

doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-269-275



СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ КИСЛОРОДА И ВОДОРОДА ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ ЛЕДОВОГО КОМПЛЕКСА (БАСЕЙН РЕКИ ИНДИГИРКИ)

✉Торговкин Н.В.¹, Сивцев Д.Е.^{1,2}, Тумской В.Е.¹

¹Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉n.torgovkin@yandex.ru

Представлены результаты исследования изотопного состава $\delta^{18}\text{O}$ и δD подземных льдов ледового комплекса, опробованных авторами в ходе экспедиционных работ в нижнем течении р. Индигирки в 2023 г. на участке от пос. Белая Гора до пос. Чокурдах. Ввиду плохой обнаженности отложений ледового комплекса, основные работы проводились на двух обнажениях – Малыхчын и Шаманово. Обнажение Шаманово описано авторами впервые.

Ключевые слова: *стабильные изотопы кислорода и водорода, подземные льды, ледовый комплекс, палеоклимат*

Введение. Стабильные изотопы кислорода $\delta^{18}\text{O}$ и водорода δD приблизительно коррелируют с температурой воздуха и их нередко применяют для оценки палеоклиматических условий. Еще во второй половине XX в. В. Дансгором, на основании сопоставления содержаний $\delta^{18}\text{O}$ и температур воздуха от тропических широт до Гренландии и Антарктиды, была выявлена линейная зависимость, выраженная формулой: $\delta^{18}\text{O} = 0,69 \cdot T - 13,6$ [Dansgaard, 1964]. Отсюда следует, что при понижении средней годовой температуры воздуха на 1°C среднее годовое содержание изотопов в осадках уменьшается на $0,7\text{‰}$ для $\delta^{18}\text{O}$ и на $5,6\text{‰}$ для δD . Эта зависимость между изотопным составом и температурой воздуха лежит в основе изотопно-температурного метода палеогеографических исследований [Екайкин, 2016]. Кроме того, изотопные данные, как правило, сравнивают с глобальной линией метеорных вод (ГЛМВ), полученной экспериментально Х. Крейгом, которая имеет вид уравнения: $\delta\text{D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$ [Craig, 1961]. Важную роль в палеоклиматических реконструкциях имеет дейтериевый эксцесс (d_{exc}), который рассчитывается следующим образом: $d_{\text{exc}} = \delta\text{D} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$ [Dansgaard, 1964]. Дейтериевый эксцесс изотопного состава атмосферных осадков формируется в результате кинетического испарения с поверхности Мирового океана [Екайкин, 2016].

Повторно-жильные льды (ПЖЛ) изучаются в качестве архивов зимних климатических условий в неоплейстоцене и голоцене на арктическом побережье России, северо-востоке Сибири, на Аляске и в Канаде [Васильчук, 1992; Meyer et al., 2002; Porter et al., 2020]. В свою очередь текстурные льды (ТЛ) позволяют охарактеризовать условия промерзания вод сезонно-талого слоя, летних или годовых атмосферных осадков [Васильчук, 1992; Деревягин и др., 2013; Porter et al., 2020]. Содержание и соотношение $\delta^{18}\text{O}$ и δD в подземных льдах большинством исследователей применяется для качественных реконструкций палеоклиматических условий в неоплейстоцене и голоцене. Кроме того, соотношение $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ подходит для решения важной криолитологической задачи выяснения условий льдообразования.

Наибольшее внимание для льдов Северо-Востока уделялось изотопному составу повторно-жильных льдов, особенно сингенетических в отложениях ледового комплекса, тогда как текстурные льды изучены гораздо слабее. Совсем мало данных имеется в литературе по другим типам подземных льдов (захороненным, термоэрозионно- и термокарстово-пещерным и т.д.). Для бассейна реки Индигирки информации по изотопному составу подземных льдов имеется крайне немного [Втюрин и др., 1982; Schneider et al., 2016; Takano et al., 2019]. Поэтому в 2022 г. были начаты работы по изучению криостратиграфии и криолитологии четвертичных отложений в среднем и

нижнем течении р. Индигирки [Платонов и др., 2022], включающие, в том числе, и определение $\delta^{18}\text{O}$ и δD подземных льдов в пределах Абыйской низменности [Торговкин и др., 2022].

