of at least 3 of 4 studied mounds is not older than 200 years, it coincides with the cooling in the early 19th century.

Keywords: lithalsa, isotopic diagrams, stage structure, the Holocene, Sentsa River.