

ДИСКУССИЯ

УДК 551.345 : 551.345.3 : 551.89 : 902.66

DOI: 10.15372/KZ20210205

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ЯНВАРСКОЙ ПАЛЕОТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА
48–15 ТЫСЯЧ КАЛИБРОВАННЫХ ЛЕТ НАЗАД
ПО ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНОМУ СОСТАВУ ЕДОМЫ ЗЕЛЕННОГО МЫСА****Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук***Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический и геологический ф-ты,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; vasilch_geo@mail.ru*

Рассмотрены особенности строения и состава позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов в обнажении едомы у пос. Зеленый Мыс, расположенном на правом берегу Колымы. Исследован изотопно-кислородный состав ледяных жил, их радиоуглеродный возраст, гидрохимические особенности. Стабильные изотопы кислорода ледяных жил обеспечивают основу для реконструкции среднеянварской палеотемпературы воздуха. Выполнены количественные оценки изменения палеогеокриологических и палеоклиматических характеристик региона в позднем неоплейстоцене 48–15 тысяч калиброванных лет назад.

Повторно-жильные льды, поздний неоплейстоцен, многолетнемерзлые породы, едома, изотопы кислорода, радиоуглеродный возраст, пыльца и споры, гидрохимия, Зеленый Мыс, низовья Колымы, северо-восток Якутии

**AIR JANUARY PALEOTEMPERATURE RECONSTRUCTION
48–15 CALIBRATED KA BP USING OXYGEN ISOTOPE RATIOS FROM ZELYONY MYS YEDOMA****Yu.K. Vasil'chuk, A.C. Vasil'chuk***Lomonosov Moscow State University, Faculties of Geography and Geology,
Leninskie Gory 1, Moscow, 119991, Russia; vasilch_geo@mail.ru*

The features of the Late Pleistocene ice wedges in the outcrop of the Zelyony Mys Yedoma located on the right bank of the Lower Kolyma River are considered. The oxygen isotope composition of ice wedges, their radiocarbon age, hydrochemical features have been studied. Stable oxygen isotopes provide the main basis for reconstructing the mean January air temperature history of a site from ice wedges. Detailed quantitative assessments of paleogeocryological and paleoclimatic changes of the region in the Late Pleistocene 48–15 cal ka BP were performed.

Ice wedge, Late Pleistocene, permafrost, yedoma, oxygen isotope, radiocarbon age, pollen and spores, hydrochemistry, Zelyony Mys exposure, Lower Kolyma River, north-eastern Yakutia

ВВЕДЕНИЕ

Сингенетические повторно-жильные льды (ПЖЛ) активно накапливались на Приморских низменностях во время позднего неоплейстоцена. Разрез едомных отложений Зеленый Мыс расположен в районе границы тундры и лесотундры, это территория, чувствительная к изменениям климатических и ландшафтных условий. Цели работы: 1) исследование сингенетических позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов и вмещающих их отложений едомы в обнажении, расположенном на правом берегу р. Колымы у пос. Зеленый Мыс; 2) изучение изотопно-кислородного состава ПЖЛ; 3) радиоуглеродный, гидрохимический анализ ПЖЛ и вмещающих отложений,

обобщение всех радиоуглеродных данных по разрезу; 4) реконструкция палеотемпературы воздуха в позднем неоплейстоцене 48–15 калиброванных (кал.) тыс. лет назад в этом регионе.

**МЕСТОПОЛОЖЕНИЕ
И ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ
ОСОБЕННОСТИ ИЗУЧЕННОГО УЧАСТКА**

Разрез едомы Зеленый Мыс расположен в 3 км от пос. Черский на правом берегу р. Колымы в 130 км от ее устья, в континентальной области арктического пояса Северо-Востока России. Средняя температура воздуха в январе равна -32.3°C , июле $+15.5^{\circ}\text{C}$, среднезимняя температура -31°C ,

Статья Ю.К. Васильчука и А.К. Васильчук публикуется вопреки решению редакционной группы, так как содержит значительный объем самоплагиата и не имеет научной новизны. Авторы статьи обратились к главному редактору журнала академику В.П. Мельникову, который принял решение опубликовать эту статью в разделе "Дискуссия", проведя параллельно ее независимое рецензирование. Поэтому далее публикуется открытая рецензия А.А. Галанина на данную статью.

© Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук, 2021



Рис. 1. Расположение разреза Зеленый Мыс и соответствующих по возрасту едомных разрезов на северо-востоке Якутии.

средняя температура лета $+15^{\circ}\text{C}$, среднегодовая температура -10.8°C , среднегодовая сумма осадков составляет 197 мм, устойчивый снежный покров формируется с сентября до середины мая [Davydov et al., 2008]. По данным метеостанции Черский, в период с 1940 по 2020 г. наиболее низкая температура января наблюдалась в 1964 г. (-41.7°C), самая высокая – в 1969 г. (-24.4°C); самая низкая среднегодовая температура наблюдалась в 1940 г. (-14.5°C), а наиболее высокая – в 2003 г. (-7.4°C); максимальная температура июля наблюдалась в 1960 г. (17.7°C), а минимальная – в 1948 г. (8.6°C); максимальная сумма осадков наблюдалась в 1968 г. (439 мм), минимальная среднегодовая сумма осадков отмечена в 1978 г. (102 мм) [www.pogoda.klimat.ru]. Мощность многолетнемерзлых пород достигает 500–600 м, среднегодовая температура пород чаще всего варьирует в интервале от -9 до -11°C [Fyodorov-Davydov et al., 2004]. Многолетнемерзлые породы в регионе имеют сплошное распространение, за исключением таликов под крупными реками. В период наблюдений 1970–2009 гг. среднегодовая температура многолетнемерзлых пород в наблюдательных скважинах в районе пос. Черский изменялась от -12 до -9°C [Romanovsky et al., 2010].

Едомная толща, вскрытая в обнажении Зеленого Мыса на правом берегу р. Колымы вблизи пос. Зеленый Мыс (рис. 1), – одна из самых представительных среди всех едомных толщ. В наиболее полном виде вертикальная стенка обнаже-

ния достигала 36 м. В настоящее время обнажение перекрыто оползнями.