Объекты исследования. В 2023 г. работы проводились в основном на двух обнажениях – Малыхчын и Шаманово, также были отобраны на анализ летние осадки, вода из р. Индигирки и ручьев у бывшей метеостанции Воронцово и из оврага у обнажения Сыпной Яр (рис. 1).

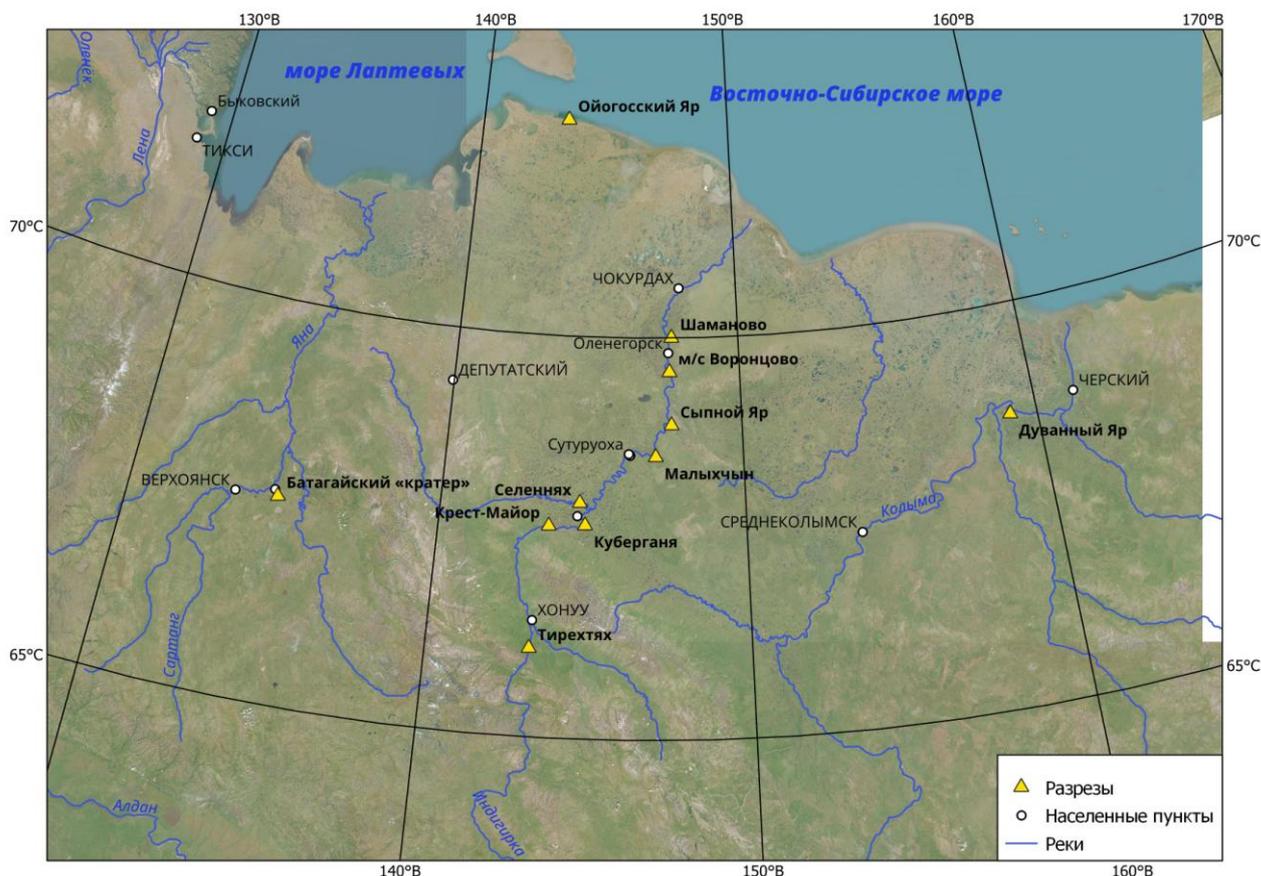


Рис. 1. Обзорная карта района работ и местоположения обнажений.

