

РЕГИОНАЛЬНАЯ И ИСТОРИЧЕСКАЯ ГЕОКРИОЛОГИЯ

УДК 551.345; 557.79

DOI: 10.15372/KZ20240501

EDN: TJXRLV

НОВЫЕ ДАННЫЕ О ГЕОХРОНОЛОГИИ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ
И СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПАХ КИСЛОРОДА И ВОДОРОДА
В ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДАХ МАМОНТОВОЙ ГОРЫН.В. Торговкин^{1,*}, Д.Е. Сивцев^{1,2}, А.А. Гаврилова³, И.А. Платонов², А.И. Кизяков²,
Л. Ширрмайстер⁴, Т. Опель⁴, С. Веттерих⁵, С.Ф.М. Брейтенбах⁶, Х. Майер⁴¹ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 677010, Якутск, ул. Мерзлотная, 36, Россия² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия³ Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия⁴ Институт Альфреда Вегенера, Центр полярных и морских исследований им. Гельмгольца, 14473 Потсдам, Германия⁵ Дрезденский технологический университет TUD, Институт географии, 01069 Дрезден, Германия⁶ Факультет наук о Земле и окружающей среде, Нортумбрийский университет,
Ньюкасл-апон-Тайн, NE1 8ST, Великобритания

* Автор для контакта; e-mail: n.torgovkin@yandex.ru

Представлены результаты исследований ледового комплекса, озерных и озерно-аллювиальных отложений, выполненных на территории геологического памятника природы Мамонтова Гора в 2022–2023 гг. Оптически стимулированное люминесцентное датирование позволило установить, что формирование озерно-аллювиальных песков эльгинской свиты завершилось 250–242 тысяч лет назад (в конце оледенения МИС 8, перед межледниковьем МИС 7), а залегающих выше озерных алевроитов – 138–126 тысяч лет назад (в конце оледенения МИС 6 и начале межледниковья МИС 5е). Средний изотопный состав сингенетических повторно-жильных льдов ледового комплекса (МИС 3) следующий: $-(31 \pm 2) \text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$; $-(239 \pm 15) \text{‰}$ по δD ; $(8 \pm 2) \text{‰}$ по d_{ex} . Впервые получены данные по изотопному составу текстурных льдов ледового комплекса, средние значения которого составили $-(26 \pm 2) \text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$; $-(201 \pm 17) \text{‰}$ по δD ; $(10 \pm 4) \text{‰}$ по d_{ex} .

Ключевые слова: ледовый комплекс, озерно-аллювиальные отложения, ОСЛ-датирование, подземные льды, стабильные изотопы кислорода и водорода, палеоклимат, средний и поздний неоплейстоцен.

Ссылка для цитирования: Торговкин Н.В., Сивцев Д.Е., Гаврилова А.А., Платонов И.А., Кизяков А.И., Ширрмайстер Л., Опель Т., Веттерих С., Брейтенбах С.Ф.М., Майер Х. Новые данные о геохронологии четвертичных отложений и стабильных изотопах кислорода и водорода в подземных льдах Мамонтовой Горы // Криосфера Земли, 2024, т. XXVIII, № 5, с. 3–13. DOI: 10.15372/KZ20240501. EDN: TJXRLV.

NEW DATA ON THE GEOCHRONOLOGY OF QUATERNARY SEDIMENTS AND STABLE OXYGEN
AND HYDROGEN ISOTOPES IN GROUND ICE OF THE MAMONTOVA GORAN.V. Torgovkin^{1,*}, D.E. Sivtsev^{1,2}, A.A. Gavrilova³, I.A. Platonov², A.I. Kizyakov²,
L. Schirrmeister⁴, T. Opel⁴, S. Wetterich⁵, S.F.M. Breitenbach⁶, H. Meyer⁴¹ Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Merzlotnaya St. 36, Yakutsk, 677010 Russia² Lomonosov Moscow State University, Geography Department, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia³ Institute of Precambrian Geology and Geochronology, Russian Academy of Sciences,
Makarova St. 2, St. Petersburg, 199034 Russia⁴ Alfred Wegener Institute, Helmholtz Center for Polar and Marine Research, 14473 Potsdam, Germany⁵ TUD Dresden University of Technology, Institute of Geography, 01069 Dresden, Germany⁶ Department of Earth and Environmental Sciences, Northumbria University,
Newcastle-Upon-Tyne, NE1 8ST, United Kingdom

*Corresponding author; e-mail: n.torgovkin@yandex.ru

The results of studies of the Ice Complex, lacustrine, and lacustrine-alluvial sediments from the Mamontova Gora section performed in 2022–2023 are analyzed. Optically stimulated luminescence dating indicates

© Н.В. Торговкин, Д.Е. Сивцев, А.А. Гаврилова, И.А. Платонов, А.И. Кизяков, Л. Ширрмайстер, Т. Опель,
С. Веттерих, С.Ф.М. Брейтенбах, Х. Майер, 2024

that the formation of the lacustrine-alluvial sands of the Elga Group ended 250–242 ka ago, at the end of cold MIS 8, while the overlying lacustrine silts accumulated until 138–126 ka ago corresponding to the late cold MIS 6 – early warm MIS 5e. The average isotopic composition of the Yedoma Ice Complex (MIS 3) syngenetic wedge ice is $-(31 \pm 2)\text{‰}$ for $\delta^{18}\text{O}$, $-(239 \pm 15)\text{‰}$ for δD , and $(8 \pm 2)\text{‰}$ for d_{exc} . For the first time, we quantify the isotopic composition of the Yedoma Ice Complex textural ice with the average values of $-(26 \pm 2)\text{‰}$ for $\delta^{18}\text{O}$, $-(201 \pm 17)\text{‰}$ for δD , and $(10 \pm 4)\text{‰}$ for d_{exc} . The formation of lacustrine and lacustrine-alluvial sequences during MIS 7 and MIS 5e was fostered by warmer and likely longer thaw periods and associated permafrost thaw. The degree of warming remains to be estimated for this region.

Keywords: ice complex, lacustrine-alluvial sediments, OSL dating, ground ice, stable oxygen and hydrogen isotopes, paleoclimate, Middle and Late Pleistocene.

ВВЕДЕНИЕ

Геологический памятник природы Мамонтова Гора – стратотипический разрез неоген-четвертичных отложений, который находится на левом берегу р. Алдан в 325 км выше места его впадения в р. Лена. Разрез Мамонтовой горы был открыт В.Н. Зверевым в 1912 г., затем, в 1915 г., А.Н. Криштофовичем в отложениях были определены плоды американского ореха [Разрез..., 1973]. С 50-х годов XX в. ведутся систематические палеоботанические [Васьковский, Тучков, 1953; Миоцен..., 1976], стратиграфические [Алексеев и др., 1990; Минюк, 2004; Réwé et al., 1977; Réwé, Journaux, 1983; Kostyukovich, 1993], палеонтологические [Вангенгейм, 1961, 1977; Русанов, 1968], седиментологические [Агаджанян и др., 1975; Зигерт, 1988], криолитологические [Катасонов, Иванов, 1973], палеогеографические [Разрез..., 1973; Васильчук и др., 2019; Popp et al., 2006] и микробиологические [Brouchkov et al., 2017; Cherbunina et al., 2021] исследования отложений. Всего на территории геологического памятника выделяется шесть основных геоморфологических уровней относительно уреза воды в р. Алдан: высокий уровень с

относительными отметками 80–90 м, 50-метровая терраса, 30-метровая терраса, 20-метровая терраса, 6–9-метровая терраса и пойма [Разрез..., 1973]. На рис. 1 приведено строение и геохронология 80–90-метрового уровня и 50-метровой террасы. Для отображения генетических типов отложений использованы индексы с геологических карт четвертичных и дочетвертичных отложений [Государственная... карта..., 2021].