В 1983 г. Ю.А. Мурзин и Я.И. Торговкин [1984] одновременно с авторами описали обнажение этого ледового комплекса и отметили, что обнажение сформировалось на месте небольшого озера, спущенного в 1981 г. Осушенная озерная котловина имела ширину около 200 м и длину 400 м. На месте спуска озера возник глубокий овраг, в бортах которого и сформировалось несколько обнажений. Изучение едомы Зеленый Мыс имеет короткую историю, так как само обнажение просуществовало недолго [Васильчук, 1992; Губин, Лупачев, 2008; Михалев и др., 2012; Губин, Занина, 2013; Vasil'chuk et al., 1985; Zaniina, 2005].

Зональная растительность в окрестностях разреза представлена предтундровыми лиственничниками. Согласно Ю.П. Кожевникову, лесообразующая порода здесь – *Larix cajanderi* Mayr. В кустарниковом ярусе встречаются *Betula exilis* Sukacz., *Salix glauca* L., *Rosa acicularis* Lindl., а также кустарнички *Vaccinium uliginosum* L., *Arctous erythrocarpa* Small., *A. alpina* (L.) Niedenzu [Кожевников, 1981]. По данным О.Г. Заниной и Д.А. Лопатиной [2017], растительность на дне спущенного озера у разреза Зеленый Мыс характеризуется пионерными растительными группировками с преобладанием *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., *Tanacetum vulgare* L., *Erigeron acris* L., *Poa pratensis* L., *Hordeum jubatum* (L.) Nevski, *Salix glauca* L.

СТРОЕНИЕ И СОСТАВ ИССЛЕДОВАННЫХ ЕДОМНЫХ ТОЛЩ

Едомная толща Зеленого Мыса была вскрыта в 1983 г. в овраге в 2 км севернее пос. Зеленый Мыс на правом берегу р. Колымы (см. рис. 1). Здесь высокое обнажение (до 35–36 м) вскрывает толщу сильнольдистой едомы в средней части оврага (68.7875° с.ш., 161.3806° в.д.). Обнажение изучалось авторами ежегодно в период 1983–1988 гг., в начале нулевых годов XXI в. оно было полностью засыпано и заплыло оползнями и делювиально-солифлюкционными отложениями.

Состав и криолитологические особенности едомной толщи. Обнажение высотой около 36 м состоит из двух частей: верхняя серая мощностью около 12–13 м, практически без органического материала, и нижняя коричневатато-серая мощностью 24 м, в которой отмечены три оторфованных слоя с растительным детритом и три слоя, где органические остатки визуальнo не зафиксированы. Именно эти насыщенные органикой прослои (рис. 2, *a*) послужили основным триггером для гипотезы циклически пульсирующего развития едомных толщ с мощными ледяными жилами [Васильчук, 1992, 1999].

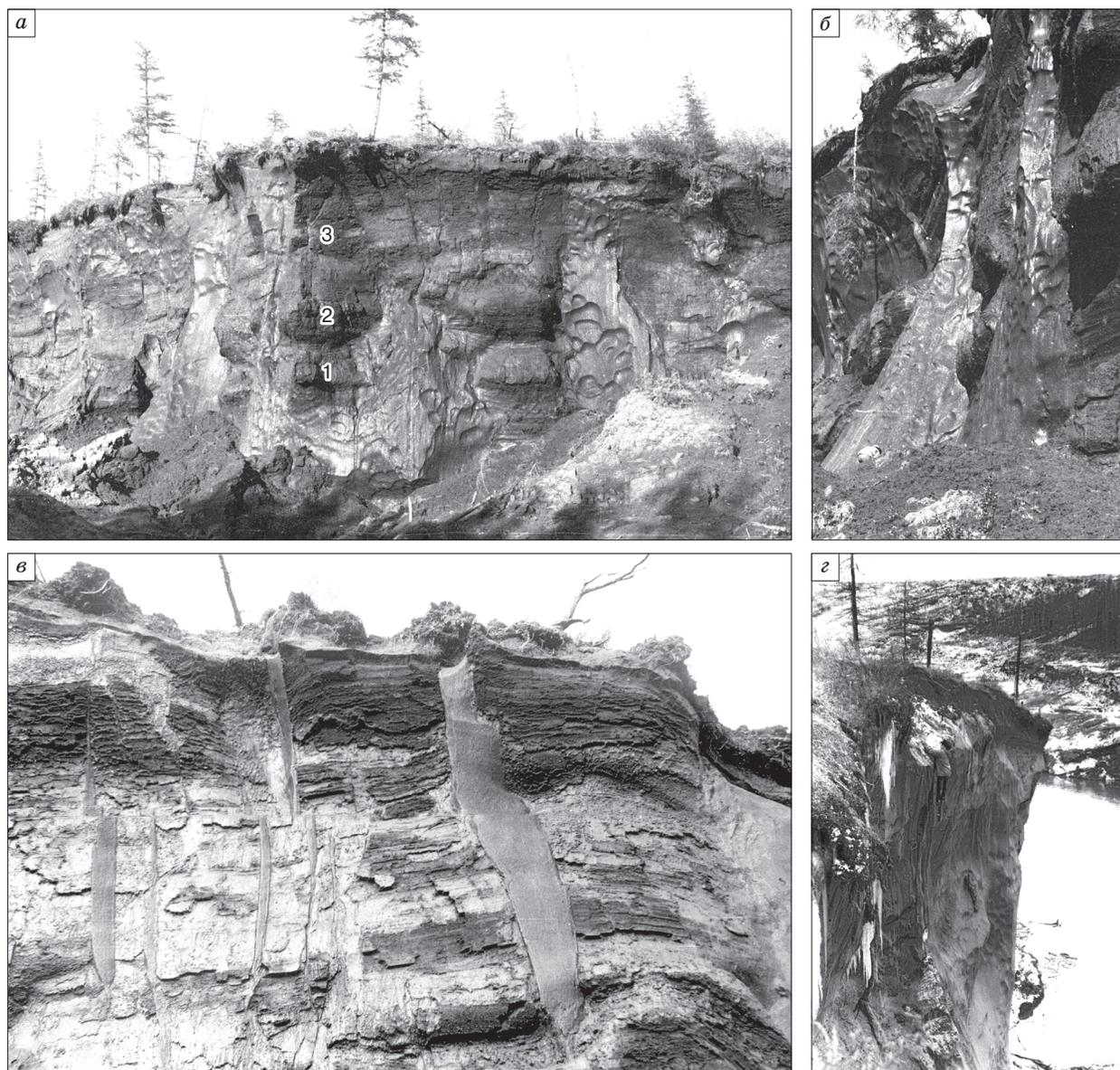


Рис. 2. Сингенетические позднеплейстоценовые повторно-жильные льды в обнажении едомы Зеленого Мыса, на правом берегу в низовьях р. Колымы.

a – общий вид; *б–г* – фрагменты. 1–3 – прослои органики. Фото Ю.К. Васильчука.