Обнажение Малыхчын ($68,5^\circ$ с.ш., $147,0^\circ$ в.д.) – известное урочище, которое находится на правом берегу р. Индигирки в 40 км ниже по течению от пос. Белая Гора (Сутуруоха), в пределах Абыйской низменности. Протяженность обнажения около 2 км, высота 50 м относительно уровня р. Индигирки (рис. 2). Разрез вскрытых отложений имеет трехъярусное строение.

Нижний ярус, в интервале высот от 0 до 14 м над рекой, представлен ледовым комплексом, относящимся, возможно, к аллаиховской свите (конец среднего неоплейстоцена). Он сложен буровато-серыми супесями с включениями стяжений марганца размером 2-4 мм и буровато-рыжего оторфованного материала. Включения нитевидных корешков распространены по разрезу фрагментарно. Супеси имеют преимущественно массивную и линзовидную криогенную текстуру, поэтому льдистость ледового комплекса невысока. Толща содержит син- и эпигенетические ледяные жилы, местами встречаются линзы термокарстово-пещерных льдов.

Выше, примерно в интервале 14-17 м, залегает зона перемыва, предположительно коррелирующая с ачгыгыйской свитой (МИС 5), которая сложена оторфованными супесчано-суглинистыми осадками, с хорошо выраженной слоистостью. Толща содержит

большое количество остатков растений и животных. В ней была обнаружена псевдоморфоза, заполненная торфом.

Отложения верхнего яруса (17-50 м) – едомный ледовый комплекс (МИС 3-2). Он представлен темными серо-бурыми супесями с включениями нитевидных корешков и сизых стяжений марганца. Криогенная текстура поясковидная. Едомный ледовый комплекс перекрыт делювиально-солифлюкционным покровным слоем мощностью 3 м.



Рис. 2. Фрагмент обнажения Малыхчын.

Обнажение Шаманово (70° с.ш., 147,6° в.д.) ранее, по-видимому, не описывалось. Оно расположено на правом берегу р. Индигирки в 22 км ниже с. Оленегорск, на западном склоне Кондаковского плоскогорья. В обнажении высотой до 24 м вскрываются отложения едомного ледового комплекса. Ледовый комплекс сложен буровато-серыми супесями с прослоями органики. Едома с двух сторон ограничена аласами, в основании которых залегают сизо-серые плотные таберальные суглинки. Протяженность обнажения составляет около 400 м (рис. 3).



Рис. 3. Общий вид обнажения Шаманово.

На изотопный анализ было отобрано 70 образцов: 41 – из сингенетических ПЖЛ ледового комплекса, 8 – из термоэрозионно-пещерных льдов, 17 – из криотекстурных льдов, 1 образец летних осадков, 3 образца речных вод – из р. Индигирки, ручья из оврага у обнажения Сыпной Яр и ручья у заброшенной метеостанции Воронцово.

Состав стабильных изотопов кислорода $\delta^{18}\text{O}$ и водорода δD был определен на лазерном спектрометре Picarro L 2140-i 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 проводились согласно стандартной методике [vanGeldern, 2013].

Результаты. Сингенетические ПЖЛ едомной свиты с обоих обнажений имеют весьма легкий изотопный состав: $-35,8 \dots -29,4\%$ по $\delta^{18}\text{O}$; $-284,3 \dots -234,5\%$ по δD . Значения дейтериевого эксцесса варьируют в широких пределах: от 0,3 до 9,2‰. Эти значения свидетельствуют о криоаридных климатических условиях, при которых формировались ледяные жилы. ПЖЛ формировались из атмосферных осадков, выпадавших при очень низких температурах, более низких, чем современные зимние осадки, для которых средние значения составляют $-28,5 \pm 2,2\%$ по $\delta^{18}\text{O}$, $-216 \pm 16\%$ по δD , $12 \pm 5\%$ по d_{exc} [Takano et al., 2019].

