

## ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ $\delta^{18}O/\delta D$ ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ МОМО-СЕЛЕННЯХСКОЙ ВПАДИНЫ И АБЫЙСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

<sup>1</sup>Торговкин Н.В., <sup>1</sup>Тумской В.Е., <sup>2</sup>Платонов И.А., <sup>2</sup>Тарасов А.И., <sup>1</sup>Романис Т.В.

<sup>1</sup> Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия,

<sup>2</sup> МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

По соотношению стабильных изотопов кислорода и водорода в повторно-жильных и текстурных льдах можно приблизительно реконструировать климатические условия их формирования. В настоящей работе впервые приводятся результаты изотопных исследований подземных льдов, отобранных авторами в ходе экспедиционных работ в среднем течении р. Индигирка.

Ключевые слова: *повторно-жильные льды, текстурообразующие льды, ледовый комплекс, стабильные изотопы кислорода и водорода, дейтериевый эксцесс, палеоклимат*

Повторно-жильные льды (ПЖЛ) отложений ледового комплекса активно изучаются при помощи изотопных методов отечественными и зарубежными исследователями в качестве архивов зимних условий позднего неоплейстоцена и голоцена. Изучение изотопного состава текстурообразующих льдов (ТЛ) позволяет охарактеризовать условия промерзания вод сезонно-талого слоя.

Наши полевые исследования проводились в долине реки Индигирки от пос. Усть-Нера до пос. Белая Гора. На этом участке протяженностью около 1000 км, Индигирка пересекает хребет Черского, Момо-Селенняхскую впадину, Момский хребет и выходит на Абыйскую низменность (Рис. 1А). На этой территории были найдены 5 обнажений ледового комплекса, в пределах которых опробовались ПЖЛ. Отбор образцов из них производился горизонтально. Текстурообразующие и термоэрозионно-пещерные льды отбирали вертикально, учитывая условия их залегания (Meuser, 2002). Пробы льда отбирались аккумуляторной дрелью при помощи цилиндрической насадки с внутренним диаметром 20-25 мм, лед из первого забура удалялся во избежание смешивания с талыми водами, затем производилось еще 3-4 забура вглубь льда.

Первое обнажение расположено на левом берегу р. Индигирка, выше устья р. Тирехтах, в южной части Момо-Селенняхской впадины. Обнажение представляет собой подмыв цокольной террасы высотой до 41 м и длиной 2,5 км, в основании которой вскрываются наклонно залегающие алевриты и песчаники. Выше, примерно до высоты 34 м, они перекрыты аллювиальными отложениями, представленными галечниками с песчано-гравийным заполнителем, выше залегают отложения ледового комплекса мощностью 5-6 м, которые образуют небольшие термоцирки и термоэрозионные овраги. Грунтовые столбы сложены темно-серыми супесями и алевритами с поясковой криотекстурой, в нижней части ледового комплекса присутствуют включения щебня, гальки и гравия. ПЖЛ сингенетические небольшие с видимой мощностью до 6-7 м и шириной до 3 м.

Второе обнажение находится на левом берегу р. Индигирка, на северной окраине Момо-Селенняхской впадины. Видимая мощность ледового комплекса составляет 10-12 м, ширина жил достигает 3-4 м (Рис. 1Б). В краевой части термоцирка обнаружен термоэрозионно-пещерный лед мощностью около 1 м. Сингенетические ПЖЛ вертикально полосчатые, грунтовые столбы сложены сизо-серыми алевритами с оторфованными включениями и растительным детритом. Напротив обнажения в разрезе первой надпойменной террасы вскрываются голоценовые ПЖЛ, рассекающие пойменный и русловой аллювий (Рис. 1Г).