Верхний горизонт обнажения (мощностью менее 0.5 м) представлен озерными суглинками с ленточной слоистостью. Ниже залегают отложения повторно-жильного комплекса, представленные темно-серыми супесями мощностью 11–12 м. Криотекстура средне- и тонкошлировая, редко поясковая. Суммарная влажность составляет 75–100 %. В интервале 12.5–16.3 м вскрыт верхний слой оторфованных суглинков, в средней части практически чистый темно-коричневый торф, весь оторфованный слой пронизан корешками, которые были отобраны для ^{14}C -датирования. Криотекстура – решетчатая. В интервале 16.3–18.6 м супесь коричнево-серая, преимущественно с тонкослоистой, средне- и тонкошлировой криотекстурой. На глубине 18.6–20.1 м торф коричневый с корешками и супесью, криотекстура преимущественно решетчатая. В интервале 20.1–24.2 м супесь коричнево-серая, криотекстура преимущественно сетчато-слоистая, тонкошлировая. На глубине 24.2–25.4 м торф коричневый, опесчаненный с корешками, криотекстура – косослоистая, решетчатая. Ниже до глубины 36 м супесь темно-серая, криотекстура – горизонтально и косослоистая тонкошлировая. В распределении льдистости и криотекстур по разрезу, как и в литологическом строении, отмечается трехчленная мезоцикличность: повышение льдистости, уменьшение толщины шпиров льда и расстояния между ними от менее оторфованных горизонтов вверх – к подошве более оторфованных горизонтов. Такое криогенное строение связано с процессом накопления толщи в субквальной среде и промерзанием ее в стадии осушения, т. е. при формировании оторфованного горизонта [Васильчук, 1999].

ПЖЛ пересекают всю едомную толщу. В нижней части ширина ледяных жил достигает 2.0–2.5 м во фронтальном разрезе, а в верхней части они значительно уже; их ширина во фронтальном разрезе не превышает 0.5–1.0 м, расстояние между жилами составляет 2–5 м (см. рис. 2). На уровне торфяных горизонтов у транзитных ПЖЛ хорошо выражены плечики.

Лед жил – серый, вертикально полосчатый, полосчатость обусловлена включениями супеси, вытянутыми по вертикали.

МЕТОДЫ ПОЛЕВЫХ И ЛАБОРАТОРНЫХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Органику для радиоуглеродного датирования отбирали из мерзлой стенки обнажения. Корешки для датирования отбирались непосредственно после отбора монолита мерзлого грунта, для отмывания использовалась вода, полученная при таянии ПЖЛ. Образцы ПЖЛ отбирались из осевой части ледяных жил объемом 0.5–1.0 дм³, согласно методике, разработанной Ю.К. Васильчуком [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, 1991].

Определение радиоуглеродного возраста повторно-жильных льдов и вмещающих отложений. Радиоуглеродные датировки органических макроостатков (в основном корешков трав и веточек кустарничков) из вмещающих ледяные жилы едомных толщ выполнялись в Геологическом институте РАН при участии Л.Д. Сулержицкого, пробоподготовка осуществлялась авторами в течение месяца после отбора образцов. AMS-датировки микровключений органики, непосредственно экстрагированной из ледяных жил, выполнялись в лаборатории ускорительной масс-спектрометрии Сеульского национального университета при содействии проф. Й.-Ч. Кима. Образцы для датирования хранились в лабораторном холодильнике при температуре –10 °С. Для калибровки ^{14}C -датировок использована калибровочная программа OxCal [Bronk Ramsey, 2009], версия 4.3, основанная на массиве калибровочных данных IntCal13 [Reimer et al., 2013].

Гидрогеохимические определения в повторно-жильных льдах и вмещающих отложениях. Определения содержания водорастворимых солей в ПЖЛ выполнены титрованием в лаборатории ПНИИИС в течение месяца после отбора образцов.

Изотопный анализ повторно-жильных льдов выполнен в лаборатории ИВП РАН (с.н.с. А.Д. Есиков) на масс-спектрометре Varian Mat 250, пробоподготовка осуществлялась авторами в течение месяца после отбора образцов.

РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИТИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ

Радиоуглеродные датировки из вмещающих отложений и непосредственно из повторно-жильных льдов. Четыре датировки, которые явились основой первоначальной привязки жил во времени, были выполнены по корешкам, т. е. по органическим остаткам, залегающим *in situ*. В верхнем оторфованном слое это даты 32.2 и 32.9 тыс. кал. лет, в среднем слое 38.1 тыс. кал. лет и в нижнем – 41.9 тыс. кал. лет (табл. 1, рис. 3).

Из-за низкого содержания органики в верхней части едомной толщи время завершения ее накопления вначале было определено приблизительно в 13 тыс. лет [Васильчук, 1992, т. 1, с. 384]. Таким образом, временной интервал формирования жил был приблизительно оценен от 45 до 13 тыс. лет, что соответствует временному интервалу от 48 до 15 тыс. кал. лет. Впоследствии верхний предел формирования едомной толщи был подтвержден ^{14}C -датировкой из погребенного почвенного горизонта близ дневной поверхности 15.7 тыс. кал. лет. В этом же интервале позднее получены датировки (см. табл. 1) из норок сусликов – 34.8 и 37.2 тыс. кал. лет в среднем слое [Zanina, 2005], по крупным веткам из основания

Таблица 1. Радиоуглеродные датировки органического материала из едомных сингенетических позднеоплейстоценовых отложений, вмещающих повторно-жильные льды в разрезе Зеленый Мыс, правобережье в низовьях р. Колымы