Было проведено сравнение изотопного состава ПЖЛ едомного (МИС 3-2) ледового комплекса из других обнажений - на р. Индигирке (изученных нами ранее в среднем течении, [Торговкин и др., 2022]), Батагайского «кратера», Ойогосского Яра, Дуванного Яра. Выяснилось, что средние значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD исследованных в 2023 г. ПЖЛ несколько тяжелее их средних значений у ПЖЛ ледового комплекса в среднем течении р. Индигирки и ПЖЛ Батагайского «кратера», но легче, чем у ПЖЛ с обнажений Дуванный Яр и Ойогосский Яр. (рис. 4).

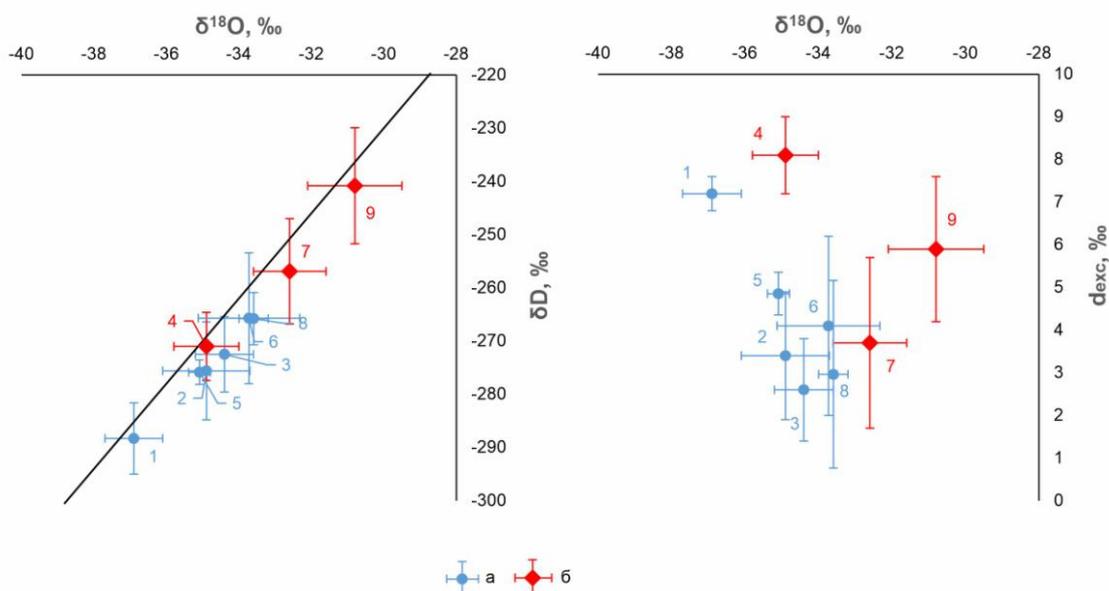


Рис. 4. Сопоставление средних значений $\delta^{18}\text{O}$ и δD ПЖЛ едомного ледового комплекса: а – из обнажений в бассейне р. Индигирки, б – из других обнажений северо-востока Сибири. 1 – обнажение Тирехтях, 2 – обнажение Крест-Майор, 3 – обнажение Куберганя, 4 – Батагайский «кратер» [Opel et al., 2019], 5 – обнажение Селеннях, 6 – обнажение Малыхчын, 7 – Дуванный Яр [Strauss, 2010], 8 – обнажение Шаманово, 9 – Ойогосский Яр [Opel, et al., 2017].

Изотопный состав текстурных льдов аллаиховского ледового комплекса: $-33,6 \dots -28,6\%$ по $\delta^{18}\text{O}$; $-253,6 \dots -221,1\%$ по δD и $8 \dots 18\%$ по d_{exc} . Текстурные льды едомного ледового комплекса в целом имеют схожий изотопный состав: $-35,2 \dots -29,9\%$ по $\delta^{18}\text{O}$; $-253,9 \dots -219,0\%$ по δD и $5 \dots 28\%$ по d_{exc} .