Исследователи 80–90-метровый геоморфологический уровень определяют по-разному: авторы работ [Вангенгейм, 1961; Русанов, 1968; Réwé, Journaux, 1983] террасой с высотой 80–100 м, А.А. Свиточ – как останец водораздельной поверхности [Разрез..., 1973], М.Н. Алексеев – “высокой 80–90-метровой частью” Мамонтовой Горы [Алексеев и др., 1990]. Высокий уровень преимущественно сложен разнородными косослоистыми ожелезненными песками с теплолюбивой миоценовой флорой: эндокарпии *Juglans cineria*, шишки и плоды *Juglans acuminata* Braun (1845), листья *Ulmus* cf. *macrocarpa* Hance 1868 [Русанов, 1968; Миоцен..., 1976]. Однако, по последним дан-

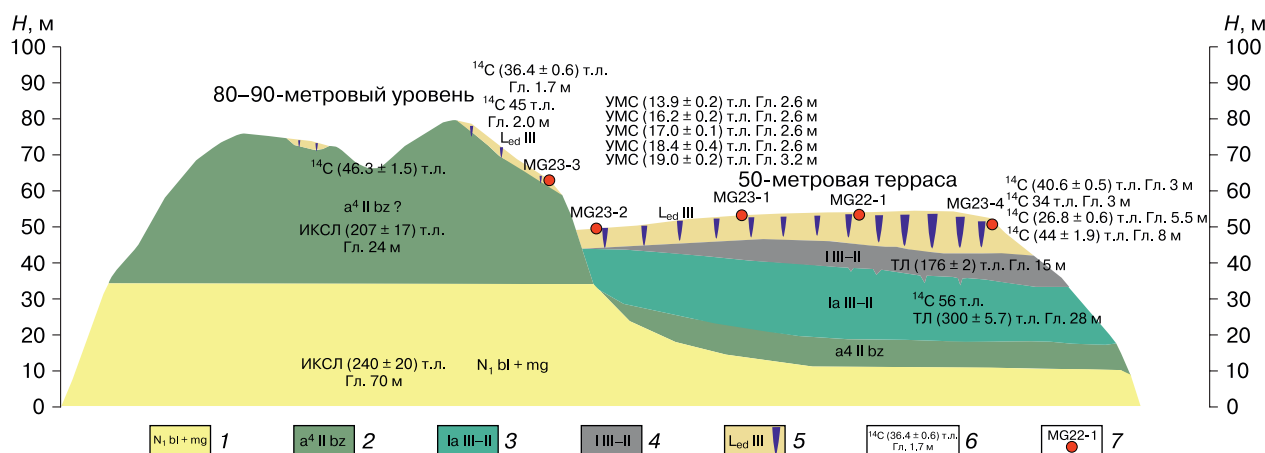


Рис. 1. Разрез-схема 80–90-метрового уровня и 50-метровой террасы геологического памятника природы Мамонтова Гора на основе схем и разрезов с датировками [Катасонов, Иванов, 1973; Разрез..., 1973; Васильчук и др., 2019; Большинов и др., 2023; Kostyukovich, 1993].

1 – миоценовый аллювий; 2 – аллювий базовской свиты; 3 – озерно-аллювиальные отложения; 4 – озерные отложения; 5 – отложения ледового комплекса; 6 – датировки с глубиной отбора; 7 – разрезы, исследованные в настоящей работе.

ным [Большаинов и др., 2023], согласно методу инфракрасного люминесцентного датирования (ИКСЛ), возраст песков на высоте 12 м относительно уреза р. Алдан составил (240 ± 20) тыс. лет, а на высоте 58 м равен (207 ± 17) тыс. лет. В верхней части разреза террасы фрагментарно встречаются маломощные (2–3 м) отложения ледового комплекса (ЛК). Толща, включающая сингенетические полигонально-жильные льды (ПЖЛ), вскрывается в стенках небольших термоцирков – термокаров, по К.С. Воскресенскому [2001]. В интервалах глубин 1.7–2.0 м относительно дневной поверхности по образцам древесины из мерзлых алевритов ранее в рамках исследований ГИН, ВСЕГЕИ и МГУ получены четыре радиоуглеродные даты 9–34 тыс. лет [Тананаев, 2021].

Геоморфологический 50-метровый уровень, или 50-метровая терраса (см. рис. 1), включает поверхности с относительными высотами до 60 м, а в наиболее возвышенных участках – до 70 м над урезом воды в реке, и представляет наибольший интерес для криолитологов, так как в разрезах этих поверхностей ЛК наиболее представителен. Предыдущие исследователи отмечают его трехчленное строение: нижняя часть мощностью до 12 м отнесена к зырянскому (муруктинскому) горизонту (морской изотопной стадии МИС 4), а верхняя (мощностью до 4 м) – к сартанскому горизонту (МИС 2). Между двумя ЛК иногда отмечается до 0.5 м прослой каргинского горизонта (МИС 3) в виде торфа или оторфованного суглинки [Алексеев и др., 1990; Васильчук и др., 2019; Cherbunina et al., 2021]. Радиоуглеродные датировки по древесным фрагментам из отложений ЛК в основном близки к запредельным [Тананаев, 2021]. Методом ускорительной масс-спектрометрии (УМС) были получены радиоуглеродные датировки в диапазоне 20–14 тыс. лет по органическим включениям из ПЖЛ [Васильчук и др., 2019]. Средние значения изотопного состава ПЖЛ ледового комплекса лежат в пределах $-31\ldots-28\text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $-223\ldots-237\text{‰}$ по δD [Васильчук и др., 2019; Popp et al., 2006], для текстурных льдов изотопных исследований не проводилось. В отложениях 50-метровой террасы находили значительное количество останков представителей плейстоценовой фауны: *Ursus arctos* Linnaeus, 1758, *Bison priscus* (Bojanus, 1825), *Alces latifrons* (Johnson, 1874), *Mammuthus primigenius* (Blumenbach, 1799), *Rangifer tarandus* (Linnaeus, 1758), *Coelodonta antiquitatis* (Blumenbach, 1799), *Equus caballus* (Linnaeus, 1758) и *Panthera spelaea* (Goldfuss, 1810) [Русанов, 1968]. Вопросы генезиса ЛК до сих пор вызывают оживленные споры. Так, некоторые исследователи определяют происхождение ЛК как криогенно-эоловое [Русанов, 1968; Révé, Journaix, 1983], аллювиально-мерзлотное [Агаджанян и др., 1975], полигенетическое [Зигерт, 1988;

Schirrmeister et al., 2013]. На сегодняшний день на карте четвертичных отложений масштаба 1:1 000 000 они отмечены как криогенно-эоловые образования – лессоиды [Государственная... карта..., 2021]. Ледовый комплекс вложен в озерные или пологоводно-озерные супеси, термолюминесцентный (ТЛ) возраст которых составляет (176 ± 2) тыс. лет [Катасонов, Иванов, 1973]. В них были обнаружены шишки *Larix dahurica* Turcz. и *Picea obovata* Ldb. Отмечено примерно равное соотношение пыльцы древесно-кустарниковых пород *Betula* sect. *Nanae*, *B.* sect. *Fruticosae*, *Alnaster*, меньше *Pinus*, *Alnus*, *Betula* sect. *Albae* и трав *Caryophyllaceae* и др., споры *Bryales*, *Sphagnum*, *Polypodiaceae* и *Selaginella* [Алексеев и др., 1990]. Ниже залегают озерно-аллювиальные пески эльгинской свиты, ТЛ-возраст которых составил (300 ± 5.7) тыс. лет [Катасонов, Иванов, 1973; Kostyukevich, 1993]. Палинокомплекс эльгинской свиты представлен древесными *Pinus*, *Picea*, *Betula* sect. *Albae*, *Betula* sect. *Nanae*, *B.* sect. *Fruticosae*, *Alnus*, *Alnaster*, споровыми *Polypodiaceae*, *Sphagnum*, *Bryales* и травами *Polygonaceae*, *Artemisia* [Алексеев и др., 1990]. В основании залегают аллювиальные базальные галечники базовской свиты, в палинокомплексах которых преобладают древесные (*Pinus*, *Picea*, *Larix*, *Betula*, *Alnus*), кустарники (*Alnaster*, *Ericales*), травы (*Artemisia*, *Gramineae*, *Polygonaceae*), споры (*Bryales*, *Polypodiaceae*, *Sphagnum*, *Lycopodium*) и аллювиальные ожелезненные миоценовые пески [Алексеев и др., 1990]. Несмотря на многолетние исследования разрезов Мамонтовой Горы, остаются нерешенными следующие научные задачи: уточнение времени формирования четвертичных озерных и озерно-аллювиальных отложений; уточнение палеоклиматических условий формирования отложений ЛК.