Полевой номер или источник	Глубина, м	¹⁴ C-возраст, лет	Лаборат. индекс	Вид датированной органики	Калибр. возраст	Медианное значение
					кал. лет назад	
[Губин, Луначев, 2008]	3.2	13 140 ± 140	EP-941615	Почва	16 350–15 145	15 761
308-YuV/46	12.0	28 600 ± 1500	ГИН-3574	Корешки, мГП	40 105–28 927	32 936
315-YuV/5	12.0	33 800 ± 900	ГИН-3850	Корешки	41 558–35 410	38 177
[Zanina, 2005]	12.0	30 500 ± 1400	ИЭМЭЖ-1179	Семена из норки суслика, P-917	41 070–31 105	34 833
[Zanina, 2005]	12.0	32 800 ± 1400	ИЭМЭЖ-1178	Семена из норки суслика, P-923	42 616–33 675	37 278
315-YuV/46	12.0	43 700 ± 800	ГИН-3849	Берцовая кость мамонта	49 905–45 100**	47 043
315-YuV/4г	12.0	Более 50 000	ГИН-3848	Челюсть мамонта	–	–
308-YuV/27	16.4	27 900 ± 1200	ГИН-3575	Корешки	37 024–28 776	32 220
308-YuV/27	16.4	Более 39 000	ГИН-3575	Корешки, мГП	–	–
308-YuV/28	23.7	37 600 ± 800	ГИН-3576	Корешки	44 202–39 986	41 977
308-YuV/28	23.7	Более 40 000	ГИН-3576	Корешки, гП	–	–
352-YuV/1	20.0	42 800 ± 700	ГИН-5710	Рог бизона	48 824–44 381	44 381
[Губин, Занина, 2013]	Нижняя часть едомы	43 600 ± 1000*	ГИН-8014	Крупные ветки	49 857–44 998**	46 943
[Губин, Занина, 2013]	То же	43 400 ± 1000*	ГИН-8013	То же	49 752–44 796**	46 743
[Губин, Занина, 2013]	»	Более 48 000*	ГИН-8011	»	–	–
[Губин, Занина, 2013]	»	Более 48 000*	ГИН-8012	»	–	–
[Ложкин, 1977]	Нижняя часть едомы (8 м над рекой)	35 200 ± 800	МАГ-295	Корешки	42 250–37 103	39 829
		28 240 ± 330	МАГ-294	»	33 529–31 187	32 162
		27 200 ± 200	МАГ-298	»	31 574–30 763	31 155
[Векслер, Преде, 1985]	Нижняя часть едомы	33 900 ± 500	RI-111	Торф, плохо разложившийся	40 153–36 366	38 312
[Векслер, Преде, 1985]	То же	38 700 ± 700	RI-115	То же	44 741–41 383	42 736

П р и м е ч а н и е. Калибровка ¹⁴C-дат проведена с использованием программы OxCal 4.3 [Bronk Ramsey, 2009] на базе калибровочных данных IntCal 13 [Reimer et al., 2013].

*Отбор выполнен в нижней части оврага из останца едомы, верхняя часть которой снесена склоновыми процессами [Губин, Занина, 2013].

**По результатам калибровки в программе OxCal 4.3 датировка может быть вне рамок датирования по ¹⁴C.

едомы – 46.9 и 46.7 тыс. кал. лет [Губин, Занина, 2013]. Эти датировки полностью подтвердили достоверность хронологии едомы Зеленого Мыса, предложенную в [Vasil'chuk et al., 1985] – от 48 до 15 тыс. кал. лет.

Верхняя датировка, полученная авторами по образцу, отобранному непосредственно из льда, подтвердила время окончания накопления жил – 15.7 тыс. кал. лет назад (см. рис. 3, табл. 2).

Из осевой части ледяной жилы на глубине 3 м получена дата 16.4 тыс. кал. лет, на глубине 6.5 м – 30.8 тыс. кал. лет и на глубине 8 м – 32.7 тыс. кал. лет (см. табл. 2). Эти даты в целом вполне укладываются в общий временной диапазон формирования верхней части этого жильного комп-

лекса. Ориентируясь на прямые датировки, можно предположить, что скорость накопления ледяных жил варьировала от 0.2 до 1.0 м за тысячу лет.

Более древние даты, полученные по костям мамонта, свидетельствуют о переотложении последних. Есть основания думать, что дата 47 тыс. кал. лет по берцовой кости мамонта относится к начальному этапу накопления этой едомной толщи, тем более что в осыпи близко к ее основанию авторами получена сходная дата по рогу бизона – около 46 тыс. кал. лет (42 800 ± 700 лет – ГИН-5710). Поскольку эти кости залегают отдельно от скелета, они, безусловно, переотложены.

Гидрохимические особенности повторно-жильных льдов. Минерализация повторно-жиль-

ных льдов невысокая (60–134 мг/л), в составе солей доминируют бикарбонаты (до 102 мг/л). Хорошо заметна мезоцикличность – в нижних частях циклов лед более минерализован (100 мг/л и более), выше минерализация уменьшается (до 60–80 мг/л), затем она вновь возрастает (до 94 мг/л), а выше уменьшается до 78 мг/л (табл. 3, рис. 4).

Наиболее важным авторам представляется то, что малая минерализация льда вполне согласуется с преимущественным формированием ПЖЛ из талого снега. Максимальная минерализация на глубине 13.1 м обусловлена максимумом содержания карбонат-иона (102.5 мг/л) и иона кальция (25.3 мг/л). В нижней части жил отмечается максимум содержания катионов $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ (22.8 мг/л). Отметим также три ритма, выделяющиеся в распределении содержания сульфат-иона и ионов калия и натрия. Сравнительно высокое содержание сульфат-иона относительно хлорид-иона свидетельствует о высокой степени континентальности в период накопления ПЖЛ.

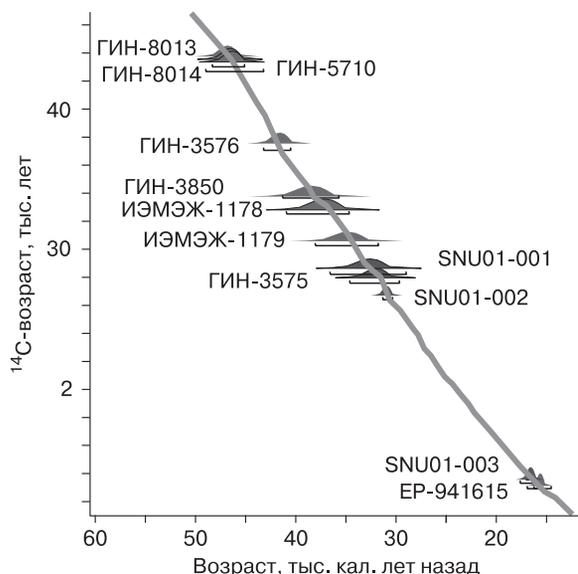


Рис. 3. Калиброванный радиоуглеродный возраст отложений едомы и ПЖЛ Зеленого Мыса.