Изотопный состав поверхностных вод: а) река Индигирка: $-21,5\%$ по $\delta^{18}\text{O}$; -164% по δD и $7,4\%$ по d_{exc} (дата отбора - 07.08.2023 г.); б) ручей в овраге у обнажения Сыпной Яр: $-20,5\%$ по $\delta^{18}\text{O}$; -160% по δD и 0% по d_{exc} (дата отбора - 02.08.2023 г.); в) ручей у метеостанции Воронцово: $-17,2\%$ по $\delta^{18}\text{O}$; $-129,3\%$ по δD и $-17,2\%$ по d_{exc} (дата отбора - 07.08.2023 г.). Атмосферные осадки, дождь 27.07.2023 г.: $-17,2\%$ по $\delta^{18}\text{O}$, $-129,3\%$ по δD и 8 по d_{exc} . По данным [Takano et al., 2019] средний изотопный состав реки Индигирка в летние сезоны 2012-2013 гг. для $\delta^{18}\text{O}$ составляет $-21,2 \pm 0,2\%$, для δD $-165 \pm 4\%$ и d_{exc} 6 ± 2 . Средний изотопный состав летних атмосферных осадков равен $-15,6 \pm 2,8\%$ по $\delta^{18}\text{O}$; $-122 \pm 2,8\%$ по δD ; $3 \pm 5\%$ по d_{exc} . Отсюда можно сделать вывод, что изотопный состав воды в р. Индигирка весьма стабилен в летний период, а ручьи имеют преимущественно атмосферное питание.

На обнажении Малыхчын была опробован термоэрозионно-пещерный лед (ТЭПЛ) позднеголоценового возраста. Он имеет многослойное строение и формирует линзу, вложенную сбоку в тело повторно-жильного льда. Сам ТЭПЛ отличается по цвету: верхний слой – лед толщиной 2 см на контакте с ПЖЛ серого цвета, второй слой - белесо-серый лед мощностью до 15 см, ниже желтоватый лед мощностью 10 см с наибольшим количеством пузырьков воздуха и органическими включениями, в нижней части формирует оранжево-коричневые пилообразные пятна. Изотопный состав термоэрозионно-пещерных льдов варьирует в следующих пределах: $-33,3...-23,4\%$ по $\delta^{18}\text{O}$; $-261,1...-178,4\%$ по δD , $1,1...8,7$ по d_{exc} . Средние значения по $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{D}$ примерно равны усредненному составу современных зимних осадков [Takano et al., 2019], однако отличаются в 2 раза более низким значением по d_{exc} : $4,6\%$. Наиболее легкий состав зафиксирован в верхней части желтоватого льда, наиболее тяжелый на контакте желтоватого и серого льда. Очевидно, линза термоэрозионно-пещерного льда сформирована разными типами вод, о чем свидетельствует ее пестрый состав. Также для сравнения были отобраны пробы сингенетического ПЖЛ нижнего ледового комплекса (рис. 5).



Рис. 5. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$ и d_{exc}) термоэрозионно-пещерного льда и ПЖЛ в обнажении Малыхчын.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, грант 22–17–00176 (рук. В.Е. Тумской).

ЛИТЕРАТУРА

Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций): В 2 т. / Ю.К. Васильчук. М., ОТП РАН, МГУ; ПНИИИС, 1992, т. 1, 420 с.; т. 2, 264 с.

Вторин Б.И., Болиховская Н.С., Болиховский В.Ф., Гасанов Ш.Ш. Воронцовский разрез едомных отложений в низовьях р. Индигирка // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 1984, № 53, с. 12-21.

Деревягин А.Ю., Чижов А.Б., Майер Х. и др. Изотопный состав текстурных льдов побережья моря Лаптевых // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 3, с. 27–34.

Екайкин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии. СПб.: ГНЦ РФ ААНИИ, 2016. 63 с.