Методы

полевых и лабораторных исследований

В соответствии с особенностями изучаемого природного объекта и поставленными научными задачами выбран комплекс полевых и лабораторных методов.

Криолитологическое описание. В ходе полевых сезонов 2022 и 2023 гг. фрагментарно были изучены разрезы 50-метровой террасы и 80–90-метрового уровня. В верхней части 50-метровой террасы выполнено описание и опробование разрезов, включающих толщу ЛК в стенках небольших термокаров (рис. 2, точки МГ22-1, МГ23-1, МГ23-2). Термокар с обнажением ледового комплекса обнаружен и изучался на сниженном останце 80–90-метрового уровня (см. рис. 2, точка МГ23-3). На обследованных разрезах проводилось описание их литологического и криогенного строения [Жесткова и др., 1980] и отбор проб: а) полигонально-жильного и текстурного льда грунтового

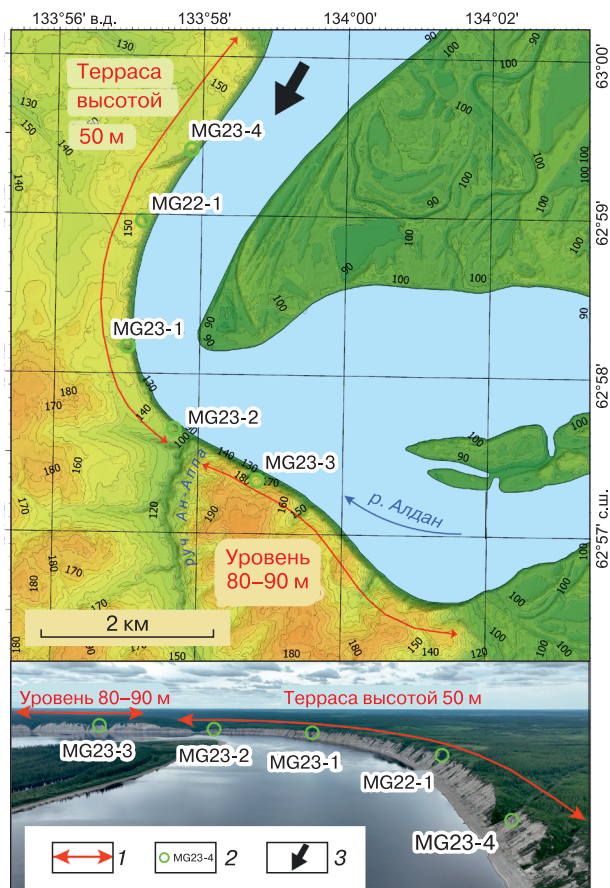


Рис. 2. Расположение опробованных разрезов на уступах террас геологического памятника Мамонтова Гора.

1 – протяженность 50-метровой террасы и 80–90-метрового уровня вдоль р. Алдан; 2 – опробованные разрезы; 3 – гео-позиция и направление перспективной аэрофотосъемки.

столба для определения изотопного состава; б) отложений ледового комплекса, склонового чехла, озерных и озерно-аллювиальных горизонтов. В средней части толщи 50-метровой террасы выполнена серия расчисток озерных и озерно-аллювиальных отложений с целью описания их строения и определения возраста (см. рис. 2, точка MG23-4).

Оптически стимулированное люминесцентное (ОСЛ) датирование основано на высвобождении люминесцентного сигнала из зерен кварца и(или) полевого шпата песчаной и алевритовой фракций. Датирование четвертичных отложений выполнялось в единственной в России лаборатории ОСЛ Всероссийского научно-исследовательского геологического института им. А.П. Карпинского (Санкт-Петербург).

Определение стабильных изотопов $\delta^{18}\text{O}$, δD и d_{exc} в подземных льдах. ПЖЛ изучаются в качестве архивов зимних климатических условий в нео-

плейстоцене и голоцене на арктическом побережье России, северо-востоке Сибири, на Аляске и в Канаде. В свою очередь, в синкриогенных отложениях текстурные льды позволяют охарактеризовать условия промерзания вод сезонноталого слоя [Деревягин и др., 2013; Meyer et al., 2002; Porter, Opel, 2020]. Для выявления влажностных условий используется дейтериевый эксцесс, который рассчитывается как $d_{\text{exc}} = \delta\text{D} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$. При этом если он равен 8, условия считаются равновесными, если ниже, преобладает испарение, если выше, то конденсация [Dansgaard, 1964]. Отбор проб ПЖЛ выполнялся по горизонтальному профилю, текстурных льдов – по вертикальному профилю при помощи аккумуляторной дрели с цилиндрической насадкой, причем место отбора предварительно зачищалось во избежание смешивания образца с талой водой. Образцы льда отбирали и плавили в zip-пакетах при температуре воздуха около 25 °С. После полного плавления пробы переливали в полиэтиленовые пробирки объемом 15 мл для транспортировки в лабораторию. Лабораторный анализ проб подземного льда проводился на высокоточном изотопном анализаторе Picarro L-2140i в совместной российско-германской (ИМЗ–AWI Potsdam) изотопной лаборатории Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (Якутск).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Геологическое описание разрезов четвертичных отложений, подстилающих ледовый комплекс

В разрезе **MG23-4** (62°59'24.1" с.ш., 133°57'50.5" в.д.) серия расчисток вскрыла четвертичные и миоценовые отложения, подстилающие ЛК в средней части 50-метровой террасы, общая высота обнажения 55 м в стенке V-образного оврага (рис. 3). Индексы отложений даны согласно [Государственная... карта..., 2021].

В разрезе снизу вверх обнажаются: миоценовый аллювий – белогорские слои – мамонтовгорская свита (N_1 bl–mg), сложен ожелезненными бело-серыми песками с диагональной слоистостью, мощность отложений составляет 15–16 м.

Аллювий четвертой надпойменной террасы, базовская свита ($a^4\Pi$ bz), несогласно залегает на миоценовых песках. Сложен ожелезненными галечниками с песчано-алевритовым заполнителем. Мощность около 10 м.

Озерно-аллювиальные отложения эльгинской свиты ($la\Pi$ – III el) согласно залегают на галечниках базовской свиты. На высотах 32–26 м (от уреза реки) разрез сложен средне- и крупнозернистыми горизонтально- и косослоистыми (угол падения 30–45°) серыми песками русловой фации. На высотах 33, 36 и 38 м в песках встреча-

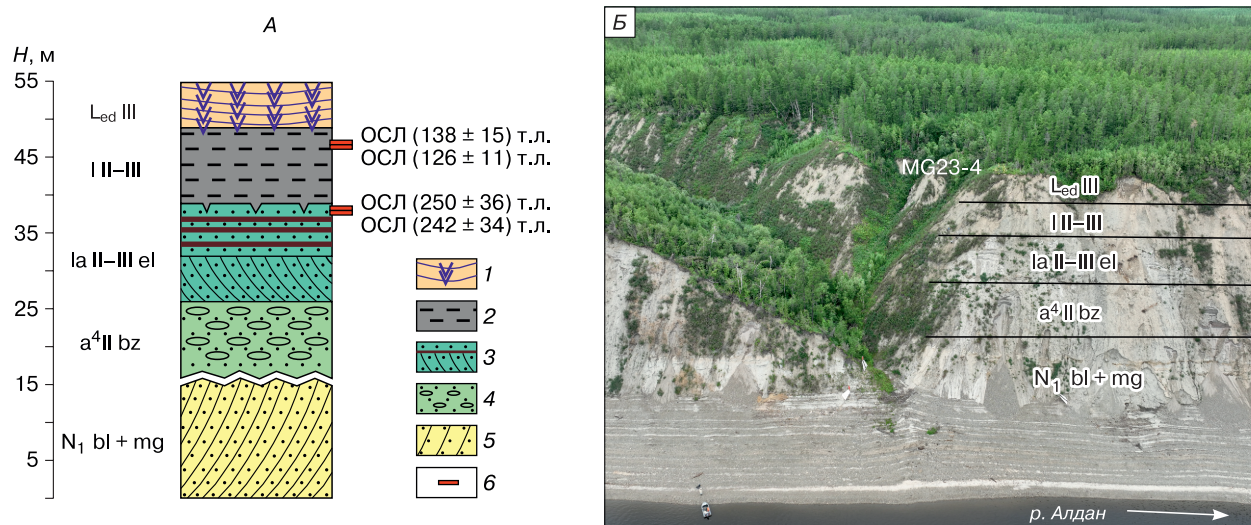


Рис. 3. Отложения 50-метровой террасы Мамонтовой Горы на разрезе MG23-4.