Таблица 2. Радиоуглеродные AMS-датировки органических микровключений из сингенетических позднеоолейстоценовых повторно-жилных льдов в разрезе Зеленый Мыс, правобережье в низовьях р. Колымы

Полевой номер	Глубина, м	¹⁴ C-возраст, лет	Лаборат. индекс	$\delta^{13}\text{C}$ органики, ‰	Калибр. возраст	Медианное значение
					кал. лет назад	
315-YuV/16	3.0	13 600 ± 200	SNU01-003	-32.5	17 386–15 591	16 422
315-YuV/11	6.5	26 700 ± 300	SNU01-002	-25.4	31 457–29 868	30 879
315-YuV/8	8.0	28 700 ± 500	SNU01-001	-30.2	34 261–31 208	32 728

Таблица 3. Состав и содержание водорастворимых солей в позднеоолейстоценовых сингенетических ПЖЛ

Номер образца	Глубина отбора, м	Сухой остаток, мг/л	Состав компонентов, мг/л						pH
			HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	
308-YuV/52	3.0	78.0	72.0	5.7	7.4	16.0	6.1	4.4	7.15
315-YuV/11	6.5	94.0	68.3	8.5	13.2	16.8	6.8	5.3	7.00
315-YuV/9	7.5	84.0	68.3	6.4	9.9	16.0	6.3	4.4	7.07
308-YuV/55	8.0	74.0	56.1	5.7	10.7	11.6	6.1	5.1	7.13
308-YuV/56	8.5	60.0	41.5	5.7	8.2	8.0	4.4	5.8	6.97
315-YuV/6	9.0	86.0	74.4	6.4	9.1	16.8	7.5	3.0	7.13
308-YuV/40	9.5	120.0	85.4	6.0	21.4	12.2	7.8	18.4	7.30
308-YuV/43	11.6	104.0	85.4	5.3	18.1	13.4	8.1	13.6	7.65
315-YuV/21	13.1	134.0	102.5	6.3	4.1	25.3	7.8	1.2	6.83
315-YuV/22ф	13.1	82.0	58.6	9.8	11.5	9.2	2.7	18.4	7.05
315-YuV/23ф	13.1	88.0	79.3	7.7	6.6	12.8	5.1	13.8	7.10
308-YuV/48	15.5	100.0	70.8	6.0	21.4	10.0	7.0	9.9	7.70
308-YuV/5	15.6	100.0	73.2	7.8	18.1	7.6	5.2	22.8	7.50
308-YuV/8	17.0	104.0	75.6	6.0	19.7	15.4	2.8	18.9	7.70

Примечание. Максимальные значения выделены жирным шрифтом.

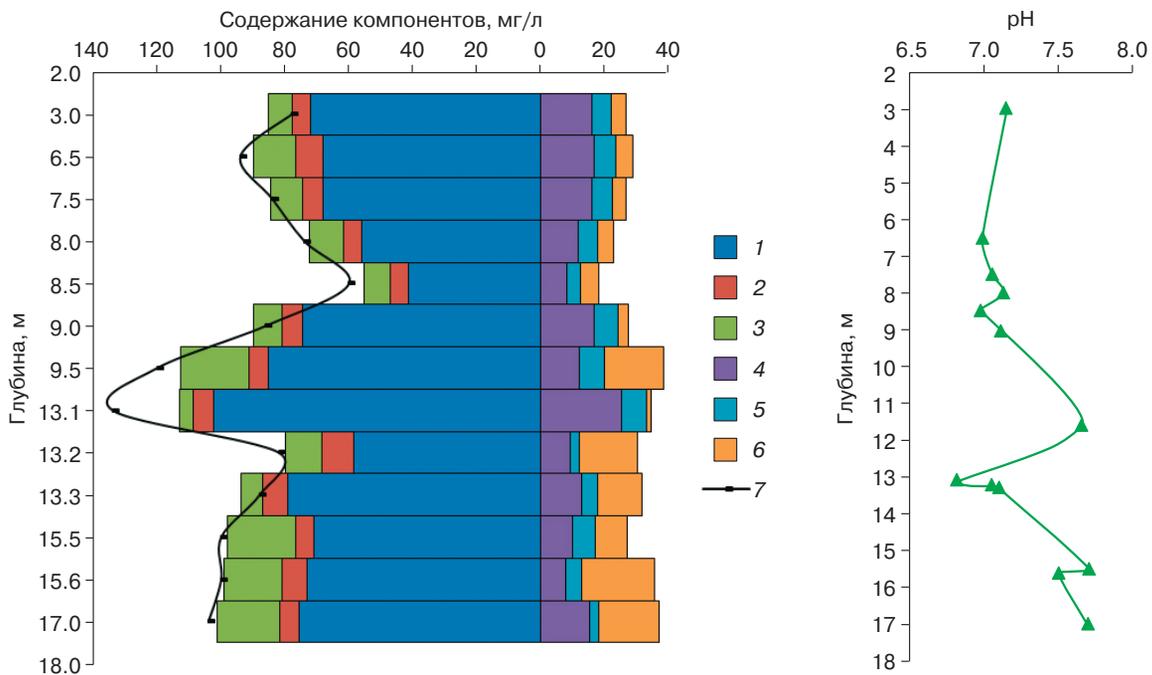


Рис. 4. Состав водорастворимых солей в сингенетических ПЖЛ в едомных отложениях Зеленого Мыса:

1 – HCO_3^- ; 2 – Cl^- ; 3 – SO_4^{2-} ; 4 – Mg^{2+} ; 5 – Ca^{2+} ; 6 – $\text{Na}^+ + \text{K}^+$; 7 – сухой остаток.