Платонов И.А., Тумской В.Е., Тарасов А.И., Торговкин Н.В., Романис Т.В. Строение и условия залегания ледового комплекса в долине среднего течения р. Индигирки // Рельеф

и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022. Выпуск 9. С. 211-215. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-211-215

Torgovkin N.V., Tumskoj V.E., Platonov I.A., Tarasov A.I., Romanis T.V. Изотопный состав $\delta^{18}\text{O}/\delta\text{d}$ подземных льдов Момо-Селенняхской впадины и Абыйской низменности // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2022. Выпуск 9. С. 268-271. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-268-271

Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // *Science* 1961. Vol. 133. Is. 3465. P. 1702-1703. doi: 10.1126/science.133.3465.17

Dansgaard W. Stable isotope in precipitation // *Tellus* 1964. Vol. XVI. № 4. P. 436-468. doi: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x

Meyer H., Siegert C., Derevyagin A., Schirrmeyer L., Hubberten H.-W. Paleoclimate reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ice wedges // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2002. Vol. 13. Is. 2. P. 91–103. doi:10.1002/ppp.416

van Geldern R., Barth J. Optimization of instrument setup and post-run corrections for oxygen and hydrogen stable isotope measurements of water by isotope ratio infrared spectroscopy // *Limnology and Oceanography Methods*. 2012. Vol. 10. P. 1024–1036. doi:10.4319/lom.2012.10.1024

Opel T., Wetterich S., Meyer H., Dereviagin A.Y., Fuchs M.C., Schirrmeyer L. Ground-ice stable isotopes and cryostratigraphy reflect late Quaternary palaeoclimate in the Northeast Siberian Arctic (Oyogos Yar coast, Dmitry Laptev Strait) // *Climate of the Past*. 2017. Vol. 13. Is. 6. P. 587–611. doi:10.5194/cp-13-587-2017

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., Schirrmeyer L. Past climate and continentality inferred from ice wedges at Batagay megaslump in the Northern Hemisphere's most continental region, Yana Highlands, interior Yakutia // *Climate of the Past*. 2019. Vol. 15. Is. 4. P. 1443–1461. doi:10.5194/cp-15-1443-2019

Porter T.J., Opel T. Recent advances in paleoclimatological studies of Arctic wedge- and pore-ice stable-water isotope records // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2020. Vol. 31. Is. 3. P. 429-441. doi:10.1002/ppp.2052

Schneider A., Wetterich S., Schirrmeyer L., Herzsich U., Meyer H., Pestryakova L.A. Freshwater ostracods [Crustacea] and environmental variability of polygon ponds in the tundra of the Indigirka Lowland, north-east Siberia // *Polar Research*. 2016. Vol. 35. 25225, doi:10.3402/polar.v35.25225

Strauss J. Late Quaternary environmental dynamics at the Duvanny Yar key section, Lower Kolyma, East Siberia, Diplom, Universität Potsdam, 2010. 108 p.

Takano S., Sugimoto A., Tei S., Liang M., Shingubara R., Morozumi T., Maximov T.C. Isotopic compositions of ground ice in near-surface permafrost in relation to vegetation and microtopography at the Taiga–Tundra boundary in the Indigirka River lowlands, northeastern Siberia // *PLoS ONE*. 2019. Vol. 14. P. 1-23. doi:10.1371/journal.pone.0223720

OXYGEN AND HYDROGEN STABLE ISOTOPES IN ICE COMPLEX GROUND ICE OF INDIGIRKA RIVER REGION

Torgovkin N.V.¹, Sivtsev D.E.^{1,2}, Tumskoj V.E.¹

¹Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

The results of a study of the isotopic composition of $\delta^{18}\text{O}$ and δD of underground ice, tested by the authors during fieldwork in the lower reaches of the Indigirka River, are presented. in 2023. Field research was carried out in the area from Belaya Gora to Chokurdakh. Due to the poor exposure of the ice complex deposits, the main work had been carried out on two outcrops -

Malykhchyn and Shamanovo. Shamanovo outcrop has been described by the authors for the first time.