А – строение разреза MG23-4 с ОСЛ-датировками; Б – общий вид обнажения. 1 – ледовый комплекс; 2 – озерные отложения; 3 – озерно-аллювиальные отложения; 4 – аллювиальные отложения базовской свиты; 5 – миоценовый аллювий; 6 – точки опробования на ОСЛ-датирование.

ются прослой алевритов мощностью до 0.5 м коричнево-серого цвета. На высоте 39 м переходит в пески средне- и крупнозернистые бело-серые с ожелезненными линзами гравия. На высоте 38–39 м обнаружена псевдоморфоза, представляющая собой хвостовую часть оттаявшего ПЖЛ. Псевдоморфоза сложена вышележащими озерными алевритами и сильно ожелезненными песками. На высоте 38.5 м ОСЛ-возраст песков составил (250 ± 36) тыс. лет, на высоте 37 м – (242 ± 34) тыс. лет.

Формирование озерно-аллювиальных отложений эльгинской свиты, которая является стратиграфическим аналогом мавринской свиты, распространенной в среднем течении р. Лены, соответствует концу оледенения МИС 8 – началу межледниковья МИС 7, которое произошло 243–191 тыс. лет назад. В этот период в Южной Сибири установлена деградация мерзлоты, вследствие которой в Ботовской пещере происходил рост спелеотем [Vaks et al., 2013, 2020].

Озерные отложения ($I II-III$) залегают на озерно-аллювиальных песках эльгинской свиты (высота 39–49 м) и представлены алевритами серыми плотными со следами оглеения в виде сизоватых пятен неправильной формы. Равномерно распространены разнонаправленные линзовидные пятна ожелезнения. Присутствуют редкие включения углей, криогенная текстура сетчатая. ОСЛ-возраст алевритов составил (138 ± 15) тыс. лет на высоте 47 м и (126 ± 11) тыс. лет на высоте 46.5 м.

Озерные отложения, вероятно, образовались 130–115 тыс. лет назад в конце оледенения

МИС 6 – начале межледниковья МИС 5е. В эту эпоху происходили значительное протаивание мерзлых пород, рост спелеотем в Ботовской пещере (Южная Сибирь) [Vaks et al., 2013, 2020] и формирование древесного горизонта на Батагайском кратере [Murton et al., 2023].

Отложения ледового комплекса ($L_{ed} III$) в этом разрезе представляют собой протаявший и оползший алеврит серо-коричневый с пятнами ожелезнения с обломками древесных корешков и сучьев, нитевидными корешками трав и угольками; видимая мощность 6 м (высота 49–55 м). Более подробное описание ЛК дано ниже.

Строение разрезов ледового комплекса

Разрез **MG22-1** ($62^{\circ}58'57.7''$ с.ш., $133^{\circ}57'09.8''$ в.д., относительная высота 58 м над урезом воды в реке; стенка северо-северо-восточной экспозиции) расположен в пределах 50-метровой террасы (рис. 4, А–Б). Отложения ледового комплекса вскрываются в борту короткого оврага, прорезающего днище крупного термоцирка диаметром около 300 м. Перепад высот от бровки термоцирка до точки опробования MG22-1 составляет 10–12 м, соответственно примерно такая мощность верхней части ЛК была снесена ранее термоденудацией. В исследованном обнажении в тыловой стенке небольшого термокара диаметром около 10 м обнажается фрагмент отложений ЛК, перекрытых двухметровым слоем склонового материала, смещавшегося в днище термоцирка в период его активного роста. Обнажение ледового комплекса высотой около 1 м и шириной 15 м включает фрагменты сингенетической ледяной

жила и грунтового столба. Грунтовый столб сложен мерзлым серо-коричневым алевритом с поясковой криогенной текстурой и включениями нитевидных корешков и древесных фрагментов. ПЖЛ имеет вертикальную полосчатость, ширина

элементарных жилок 2–4 мм. Изотопный состав ПЖЛ представлен на рис. 4, В.

Разрез **MG23-1** (62°58'10.4" с.ш., 133°56'57.6" в.д., относительная высота стенки обнажения 54–58 м над урезом воды в реке; стенка

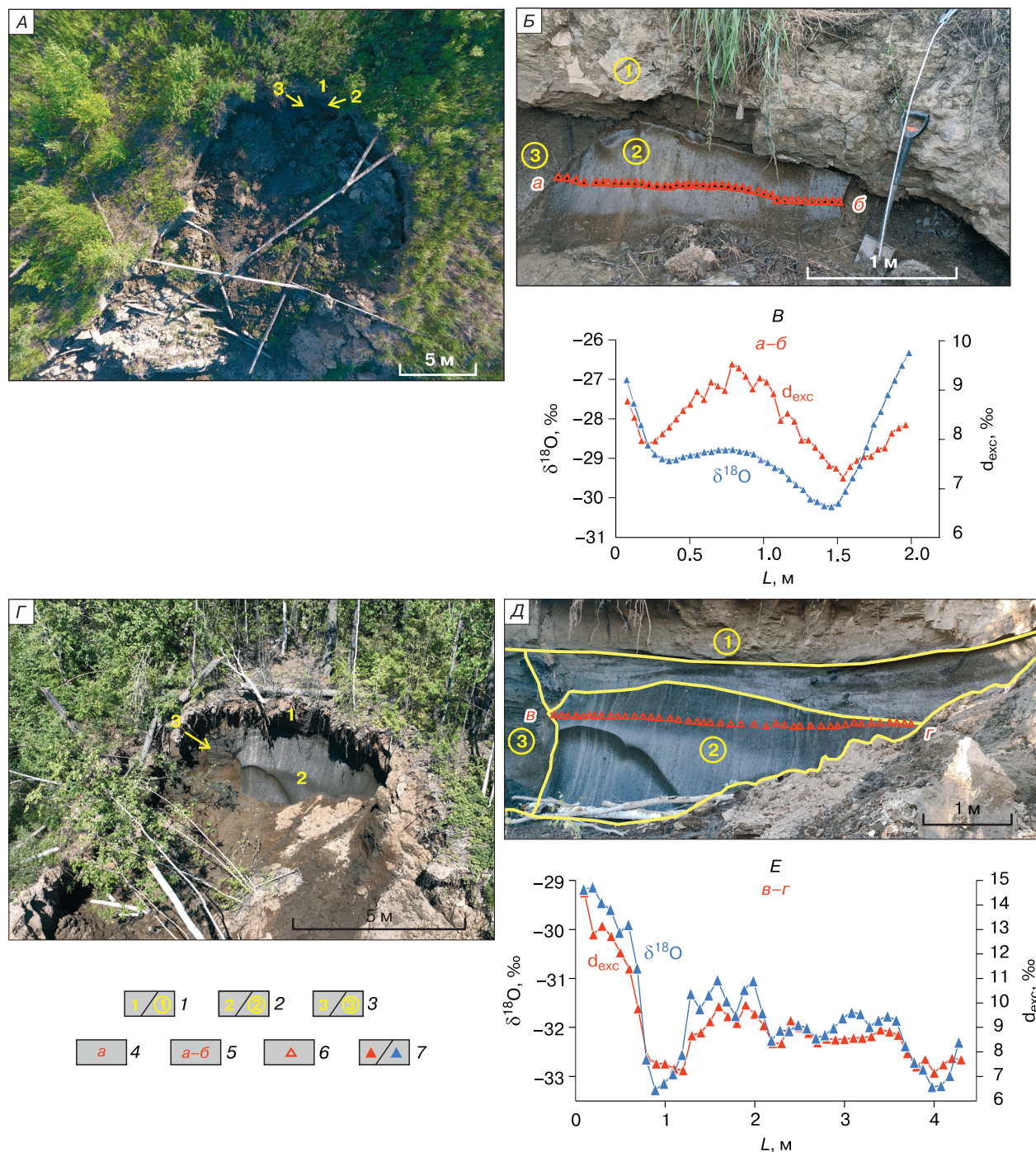


Рис. 4. Обнажения ЛК в разрезах MG22-1 (А-В) и MG23-1 (Г-Е).