Третье обнажение расположено на правом берегу р. Индигирки неподалеку от заброшенного с. Крест-Майор. Ледовый комплекс вскрывается в термоцирках, его

видимая мощность составляет 1-1,5 м, грунтовые столбы сложены серыми алевритами с включениями древесных остатков, криотекстура поясковая. ПЖЛ ледового комплекса своими нижними концами проникают в подстилающие озерные отложения, представленные оглеенными суглинками с включениями древесных остатков, покрытых вивианитом. Ширина ПЖЛ до 1 м, лед вертикально-полосчатый белесый.

Четвертое обнажение – небольшой термоцирк с высотой задней стенки 6-7 м на правом берегу р. Селеннях. ПЖЛ имеют видимую вертикальную протяженность 5-6 м, грунтовый столб (Рис. 1В) представлен буро-серым алевритом с поясковой и массивной криотекстурами, со включениями линз торфа.

Пятое обнажение – известное урочище Малыхчын, расположенное на правом берегу р. Индигирка, в 45 км ниже пос. Белая Гора. Протяженность обнажения около 2 км, высота 35 м относительно уровня р. Индигирки, имеет двухъярусное строение. Нижний уровень от 0 до 13 м сложен коричнево-серыми алевритами с сингенетическими ПЖЛ шириной до 5 м. Здесь же были обнаружены эпигенетические ПЖЛ, ледогрунтовые жилы с волнисто-параллельным строением и термоэрозийно-пещерные льды, вложенные в сингенетические ПЖЛ.