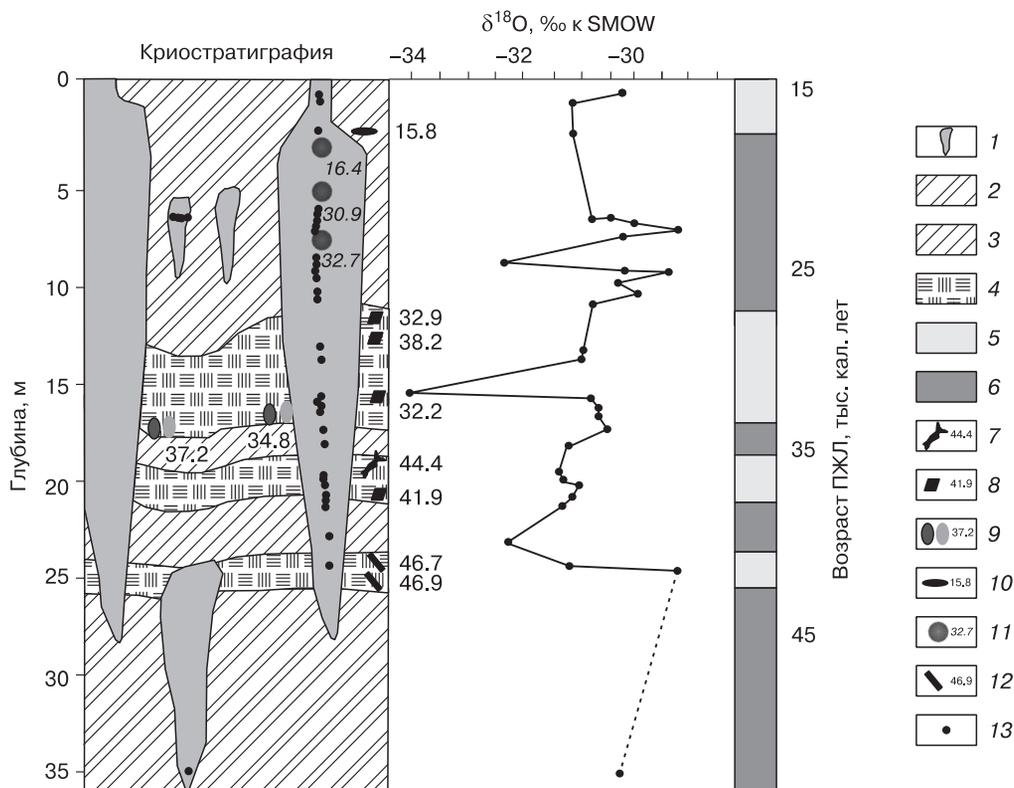


Рис. 5. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ из едомной толщи Зеленого Мыса.

1 – лед повторно-жильный; 2 – супесь серая, мерзлая со среднеслойной и сетчатой, средне- и тонкошлывровой криотекстурой; 3 – супесь коричнево-серая, мерзлая с тонкослойной, средне- и тонкошлывровой криотекстурой; 4 – торф мерзлый с косо-слоистыми, решетчатыми криотекстурами; 5 – отложения субаэрального этапа накопления едомы; 6 – отложения субаквального этапа накопления едомы. Калиброванный ^{14}C -возраст: 7 – костей, 8 – торфа, 9 – семян из норок, 10 – почв, 11 – ПЖЛ, 12 – веток. 13 – точки отбора ПЖЛ на изотопный анализ. (Локализация ^{14}C -датировок семян из норок, почв и крупных веток показана условно, так как отбор образцов производился в разные сезоны или не из основной стенки обнажения.)

Таблица 4. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в поздненеоплейстоценовых повторно-жильных (ПЖЛ) и текстурных (текс.) льдах в разрезе Зеленый Мыс, правобережье в низовьях р. Колымы и в современных ростках жил (рост.) на пойме

Номер образца	Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	Вид льда	Номер образца	Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	Вид льда
<i>Сингенетические поздненеоплейстоценовые ПЖЛ в едомной толще разреза Зеленый Мыс</i>							
308-YuV/49	0.5	-30.3	ПЖЛ	308-YuV/48	15.5	-34.1	ПЖЛ
308-YuV/50	1.0	-31.3	ПЖЛ	308-YuV/5	15.6	-30.9	ПЖЛ
308-YuV/51	2.0	-31.3	ПЖЛ	308-YuV/6	15.7	-30.7	ПЖЛ
308-YuV/54	7.0	-30.9	ПЖЛ	308-YuV/7	16.3	-30.7	ПЖЛ
341-YuV/51	7.0	-30.5	ПЖЛ	308-YuV/8	17.0	-30.6	ПЖЛ
341-YuV/52	7.0	-30.0	ПЖЛ	308-YuV/9	17.6	-31.2	ПЖЛ
341-YuV/53	7.0	-29.1	ПЖЛ	308-YuV/10	18.3	-31.5	ПЖЛ
341-YuV/54	7.0	-30.2	ПЖЛ	308-YuV/37	18.7	-31.4	ПЖЛ
308-YuV/55	8.0	-32.8	ПЖЛ	308-YuV/12	19.7	-31.1	ПЖЛ
308-YuV/56	8.5	-30.3	ПЖЛ	308-YuV/13	20.6	-31.4	ПЖЛ
308-YuV/40	9.5	-29.4	ПЖЛ	308-YuV/14	21.5	-31.6	ПЖЛ
308-YuV/41	9.8	-30.4	ПЖЛ	308-YuV/16	23.5	-32.4	ПЖЛ
308-YuV/42	10.2	-29.9	ПЖЛ	308-YuV/17	24.3	-31.3	ПЖЛ
308-YuV/43	11.6	-30.7	ПЖЛ	308-YuV/18	24.9	-29.2	ПЖЛ
308-YuV/44	13.4	-31.0	ПЖЛ	341-YuV/40	35.0	-30.2	ПЖЛ
308-YuV/45	14.0	-31.1	ПЖЛ				
<i>Сингенетические текстурные льды в едомной толще разреза Зеленый Мыс</i>							
341-YuV/8	10.0	-30.6	Текс.	341-YuV/1	10.9	-27.0	Текс.
341-YuV/4	10.7	-27.6	Текс.	341-YuV/36	33.2	-29.6	Текс.
<i>Современные жильные ростки, внедряющиеся в голоценовые жилы на пойме Колымы у пос. Зеленый Мыс</i>							
15-ТУа/2	0.7	-25.6	Рост.	15-ТУа/3	0.8	-25.4	Рост.
<i>Современные жильные ростки, внедряющиеся в голоценовые жилы на пойме на протоке Амболиха, вблизи пос. Черский</i>							
9-ТУа/1	0.4	-23.0	Рост.	7-ТУа/1а	0.5	-24.0	Рост.
7-ТУа/1	0.5	-24.1	Рост.	8-ТУа/1	0.5	-26.1	Рост.

Изотопно-кислородный состав повторно-жильных льдов. На изотопно-кислородных диаграммах по мощным жилам (рис. 5) отмечен сравнительно большой интервал значений $\delta^{18}\text{O}$ (от -34.1 до -29.4 ‰). Данные по погребенным жилкам, располагающимся на глубине 7 м, лежат в пределах диапазона -30.5...-29.1 ‰ (табл. 4, точка 341-YuV).