А, Г – виды термокаров сверху; Б, Д – вскрывшиеся фрагменты ПЖЛ с профилями отбора а-б и в-г. 1 – слой коричнево-серого алеврита, перекрывающий отложения ЛК; 2 – ПЖЛ; 3 – грунтовый столб ЛК; 4 – точка начала профиля; 5 – профили; 6 – точки пробоотбора сингенетического ПЖЛ; 7 – изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$) и дейтериевый эксцесс (d_{exc}) образцов ПЖЛ.

южной экспозиции). Небольшой термокар расположен в прибровочной части левого борта оврага, выпадающего в р. Алдан (см. рис. 4, Г–Е). В тыловой стенке термокара в обнажении шириной 8 м вскрываются породы ЛК с фрагментом сингенетической ледяной жилы, вскрытой под углом к ее оси, правый контакт ПЖЛ с вмещающими породами перекрыт оползшими породами. Ширина ПЖЛ в стенке обнажения составляет 4 м, высота 2 м. Породы ледового комплекса перекрыты склоновыми отложениями – слоем коричнево-серого алевролита мощностью 1.5 м. Отложения ЛК, слагающие грунтовый столб между ПЖЛ, представлены серым и коричневатом-серым алевролитом с тонкошлировой слоистой (плетенчатой) криотекстурой с субгоризонтальными шлирами льда толщиной 0.1 мм и вертикальным расстоянием между ними 0.2–3.0 мм. Отложения ЛК обогащены нитевидными корешками. Изотопный состав ПЖЛ, отобранный по горизонтальному профилю, представлен на рис. 4, Е.

Разрез **MG23-2** ($62^{\circ}57'37.7''$ с.ш., $133^{\circ}57'42.7''$ в.д.; относительная высота стенки обнажения 34 м над урезом воды в реке; стенка северо-северо-восточной экспозиции). Термокар в прибровочной части террасы на левом борту Алдана, в 120 м ниже по течению от устья р. Ан-Аппа (см. рис. 2, рис. 5, А–В). Невысокая (1–2 м) тыловая стенка термокара переходит в наклонное к бровке террасы днище термокара, расчлененное эрозионными врезами. В тыловой стенке термокара фрагментарно обнажается толща ЛК видимой мощностью 4–5 м, нижняя часть сингенетических жил вскрывается в наклонном днище термокара.

Верхняя поверхность сингенетической ледяной жилы ЛК расположена на глубине 1.9 м. Ширина жилы 3 м, высота около 5 м, нижняя ее часть прослеживается в наклонной поверхности днища термокара. От бровки обнажения до глубины 0.95 м залегает коричневый хорошо раскатывающийся суглинок. Криотекстура наклонная, повторяющая уклон подошвы сезонноталого слоя, слоистая (волнистая, а на отдельных участках плетенчатая) со шлирами льда толщиной 1–7 мм, с вертикальной ритмичностью в изменении расстояний между ними от 4 до 8 мм. Ниже 0.95 м залегает суглинок с сетчатой криотекстурой с минеральными блоками до 4–14 мм, окруженными шлирами льда толщиной 3–4 мм и единичным пояском льда толщиной 30 мм, переходящая ниже по разрезу в слоисто-сетчатую криотекстуру со шлирами льда толщиной 2–5 мм, залегающую над верхней поверхностью жилы. Под пояском льда, на глубине 1.0 м от поверхности расположен оголовок узкой более молодой ледяной жилы (предположительно, эпигенетической) шириной 0.4 м, хвостовая часть которой врезана в оголовье мощной сингенетической жилы. Изотопный состав

льда сингенетической ПЖЛ представлен на рис. 5, В.

Разрез **MG23-3** ($62^{\circ}57'21.1''$ с.ш., $133^{\circ}58'50.1''$ в.д.; относительная высота стенки обнажения 64–66 м над урезом воды в реке; стенка северо-северо-западной экспозиции). В пределах участка распространения 80–90-метрового террасового уровня вдоль р. Алдан (см. рис. 2) расположен сниженный фрагмент с высотой поверхности 64–68 м над урезом воды в реке. В прибровочную часть этого участка врезан термокар диаметром около 15 м со вскрывающимися отложениями ЛК (см. рис. 5, Г–Е). В стенках термокара высотой от 2.1 до 4 м в косом сечении к простиранию вскрываются две жилы льда ЛК шириной до 3.8 м и разделяющий их грунтовый столб. Отобраны образцы из ледяной жилы, а также текстурный лед из расположенных рядом вмещающих пород (см. рис. 5, Д, Е). Жильный лед разделен наклонным прослоем лессовидного суглинка толщиной около 8 см, с массивной криотекстурой, переходящей в нижней части в слоистую со шлирами льда толщиной 2–4 мм, минеральных прослоев 4–8 мм (см. рис. 5, Е). Ориентировка полосчатости жильного льда отмечается ниже и выше прослоя лессовидного суглинка, сделаны два профиля опробования ПЖЛ (см. рис. 5, Е).

Ледовый комплекс был сформирован в несколько этапов в МИС 4–2, что подтверждается многочисленными радиоуглеродными датировками 56–14 тыс. лет назад [Васильчук и др., 2019; Péwé et al., 1977; Péwé, *Journaux*, 1983; Popp et al., 2006; Tananaev, 2021]. Формировался ЛК в холодных и засушливых климатических условиях позднего неоплейстоцена, о чем свидетельствует легкий изотопный состав ПЖЛ и текстурных льдов (рис. 6).

Средний изотопный состав сингенетических ПЖЛ ($-(31 \pm 2) \text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$ и $-(239 \pm 15) \text{‰}$ по δD) в целом схож с ранее опубликованными данными по неоплейстоценовым ПЖЛ Мамонтовой Горы [Васильчук и др., 2019; Popp et al., 2006]. Изотопный состав текстурных льдов варьирует в широких пределах: $-31.7 \dots -21.9 \text{‰}$ по $\delta^{18}\text{O}$; $-247.5 \dots -162.6 \text{‰}$ по δD ; $3 \dots 18 \text{‰}$ по d_{exc} .

Наиболее полный профиль текстурных льдов был отобран на точке MG23-3 (см. рис. 5, Д), где прослеживается постепенное облегчение изотопного состава и повышение d_{exc} вверх по разрезу. Такой же тренд наблюдается в изотопном составе поясковой криотекстуры в точке MG22-1. Противоположный тренд с утяжелением изотопного состава вверх по разрезу наблюдается в текстурных льдах MG23-2 (см. рис. 5, Б), которые расположены ближе остальных к дневной поверхности.

Текстуры льды формируются за счет воды нижней части сезонноталого слоя, переходящего в многолетнее мерзлое состояние в ходе накопления