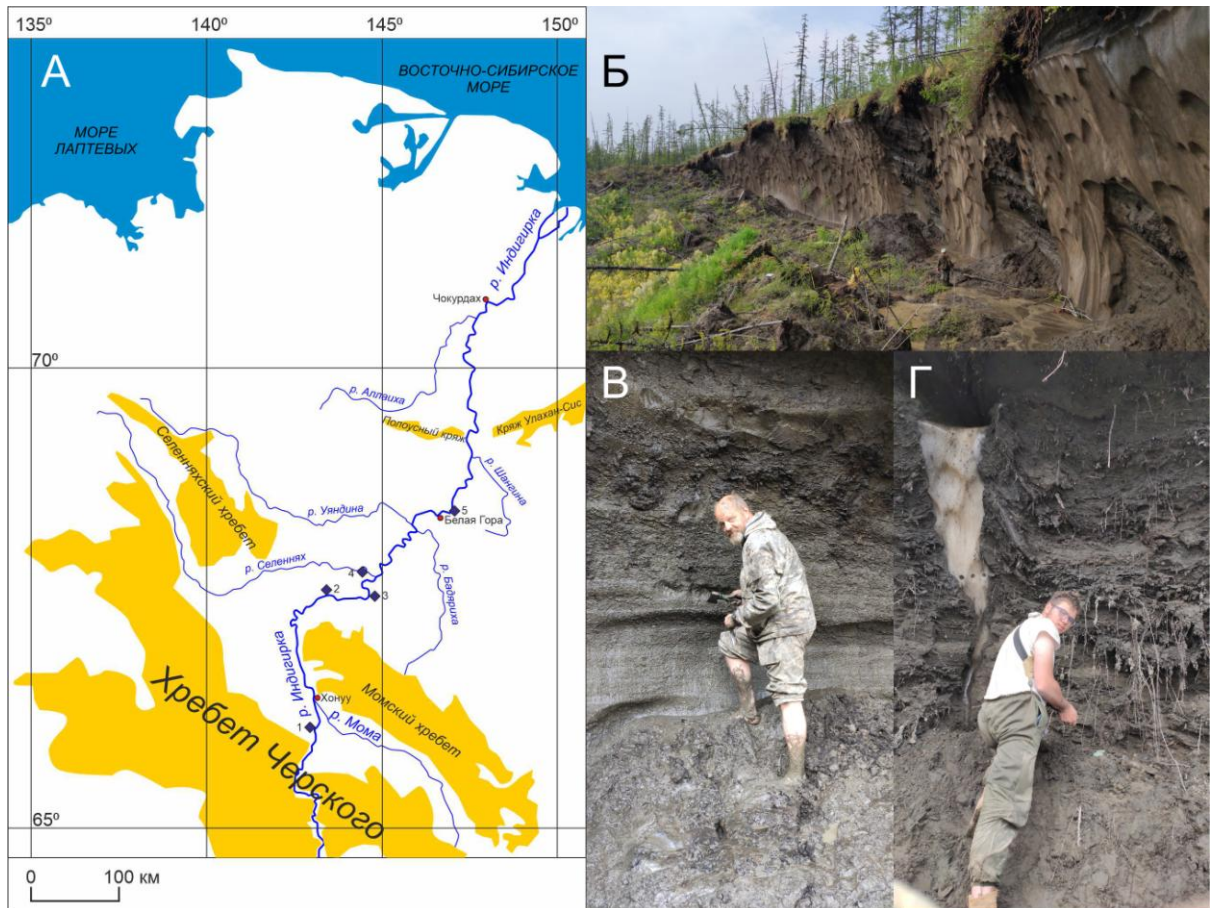


Рис. 1. А – район исследований: 1 – обнажение Тирехтях, 2 – обнажение 2, 3 – обнажение Куберганя, 4 – обнажение Селеннях, 5 – обнажение Малыхчын. Б – ледовый комплекс обнажения 2, В – грунтовый столб обнажения Селеннях, Г – голоценовый ПЖЛ, первая терраса р. Индигирки.

Состав стабильных изотопов кислорода  $\delta^{18}\text{O}$  и водорода  $\delta\text{D}$  был определен на лазерном спектрометре Picarro L2140i в совместной российско-германской лаборатории по изучению стабильных изотопов воды льда и снега в Институте мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН в г. Якутске. Лабораторные измерения проводятся согласно стандартной методике, при которой проводится калибровка относительно международных и внутренних стандартов. Важную роль в палеоклиматических реконструкциях имеет дейтериевый эксцесс ( $d_{\text{exs}}$ ), который рассчитывается следующим образом:  $d_{\text{exs}} = \delta\text{D}$

$8 \cdot \delta^{18}\text{O}$ . Дейтериевый эксцесс указывает на условия испарения при его дефиците менее 8‰ и конденсации при избытке выше 8‰ (т. е. относительную влажность, температуру водной поверхности) в районе источника влаги [Dansgaard, 1964].

В общей сложности было проанализировано: 112 образцов из позднелепистоценовых сингенетических ПЖЛ, 14 образцов из голоценовых ПЖЛ, 4 образца из эпигенетических позднелепистоценовых ПЖЛ, 12 образцов из ледогрунтовых жил, 7 образцов из термоэрозионно-пещерных льдов, 22 образца из текстурообразующих льдов.