Текстурные льды во вмещающих породах изотопически немного тяжелее жильных, в них значения $\delta^{18}\text{O}$ изменяются от -30.6 до -27.0 ‰ [Васильчук, 1992]. Такое соотношение изотопных характеристик не противоречит гипотезе об озерном происхождении этой едомной толщи на склоне долины р. Колымы.

В современных жилках на пойме р. Колымы в районе пос. Зеленый Мыс величина $\delta^{18}\text{O}$ варьирует от -26.1 до -23.0 ‰, а в текстурных льдах пойменного аллювия значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют -23.0...-19.1 ‰, т. е. плейстоценовые жилы легче современных почти на 8 ‰, а текстурные льды, как правило, легче на 4–5 ‰.

ДИСКУССИЯ

Радиоуглеродный возраст едомных отложений и повторно-жильных льдов. Судя по совокупности ^{14}C -датировок, общий период формирования едомных толщ Зеленого Мыса длился около 33 тыс. лет (от 48 до 15 тыс. кал. лет). Нижний предел формирования едомной толщи зафиксирован тремя датировками по крупным веткам и костям мамонтовой фауны (см. табл. 1), а верхний предел определен ^{14}C -датировкой из погребенной почвы, отобранной А. Пфедфер вблизи кровли ММП, 15.7 тыс. кал. лет (см. табл. 1) и AMS-датировкой, полученной непосредственно из ПЖЛ, 16.4 тыс. кал. лет (см. табл. 2).

Для сильноотторфованных прослоев едомы, вскрытых в 8 м над рекой на правом берегу Колымы, в районе пос. Черского, А.В. Ложкиным [1977] были получены даты 35.2, 28.2 и 27.2 тыс. лет (или после калибровки: 39.8, 32.1 и 31.1 тыс. кал. лет назад), которые хорошо согласуются с хронологией авторов.

Для корректного датирования также важны данные по запасам семян в ископаемых норках сусликов, поскольку датировки по ним получены по заведомо синхронному органическому материалу. Подобные находки свидетельствуют в циклическом переменном субаквально-субаэральном генезисе сингенетических полигонально-жильных комплексов. Датировки из норок едомы Зеленого Мыса 37.2 и 38.4 тыс. кал. лет [Zanina, 2005] указывают на субаэральную фазу развития полигонального массива, когда ледяные жилы активно росли в ширину.

Исходя из модели циклически пульсирующего процесса сингенетического формирования мощных ледяных жил [Васильчук, 1999], можно оценить соотношение длительности времени субаквальных и субаэральных условий, т. е. периодов, когда накапливались прослой супеси, лишенной примесей органического материала и периодов накопления торфа или формирования почвенных горизонтов (см. рис. 5). При этом в субаэральных условиях жилы расширялись, а на стадии субаквального осадконакопления рост жил замедлялся или прекращался, о чем свидетельствуют погребенные мелкие жилы, головы которых залегают на уровне нижнего прослоя торфа на глубине 25 м и такие же небольшие жилы, головы которых залегают на уровне почвенного горизонта на глубине 3 м. Оценивая ряд ^{14}C -датировок, отметим, что в основании разреза едомы нередко встречаются ветки крупных кустарников, датируемые по ^{14}C в интервале 49–45 тыс. кал. лет, а также растительные остатки и кости, датировки которых выходят за рамки радиоуглеродного метода. Вышезалегающий прослой торфа, хронологически фиксирующий субаэральную фазу, датируется в интервале 44.4–41.9 тыс. кал. лет. Очевидно, что слой серо-коричневой супеси накопился достаточно быстро, что характерно для субаквальной фазы. Следующую субаэральную фазу можно выделить не только по датировкам корешков, намывтых из слоя с высокой концентрацией органики (38.2 тыс. кал. лет), но и по датировкам семян из норок сусликов (34.8 и 37.3 тыс. кал. лет). Третий выраженный прослой органики (фиксирующий следующую субаэральную фазу) датирован по корешкам 32.2 и 32.9 тыс. кал. лет. С этими данными хорошо согласуются результаты датирования разреза едомы Станчиковского Яра [Губин, Занина, 2013], расположенного также на правом берегу Колымы недалеко от разреза Зеленый Мыс. Здесь выделяется три слоя с повышенным содержанием растительных остатков. Самый нижний слой датируется 49.9–41.8 тыс. кал. лет; средний слой – от 41.7 до 38.3 тыс. кал. лет; верхний слой с высоким содержанием органики датирован в интервале 32.2–31.5 тыс. кал. лет.

Можно сказать, что за период накопления едомных отложений Зеленого Мыса и Станчиковского Яра отмечались по меньшей мере три субаэральные фазы, которые длились по 2–3 тыс. лет. Отложения субаквальных фаз явно преобладают, но это связано не с длительностью осадконакопления, а с большей его интенсивностью, т. е. в течение субаквальной фазы то же самое количество отложений накапливается в 2–3 раза быстрее, чем на субаэральной фазе развития.

Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ в период формирования едомы. Характерной особенностью изотопной диаграммы ПЖЛ Зеленого Мыса являются экстремально низкие величины $\delta^{18}\text{O}$, особенно в нижних частях жил (см. рис. 5), которые, вероятно, свидетельствуют о чрезвычайно суровых (даже на фоне достаточно холодных зим позднего неоплейстоцена) зимних условиях в этом регионе.

Изотопный состав ПЖЛ на уровне нижнего прослоя торфа характеризуется значениями $\delta^{18}\text{O}$ от -31.3 до -29.2 ‰. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ на глубине 16–17 м на уровне среднего прослоя варьируют незначительно – от -31.2 до -30.7 ‰; на глубине 15.5 м отмечены минимальные по разрезу значения -34.1 ‰; на глубине 8 м также наблюдается локальный минимум -32.8 ‰. Таким образом, можно выделить три цикла в изменении изотопного состава повторно-жильных льдов, когда после увеличения значений $\delta^{18}\text{O}$ (до -29 и -30 ‰) отмечается их резкое падение (до -32 ‰ или даже до -34 ‰), что свидетельствует о существенном зимнем похолодании: 46–41 и 38–32 тыс. кал. лет назад, время третьего цикла можно определить лишь косвенно, примерно 24–22 тыс. кал. лет назад.