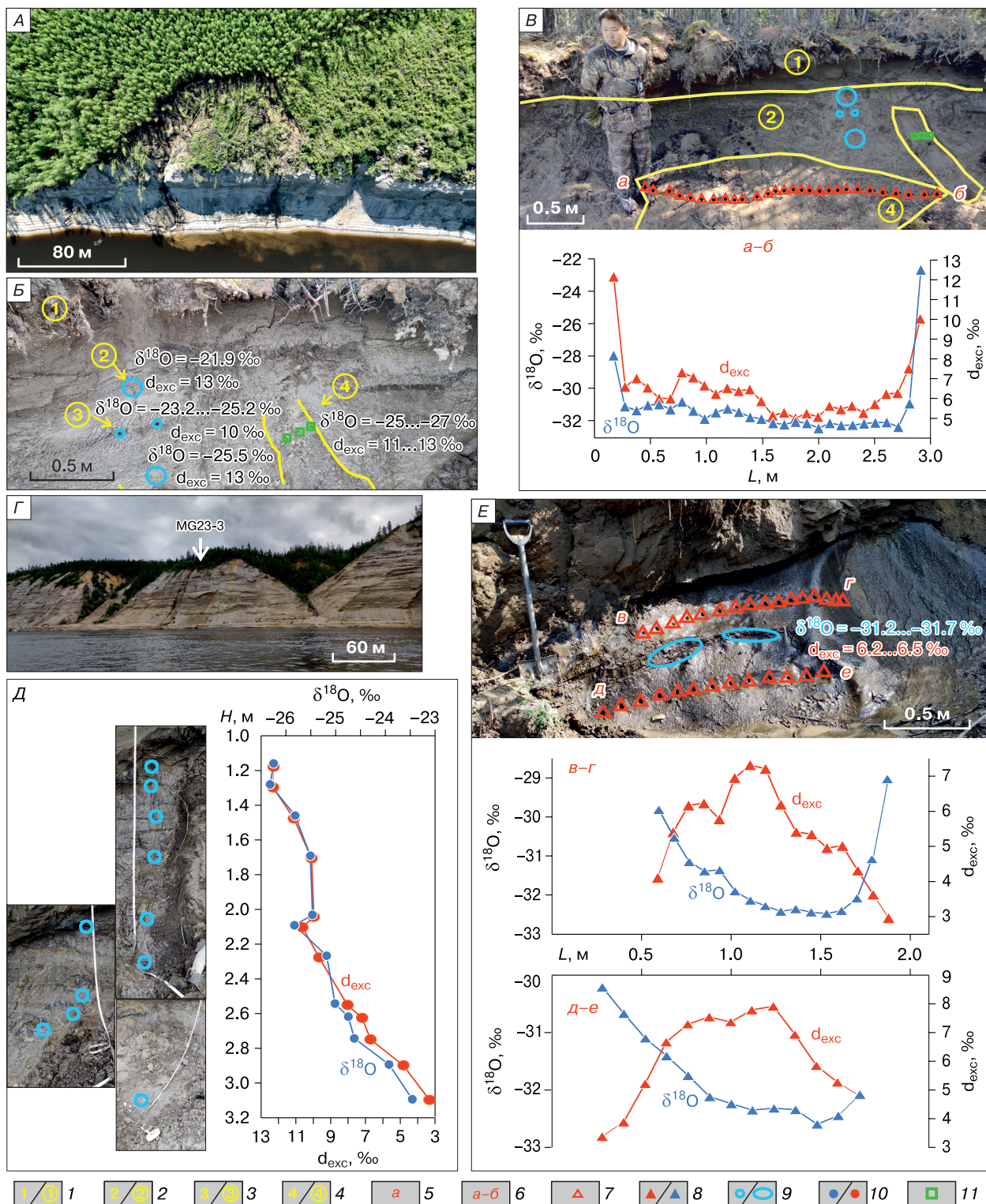


Рис. 5. Обнажения ЛК в разрезах MG23-2 (А–В) и MG23-3 (Г–Е).

А – вид термокара сверху; Б, В, Е – схема отбора образцов подземного льда с профилями отбора ПЖЛ (*а-б, в-г, д-е*) и график изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$) и дейтериевого эксцесса (d_{exc}) образцов ПЖЛ по профилям; Г – вид на термокар с реки; Д – схема отбора тектурных льдов и графики изотопного состава ($\delta^{18}\text{O}$) и дейтериевого эксцесса (d_{exc}) образцов. 1 – слой коричнево-серого алевролита, перекрывающий отложения ЛК; 2 – отложения, перекрывающие ПЖЛ ЛК; 3 – крупный шпиль льда в грунтовом столбе; 4 – ПЖЛ; 5 – точка начала профиля; 6 – профили; 7 – точки пробовотбора ПЖЛ; 8 – изотопный состав и дейтериевый эксцесс образцов ПЖЛ; 9 – точки пробовотбора тектурных льдов; 10 – изотопный состав и дейтериевый эксцесс образцов тектурного льда; 11 – точки пробовотбора из узкой и более молодой, предположительно, эпигенетической жилы.

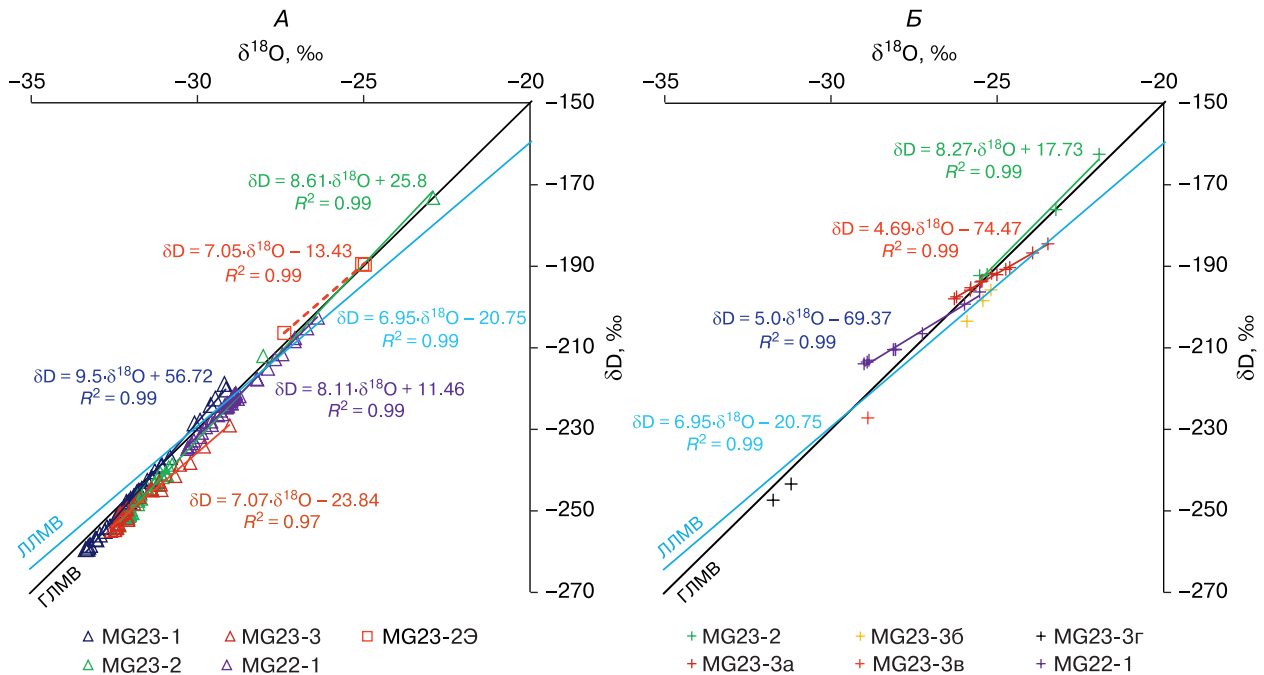


Рис. 6. Изотопный состав ($\delta^{18}\text{O}$, δD) подземных льдов с уравнениями линейной регрессии относительно глобальной линии метеорных вод (ГЛМВ) и локальной линии метеорных вод (ЛЛМВ) [Папина и др., 2017].

А – ПЖЛ; Б – тектурные льды.

отложений и сингенетического промерзания. Предположительно, определенное влияние оказало изотопное фракционирование, связанное с периодическим оттаиванием и промерзанием пород переходного слоя. Тектурные льды разреза MG23-3, залегающие ближе к дневной поверхности, имеют наиболее легкий состав и высокий d_{exc} , и наоборот, тектурные льды, залегающие ниже, имеют утяжеленный состав и низкий d_{exc} (см. рис. 5, Е). Низкие угловые коэффициенты в уравнениях линейной регрессии, равные 4.7 (MG23-3) и 5 (MG22-1) в тектурных льдах (см. рис. 6, Б), указывают на изменения изотопного состава исходной атмосферной воды в процессе фракционирования при промерзании, протаивании и морозном иссушении отложений грунтового столба ЛК. Направленный тренд облегчения изотопного состава вверх по разрезу может быть связан с изменением поверхностных палеоэкологических или климатических условий, вероятно, это был переход от более теплого времени МИС 3 к более холодному МИС 2. В отсутствие датировок изученных отложений подтвердить эту гипотезу нет возможности. Подобный тренд с облегчением изотопного состава тектурных льдов и ПЖЛ при переходе от МИС 3 к МИС 2 был зафиксирован в ЛК побережья моря Лаптевых на обнажениях Мамонтов Клык, Ойягосский Яр и на о. Большой Ляховский [Деревягин и др., 2013, 2016].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что формирование озерно-аллювиальных отложений эльгинской свиты и залегающих на ней озерных отложений происходило в эпохи переходов от оледенений к межледниковьям МИС 8 – МИС 7 и МИС 6 – МИС 5е, в условиях многолетнего протаивания с поверхности.