Keywords: *oxygen and hydrogen stable isotopes, ground ice, ice complex, paleoenvironment*

REFERENCES

- Vasilchuk Yu.K.* Oxygen isotope composition of underground ice (experience of paleogeocryological reconstructions): In 2 volumes / Yu.K. Vasilchuk. M., OTP RAS, Moscow State University; PNIIS, 1992, vol. 1, 420 pp.; vol. 2, 264 pp. (in Russian)
- Vtyurin B.I., Bolikhovskaya N.S., Bolikhovsky V.F., Gasanov Sh.Sh.* Vorontsovsky section of yedoma deposits in the lower reaches of the river. Indigirka // Bulletin of the Commission for the Study of the Quaternary Period. 1984, No. 53, p. 12-21. (in Russian)
- Derevyagin A.Yu., Chizhov A.B., Mayer H.* et al. Isotopic composition of textural ice on the Laptev Sea coast // Cryosphere of the Earth. 2013. Vol. XVII, no. 3. P. 27–34. (in Russian)
- Ekaikin A.A.* Stable isotopes of water in glaciology and paleogeography. St. Petersburg: State Scientific Center of the Russian Federation AARI, 2016. 63 p. (in Russian)
- Platonov I.A., Tumskoy V.E., Tarasov A.I., Torgovkin N.V., Romanis T.V.* Structure and occurrence conditions of ice complex in valley of the middle Indigirka // Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2022. Issue 9. P. 211-215. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-211-215
- Torgovkin N.V., Tumskoy V.E., Platonov I.A., Tarasov A.I., Romanis T.V.* Stable isotopes $\delta^{18}O/\delta^2D$ ratio of ground ice in Momo-Selennyakh depression and Abyskaya Lowland // Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2022. Issue 9. P. 268-271. doi: 10.24412/2687-1092-2022-9-268-271
- Craig H.* Isotopic variations in meteoric waters // Science 1961. Vol. 133. Is. 3465. P. 1702-1703. doi: 10.1126/science.133.3465.17
- Dansgaard W.* Stable isotope in precipitation // Tellus 1964. Vol. XVI. № 4. P. 436-468. doi: 10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x
- Meyer H., Siegert C., Derevyagin A., Schirrmeyer L., Hubberten H.-W.* Paleoclimate reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ice wedges // Permafrost and Periglacial Processes. 2002. Vol. 13. Is. 2. P. 91–103. doi:10.1002/ppp.416
- van Geldern R., Barth J.* Optimization of instrument setup and post-run corrections for oxygen and hydrogen stable isotope measurements of water by isotope ratio infrared spectroscopy // Limnology and Oceanography Methods. 2012. Vol. 10. P. 1024–1036. doi:10.4319/lom.2012.10.1024
- Opel T., Wetterich S., Meyer H., Dereviagin A.Y., Fuchs M.C., Schirrmeyer L.* Ground-ice stable isotopes and cryostratigraphy reflect late Quaternary palaeoclimate in the Northeast Siberian Arctic (Oyogos Yar coast, Dmitry Laptev Strait) // Climate of the Past. 2017. Vol. 13. Is. 6. P. 587–611. doi:10.5194/cp-13-587-2017
- 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., Schirrmeyer L.* Past climate and continentality inferred from ice wedges at Batagay megaslump in the Northern Hemisphere's most continental region, Yana Highlands, interior Yakutia // Climate of the Past. 2019. Vol. 15. Is. 4. P. 1443–1461. doi:10.5194/cp-15-1443-2019
- Porter T.J., Opel T.* Recent advances in paleoclimatological studies of Arctic wedge- and pore-ice stable-water isotope records // Permafrost and Periglacial Processes. 2020. Vol. 31. Is. 3. P. 429-441. doi:10.1002/ppp.2052
- Schneider A., Wetterich S., Schirrmeyer L., Herzsuh U., Meyer H., Pestryakova L.A.* Freshwater ostracods [Crustacea] and environmental variability of polygon ponds in the tundra of the Indigirka Lowland, north-east Siberia // Polar Research. 2016. Vol. 35. 25225, doi:10.3402/polar.v35.25225
- Strauss J.* Late Quaternary environmental dynamics at the Duvanny Yar key section, Lower Kolyma, East Siberia, Diplom, Universität Potsdam, 2010. 108 p.
- Takano S., Sugimoto A., Tei S., Liang M., Shingubara R., Morozumi T., Maximov T.C.* Isotopic compositions of ground ice in near-surface permafrost in relation to vegetation and microtopography at the Taiga–Tundra boundary in the Indigirka River lowlands, northeastern Siberia // PLoS ONE. 2019. Vol. 14. P. 1-23. doi:10.1371/journal.pone.0223720