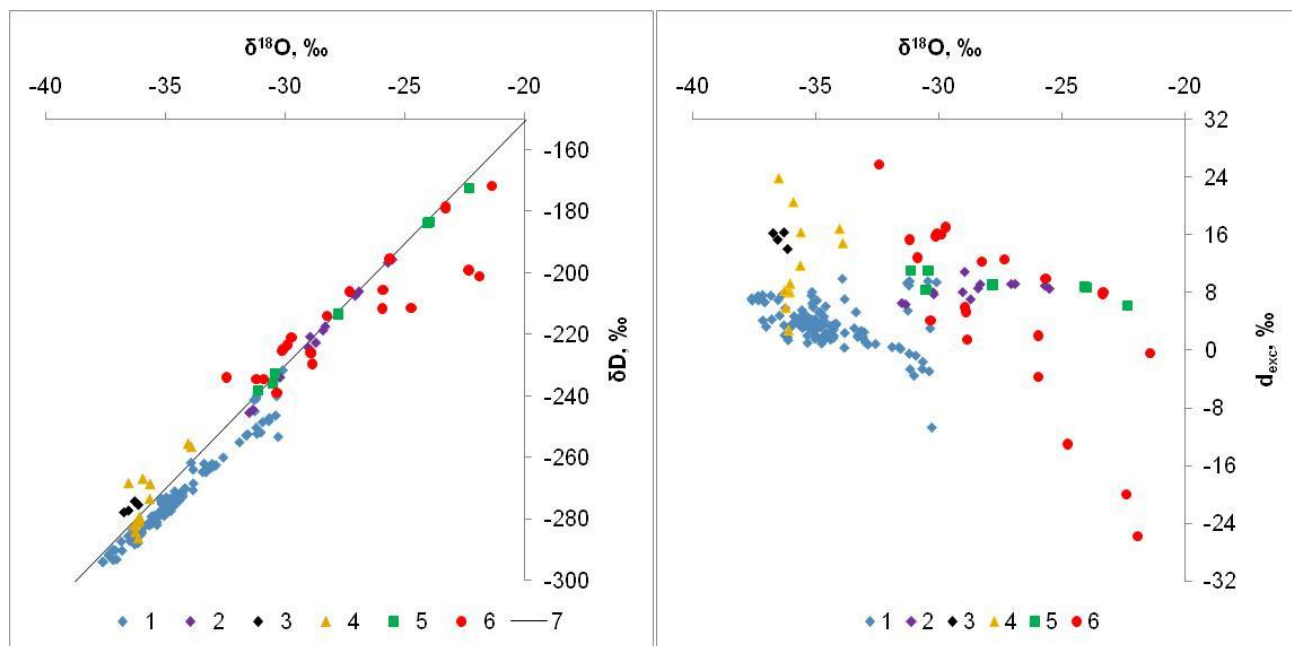


Рис. 2. Соотношение стабильных изотопов  $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$  (слева) и  $\delta^{18}\text{O}/d_{\text{exc}}$  (справа)

1 – позднелепистоценовые сингенетические ПЖЛ, 2 – голоценовые ПЖЛ, 3 – эпигенетические ПЖЛ, 4 – ледогрунтовые жилы, 5 – термоэрозионно-пещерные льды, 6 – текстурообразующие льды, 7 – линия Крейга.

Позднелепистоценовые сингенетические ПЖЛ имеют очень легкий изотопный состав:  $-37,6 \dots -30,1\%$  по  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $-293,9 \dots -231,4\%$  по  $\delta\text{D}$ , что свидетельствует об очень холодных и сухих климатических условиях при формировании ледяных жил. Наиболее легким составом обладают льды первого обнажения, который даже легче, чем в ПЖЛ верхнего уровня Батагайского мегапровала, где средние значения составляют:  $-35,1\%$  по  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $-269,4\%$  по  $\delta\text{D}$ , и  $11,0\%$  по  $d_{\text{exc}}$  [Opel et al., 2017]. Значения  $d_{\text{exc}}$  колеблются в пределах  $-10,9 \dots 9,9\%$ . На рис. 2 видно, что основная часть проб располагается ниже линии Крейга, что свидетельствует о преобладании процесса испарения.

По голоценовым ПЖЛ был получен следующий изотопный состав:  $-31,5 \dots -25,5\%$  по  $\delta^{18}\text{O}$ ;  $-245,4 \dots -195,7\%$  по  $\delta\text{D}$ . Такой состав также можно считать довольно легким. Значения по  $d_{\text{exc}}$  составляют  $6,3 \dots 10,9$  (Рис 2). Справа на рисунке показано, что большая часть ПЖЛ по  $d_{\text{exc}}$  находится в районе 8‰, что говорит об их относительно равновесных условиях формирования.

Эпигенетические ПЖЛ имеют весьма однородный и легкий состав  $-36,4 \pm 0,3\%$  по  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $-276,1 \pm 1,7\%$  по  $\delta\text{D}$ , а по  $d_{\text{exc}}$   $15,5 \pm 1,1\%$ . Здесь, вероятно, имело место быстрое промерзание, о чем свидетельствует высокий  $d_{\text{exc}}$ .