Первичные данные по исследованию изотопного состава тектурных льдов ЛК 50-метровой террасы и 80–90-метрового уровня показали значительное влияние криогенного фракционирования изначальной атмосферной влаги в процессе промерзания–оттаивания. Линейный тренд изменения изотопного состава тектурных льдов по глубине разреза ледового комплекса может являться маркером направленных изменений палеоклиматических условий накопления отложений, характерных для рубежа теплого и влажного климата МИС 3 и холодного и засушливого климата МИС 2.

Впервые выполнено ОСЛ-датирование озерных (138–126 тыс. лет) и озерно-аллювиальных отложений (250–242 тыс. лет) эльгинской свиты 50-метровой террасы Мамонтовой Горы, уточняющее возраст этих отложений, что позволяет по-новому взглянуть на историю формирования четвертичных отложений восточной части Центральной Якутии.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта главы Республики Саха (Якутия) для молодых ученых, специалистов и студентов и НИОКТР 122011800064-9 “Строение и ключевые этапы эволюции континентальной криолитозоны в неоплейстоцене и голоцене”. А.И. Кизяков участвовал в работах в рамках государственного задания “Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии” (№ 121051100164-0).

Литература

- Агаджанян А.К., Боярская Т.Д., Глушанкова Н.И. и др. Разрез новейших отложений Центральной Якутии (Мамонтова Гора) // Палеогеография и перигляциальные явления плейстоцена: Сб. М., Изд-во Моск. ун-та, 1975, с. 40–49.
- Алексеев М.Н., Гриненко О.В., Камалетдинов В.А., Мочанов Ю.А. Неогеновые и четвертичные отложения Нижнеалданской впадины и средней Лены (Центральная Якутия): Путеводитель геолог. экскурсии (Якутск, 12–21 июля 1990 г.). Якутск, Изд-во Якут. науч. центра, 1990, 42 с.
- Большаинов Д.Ю., Правкин С.А., Фоменко А.П. и др. Изучение разреза четвертичных отложений Мамонтова Гора на реке Алдан // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России, 2023, вып. 10, с. 30–35.
- Вангенгейм Э.А. Палеонтологическое обоснование стратиграфии антропогенных отложений севера Восточной Сибири (по млекопитающим) // Тр. Геол. ин-та. М., Изд-во АН СССР, 1961, вып. 48, 189 с.
- Вангенгейм Э.А. Палеонтологическое обоснование стратиграфии антропогена Северной Азии (по млекопитающим). М., Наука, 1977, 172 с.
- Васильчук Ю.К., Шмелев Д.Г., Чербунина М.Ю. и др. Новые изотопно-кислородные диаграммы позднелайстотеновых и голоценовых повторно-жильных льдов Мамонтовой Горы и Сырдаха, Центральная Якутия // Докл. РАН, 2019, т. 486, № 3, с. 365–370.
- Васьковский А.П., Тучков И.И. Решение одной из важнейших палеогеографических проблем Мамонтовой горы на Алдане // Колыма, 1953, № 9, с. 42–44.
- Воскресенский К.С. Современные рельефообразующие процессы на равнинах Севера России. М., Изд-во Моск. ун-та, 2001, 262 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-53 – Хандыга. Пояснит. зап. / Казакова Г.Г., Тутасова Е.Н., Худoley А.К. и др. СПб., ВСЕГЕИ, 2021, 431 с. + 8 вкл.
- Деревягин А.Ю., Чижов А.Б., Майер Х. и др. Изотопный состав текстурированных льдов побережья моря Лаптевых // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 3, с. 27–34.
- Деревягин А.Ю., Чижов А.Б., Майер Х., Опель Т. Сравнительный анализ изотопного состава повторно-жильных и текстурированных льдов побережья моря Лаптевых // Криосфера Земли, 2016, т. XX, № 2, с. 15–24.
- Жесткова Т.Н. Криогенное строение мерзлых пород / Т.Н. Жесткова, М.И. Заболотская, В.В. Рогов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1980, 137 с.
- Зигерт Х.Г. Минералого-петрографическая характеристика отложений ледовых комплексов Центральной Якутии // Проблемы геокриологии. М., Наука, 1988, с. 101–107.
- Катасонов Е.М., Иванов М.С. Криолитология Центральной Якутии: Путеводитель к экскурсии по Лене и Алдану // II Междунар. конф. по мерзлотоведению. Якутск, Изд-во ОУПЭС СО АН СССР, 1973, 37 с.
- Минюк П.С. Магнитостратиграфия кайнозоя Северо-Востока России. Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2004, 198 с.
- Мноцен Мамонтовой Горы (стратиграфия и ископаемая флора) / Баранова Ю.П., Ильинская И.А., Никитин В.П. и др. М., Наука, 1976, 284 с.
- Папина Т.С., Малыгина Н.С., Эйрих А.Н. и др. Изотопный состав и источники атмосферных осадков в Центральной Якутии // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 2, с. 60–69.
- Разрез новейших отложений Мамонтова Гора / Агаджанян А.К., Боярская Т.Д., Глушанкова Н.И., Шлюков А.И. М., Изд-во Моск. ун-та, 1973, 179 с.
- Русанов Б.С. Биостратиграфия кайнозойских отложений Южной Якутии. М., Наука, 1968, 459 с.
- Brouchkov A., Kabilov M., Filippova S. et al. Bacterial community in ancient permafrost alluvium at the Mammoth Mountain (Eastern Siberia) // Gene, 2017, vol. 636, p. 48–53.
- Cherbunina M.Y., Karaevskaya E.S., Vasil'chuk Y.K. et al. Microbial and geochemical evidence of permafrost formation at Mamontova Gora and Syrdakh, Central Yakutia // Front. Earth Sci., 2021, vol. 9, art. 739365.
- Dansgaard W. Stable isotope in precipitation // Tellus, 1964, vol. XVI, No. 4, p. 436–468.
- Kostyukovich V.V. A regional geochronological study of Late Pleistocene permafrost // Radiocarbon, 1993, vol. 35 (3), p. 477–486.
- Meyer H., Siegert C., Derevyagin A. et al. Paleoclimate reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ice wedges // Permafr. Periglac. Process., 2002, vol. 13, p. 91–103.
- Murton J., Opel T., Wetterich S. et al. Batagay megaslump: A review of the permafrost deposits, Quaternary environmental history, and recent development // Permafr. Periglac. Process., 2023, vol. 34 (3), p. 399–416.
- Péwé T., Journaux A. Origin and character of Loesslike silt in unglaciated South-Central Yakutia, Siberia, U.S.S.R. // Geol. Surv. Profession. Pap., 1983, vol. 1262, p. 1–45.
- Péwé T., Journaux A., Stuckenrath R. Radiocarbon dates and Late–Quaternary stratigraphy from Mamontova Gora, unglaciated Central Yakutia, Siberia, U.S.S.R. // Quat. Res., 1977, vol. 8 (1), p. 51–63.
- Popp S., Diekmann B., Meyer H. et al. Palaeoclimate signals as inferred from stable-isotope composition of ground ice in the Verkhoyansk foreland, Central Yakutia // Permafr. Periglac. Process., 2006, vol. 17 (2), p. 119–132.
- Porter T.J., Opel T. Recent advances in paleoclimatological studies of Arctic wedge- and pore-ice stable-water isotope records // Permafr. Periglac. Process., 2020, vol. 31 (3), p. 429–441.
- Schirrmeister L., Froese D., Tumskey V. et al. Yedoma: Late Pleistocene ice-rich syngenetic permafrost of Beringia // Encyclopedia Quat. Sci., 2013, vol. 3, p. 542–552.
- Tananaev N. Radiocarbon dates from Central Yakutia // Dataset, 2021. – <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.14261372.v2>.
- Vaks A., Gutareva O.S., Breitenbach S.F.M. et al. Speleothemes reveal 500 000-year history of Siberian permafrost // Science, 2013, vol. 340, p. 183–186.
- Vaks A., Mason A.J., Breitenbach S.F.M. et al. Paleoclimate evidence of vulnerable permafrost during times of low sea ice // Nature, 2020, vol. 577, p. 221–225.