Ледогрунтовые жилы тоже обладают весьма легкими значениями, близкими к эпигенетическим ПЖЛ:  $-35,7 \pm 0,8\%$  по  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $-273,5 \pm 10,4\%$  по  $\delta\text{D}$ ,  $12,3 \pm 6,3\%$  по  $d_{\text{exc}}$ .

Результаты изотопного анализа по термоэрозионно-пещерным льдам следующие:  $-27,2 \pm 3,7\%$  по  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $-208,4 \pm 28,2\%$  и по  $d_{\text{exc}}$   $9,0 \pm 1,6\%$ . Изотопный состав более тяжелый,

чем у других типах льда, при этом образование льда проходило в относительно равновесных условиях.

Изотопный анализ *текстурирующих льдов* показал наибольшую вариабельность результатов среди всех представленных типов подземного льда:  $-32,4 \dots -21,4\%$  по  $\delta^{18}\text{O}$ ;

$-238,7 \dots -171,7\%$  по  $\delta\text{D}$ , значения  $d_{\text{ex}}$  колеблются в весьма широких пределах

$-25,8 \dots +25,7\%$ , что свидетельствует о разных условиях промерзания вод сезонно-талого слоя в позднем неоплейстоцене, в основном неравновесных (испарение-конденсация).

Таким образом, первичные данные об изотопном составе подземных льдов Момо-Селенняхской впадины и Абыйской низменности указывают на крайне суровые климатические условия в позднем неоплейстоцене и голоцене. Об этом свидетельствуют очень легкий изотопный состав сингенетических и эпигенетических ПЖЛ, ледогрунтовых жил и в отдельных случаях текстурирующих льдов. Более детальный анализ палеоклиматических условий будет возможен после получения первых радиоуглеродных датировок.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант 22-17-00176).*

#### ЛИТЕРАТУРА

*Dansgaard W.* Stable isotope in precipitation // *Tellus* 1964. V XVI. № 4. P. 436-468.

*Meyer H., Dereviagin A.Yu., Siegert C., Hubberten H.-W.* Palaeoclimate studies on Bykovsky Peninsula, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ground ice // *Polarforschung*. 2002. Vol. 70. P. 37–51.

*Opel T., Murton J.B., Wetterich S., Meyer H., Ashastina K., Günther F., Grotheer H., Mollenhauer G., Danilov P.P., Boeskorov V., Savvinov G.N., Schirrmeister L.* Past climate and continentality inferred from ice wedges at Batagay megaslump in the Northern Hemisphere's most continental region, Yana Highlands, interior Yakutia // *Climat of the Past*. 2019. Vol. 15. Is. 4. P. 1443–1461. doi:10.5194/cp-15-1443-2019

#### STABLE ISOTOPES $\Delta^{18}\text{O}/\Delta\text{D}$ RATIO OF GROUND ICE IN MOMO-SELENNYAKH DEPRESSION AND ABYSKAYA LOWLAND

<sup>1</sup>*Torgovkin N.V.,* <sup>1</sup>*Tumskoy V.E.,* <sup>2</sup>*Platonov I.A.,* <sup>2</sup>*Tarasov A.I.,* <sup>1</sup>*Romanis T.V.*

<sup>1</sup>Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Based on the ratio of stable isotopes of oxygen and hydrogen in ice-wedges and pore ice, possible to approximately reconstruct of climatic conditions, when ground ices had been developed in Late Pleistocene and Holocene. In this article, for the first time, the results of stable water isotopes studies based on ice material selected by the authors during fieldwork in the middle flow of the Indigirka River.

Keywords: *Ice-wedges, pore ice, Ice Complex, stable isotopes of water, deuterium excess, paleoclimate*