References

Agajanian A.K., Boyarskaya T.D., Glushankova N.I. et al. Section of the latest sediments of Central Yakutia (Mamontova

- Gora). Yakutia (Mamontova Gora). Paleogeografia i periglacialnye yavleniya pleistotsena [Pleistocene Paleogeography and Periglacial Processes]. Moscow, Moscow Univ. Press, 1975, p. 40–49 (in Russian).
- Alekseev M.N., Grinenko O.V., Kamaletdinov V.A., Mochanov Y.A. Neogene and Quaternary sediments of the Lower Aldan depression and the middle Lena (Central Yakutia): Guidebook of geologic excursions (Yakutsk, July 12–21, 1990). Yakutsk, Izd-vo Yakutsk Scientific Center, 1990, 42 p. (in Russian).
- Bolshiyakov D.Yu., Pravkin S.A., Fomenko A.P. et al. Study of the section of Quaternary sediments of Mamontova Gora on the Aldan River. In: Relief and Quaternary sediments of the Arctic, Subarctic and North-West Russia, 2023, vol. 10, p. 30–35 (in Russian).
- Vangengeim E.A. Paleontological substantiation of stratigraphy of Anthropogenic deposits of the north of Eastern Siberia (on mammals). In: Proceedings of the Geological Institute. Moscow, Izd-vo AN SSSR, 1961, issue 48, 189 p. (in Russian).
- Vangengeim E.A. Paleontologicheskoe obosnovanie stratigrafii antropogena Severnoi Azii [Paleontological substantiation of the stratigraphy of the Anthropogene of North Asia (on mammals)]. Moscow, Nauka, 1977, 172 p. (in Russian).
- Vasilchuk Y.K., Shmelev D.G., Cherbunina M.Y. et al. New isotope-oxygen diagrams of Late Pleistocene and Holocene re-entrant ice of Mamontova Gora and Syrdakh, Central Yakutia. Doklady RAN [Reports of the Academy of Sciences], 2019, vol. 486, No. 3, p. 365–370.
- Vaskovskiy A.P., Tuchkov I.I. Solution of the most important paleoenvironment problem of Mamontova Gora Aldan River. Kolyma [Kolyma], 1953, No. 9, p. 42–44.
- Voskresensky K.S. Sovremennye rel'efoobrazuyushchie protsessy na ravninakh Rossii [Modern relief-forming processes on the plains of Northern Russia]. Moscow, Moscow Univ. Press, 2001, 262 p. (in Russian).
- State geologic map of Russian federation on scale of: 1:1 000 000, generation 3. Verkhoyan-Kolyma series. Sheet P-53 Khandyga. Eplanatory note / Kazakova G.G., Tutasova E.N., Khudoley A.K. et al. St. Petersburg, Izd-vo VSEGEI, 2021, 431 p. +8 incl. (in Russian).
- Dereviagin A.Yu., Chizhov A.B., Mayer H. et al. Isotopic composition of texture ices, Laptev Sea coast. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 3, p. 27–34.
- Dereviagin A.Yu., Chizhov A.B., Mayer H., Opel T. Comparative analysis of the isotopic composition of ice wedges and texture ices at the Laptev Sea coast. Earth's Cryosphere, 2016, vol. XX, No. 2, p. 14–22.
- Zhestkova T.N., Zabolotskaya M.I., Rogov V.V. Kriogennoe stroenie merzlykh porod [Cryogenic structure of frozen rocks]. Moscow, Moscow Univ. Press, 1980, 137 p. (in Russian).
- Siebert H.G. Mineralogical and petrographic characterization of sediments of ice complexes of Central Yakutia. Problemy geokriologii [Problems of Geocryology]. Moscow, Nauka, 1988, p. 101–107 (in Russian).
- Katasonov E.M., Ivanov M.S. Cryolithology of Central Yakutia: Guide to the excursion along the Lena and Aldan. In: II Int. Conf. on Permafrost Science. Yakutsk, OUPES SO AN SSSR, 1973, 37 p. (in Russian).
- Minyuk P.S. Magnitostatigrafiya Kainozoya Severo-Vostoka Rossii [Magnetostatigraphy of the Cenozoic of the North-East of Russia]. Magadan, SVKNII DVO RAN, 2004, 198 p. (in Russian).
- Miotsen Mamontovoi Gory [Miocene of the Mamontova Gora outcrop (stratigraphy and fossil flora)]. Baranova Yu.P., Ilyinskaya I.A., Nikitin V.P. et al. Moscow, Nauka, 1976, 284 p. (in Russian).
- Papina T.S., Malygina N.S., Eirikh A.N. et al. Isotopic composition and sources of atmospheric precipitation in Central Yakutia. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 2, p. 52–61.
- Razrez noveishikh otlozhenii Mamontova Gora [Cross section of the recent deposits at Mamontova Gora]. Agajanian A.K., Boyarskaya T.D., Glushakova N.I., Shlyukov A.I. Moscow, Moscow Univ. Press, 1973, 179 p. (in Russian).
- Rusanov B.S. Biostratigrafiya kainozoiskikh otlozhenii Yuzhnoi Yakutii [Biostratigraphy of Cenozoic sediments of Southern Yakutia]. Moscow, Nauka, 1968, 459 p. (in Russian).
- Brouchkov A., Kabilov M., Filippova S., Baturina O., Rogov V., Galchenko V., Mulyukin A., Fursova O., Pogorelko G. Bacterial community in ancient permafrost alluvium at the Mammoth Mountain (Eastern Siberia). Gene, 2017, vol. 636, p. 48–53.
- Cherbunina M.Y., Karaevskaya E.S., Vasil'chuk Y.K. et al. Microbial and geochemical evidence of permafrost formation at Mamontova Gora and Syrdakh, Central Yakutia. Front. Earth Sci., 2021, vol. 9, art. 739365.
- Dansgaard W. Stable isotope in precipitation. Tellus, 1964, vol. XVI, No. 4, p. 436–468.
- Kostyukevich V.V. A regional geochronological study of Late Pleistocene permafrost. Radiocarbon, 1993, vol. 35 (3), p. 477–486.
- Meyer H., Siebert C., Dereviagin A. et al. Paleoclimate reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ice wedges. Permafr. Periglac. Process., 2002, vol. 13, p. 91–103.
- Murton J., Opel T., Wetterich S., Ashastina K., Savvinov G., Danilov P., Boeskorov V. Batagay megaslump: A review of the permafrost deposits, Quaternary environmental history, and recent development. Permafr. Periglac. Process., 2023, vol. 34 (3), p. 399–416.
- Péwé T., Journaux A. Origin and character of Loesslike silt in unglaciated South-Central Yakutia, Siberia, U.S.S.R. Geol. Surv. Profession. Pap., 1983, vol. 1262, p. 1–45.
- Péwé T., Journaux A., Stuckenrath R. Radiocarbon dates and Late-Quaternary stratigraphy from Mamontova Gora, unglaciated Central Yakutia, Siberia, U.S.S.R. Quat. Res., 1977, vol. 8 (1), p. 51–63.
- Popp S., Diekmann B., Meyer H. et al. Palaeoclimate signals as inferred from stable-isotope composition of ground ice in the Verkhoyansk foreland, Central Yakutia. Permafr. Periglac. Process., 2006, vol. 17 (2), p. 119–132.
- Porter T.J., Opel T. Recent advances in paleoclimatological studies of Arctic wedge- and pore-ice stable-water isotope records. Permafr. Periglac. Process., 2020, vol. 31 (3), p. 429–441.
- Scherrmeister L., Froese D., Tumskey V. et al. Yedoma: Late Pleistocene ice-rich syngenetic permafrost of Beringia. Encyclopedia Quat. Sci., 2013, vol. 3, p. 542–552.
- Tananaev N. Radiocarbon dates from Central Yakutia. Dataset, 2021. – <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.14261372.v2>
- Vaks A., Gutareva O.S., Breitenbach S.F.M., Avirmed E., Mason A.J., Thomas A.L., Osinzev A.V., Kononov A.M., Henderson G.M. Speleothemes reveal 500 000-year history of Siberian permafrost. Science, 2013, vol. 340, p. 183–186.
- Vaks A., Mason A.J., Breitenbach S.F.M., Kononov A.M., Osinzev A.V., Rosensaft M., Borshevsky A., Gutareva O.S., Henderson G.M. Paleoclimate evidence of vulnerable permafrost during times of low sea ice. Nature, 2020, vol. 577, p. 221–225.

Поступила в редакцию 6 мая 2024 г.,
после доработки – 4 июля 2024 г.,
принята к публикации 25 августа 2024 г.