В 2005 г. Д.В. Михалевым с коллегами [Михалев и др., 2012] выполнено опробование оставшейся незакрытой верхней 8-метровой части едомы Зеленого Мыса и получены значения $\delta^{18}\text{O}$ от -32.5 до -31.2 ‰ (близкие к полученным нами в верхней части) и $\delta^{2}\text{H}$ от -248.5 до -240.2 ‰.

В пределах пос. Черский на правом берегу в низовьях реки Колымы (68.7592° с.ш., 161.3325° в.д.) Ю.К. Васильчуком и Н.А. Буданцевой [2018] исследован останец едомной толщи, сохранившийся на окраине поселка, в 300 м ниже пристани. Здесь едомная вкладка входит в доплейстоценовые скальные породы. Отложения представлены тяжелой темно-серой супесью с незначительным содержанием органики. Высота обнажения 20–25 м. На глубине 1.0–1.5 м вскрыты ледяные жилы. Возраст ПЖЛ может быть приблизительно установлен с учетом радиоуглеродных данных, полученных по сборам В.Г. Миллера (как он описывает, из 10–15-метровой террасы правого берега р. Колымы). Здесь получены две

Таблица 5. Среднеянварские (t_j) палеотемпературы на северо-западе Якутии, во временном интервале 47–12 тыс. кал. лет назад, реконструированные по изотопно-кислородному составу ($\delta^{18}\text{O}_{\text{IW}}$) повторно-жильных льдов

Пункт	Координаты	$\delta^{18}\text{O}_{\text{IW}}$, ‰		t_j , °C		Источник
		палео.	соврем.	палео.	соврем.	
1	2	3	4	5	6	7
47–42 тыс. кал. лет назад						
Зеленый Мыс	68.7875° с.ш., 161.3806° в.д.	-30.2	-25.5	-45	-36	Настоящая работа
Дуванный Яр	68.6000° с.ш., 159.1000° в.д.	-31.9	-25.1	-48	-35	[Vasil'chuk et al., 2001]
О. Котельный	74.2778° с.ш., 147.6059° в.д.	-29.5	-18.0	-44	-29	[Васильчук и др., 2019]
Ойягосский Яр	72.6775° с.ш., 143.5550° в.д.	-29.5	-24.4	-44	-30.4	[Opel et al., 2017]
О. Бол. Ляховский	73.3333° с.ш., 141.6667° в.д.	-30.0	-20.4	-45	-31	[Meyer et al., 2002]
Мамонтова Хаята	71.7695° с.ш., 129.4547° в.д.	-30.2	-23.0	-45	-31	[Meyer et al., 2002; Wetterich et al., 2011]
О. Курунгнах	72.3282° с.ш., 126.2843° в.д.	-31.8	-24.6	-48	-34.3	[Schirmeister et al., 2003]
Кулар	70.6333° с.ш., 131.8833° в.д.	-31.0	-25.0	-46	-37	[Васильчук, Васильчук, 2020]
37–32 тыс. кал. лет назад						
Зеленый Мыс	68.7875° с.ш., 161.3806° в.д.	-33.0	-25.5	-49	-36	Настоящая работа
Дуванный Яр	68.6000° с.ш., 159.1000° в.д.	-32.0	-25.1	-48	-35	[Vasil'chuk et al., 2001]
Бизон	68.6250° с.ш., 159.2894° в.д.	-32.0	-26.0	-48	-35	[Vasil'chuk et al., 2003]
О. Котельный	74.2778° с.ш., 147.6059° в.д.	-29.0	-18.0	-43	-29	[Васильчук и др., 2019]
Мамонтова Хаята	71.7695° с.ш., 129.4546° в.д.	-31.0	-23.0	-46	-33	[Meyer et al., 2002]
30–25 тыс. кал. лет назад						
Зеленый Мыс	68.7875° с.ш., 161.3806° в.д.	-30.2	-25.5	-45	-36	Настоящая работа
Дуванный Яр	68.6000° с.ш., 159.1000° в.д.	-31.9	-25.1	-48	-35	[Vasil'chuk et al., 2001]
Бизон	68.6250° с.ш., 159.2894° в.д.	-33.0	-26.0	-49	-35	[Vasil'chuk et al., 2003]
Плахинский Яр	68.6788° с.ш., 160.2852° в.д.	-34.8	-25.8	-51	-35	[Васильчук, Васильчук, 2018]
О. Котельный	74.2778° с.ш., 147.6059° в.д.	-29.0	-18.0	-43	-29	[Васильчук и др., 2019]
Мамонтов Клык	73.6072° с.ш., 117.1250° в.д.	-30.0	-21.3	-45	-33	[Schirmeister et al., 2008]
Мамонтова Хаята	71.7695° с.ш., 129.4546° в.д.	-31.0	-23.0	-46	-33	[Meyer et al., 2002]
Буор-Хая	72.3333° с.ш., 126.2833° в.д.	-31.0	-23.0	-45	-34	[Schirmeister et al., 2003]
Кулар	70.6333° с.ш., 131.8833° в.д.	-32.0	-26.0	-47	-37	[Васильчук, Васильчук, 2020]
24–22 тыс. кал. лет назад						
Зеленый Мыс	68.7875° с.ш., 161.3806° в.д.	-30.4	-25.5	-45	-36	Настоящая работа

1	2	3	4	5	6	7
Дуванный Яр	68.6000° с.ш., 159.1000° в.д.	-32.2	-25.1	-48	-35	[Vasil'chuk et al., 2001]
Плахинский Яр	68.6788° с.ш., 160.2852° в.д.	-31.6	-25.8	-47	-35	[Васильчук, Васильчук, 2018]
О. Котельный	74.2778° с.ш., 147.6059° в.д.	-25.0	-18.0	-37	-29	[Васильчук и др., 2019]
Мамонтова Хаята	71.7695° с.ш., 129.4546° в.д.	-29.5	-23.0	-44	-33	[Meyer et al., 2002]
20–18 тыс. кал. лет назад						
Зеленый Мыс	68.7875° с.ш., 161.3806° в.д.	-31.6	-25.5	-47	-36	Настоящая работа
Дуванный Яр	68.6000° с.ш., 159.1000° в.д.	-30.5	-25.1	-46	-35	[Vasil'chuk et al., 2001]
Плахинский Яр	68.6788° с.ш., 160.2852° в.д.	-32.0	-25.8	-48	-35	[Васильчук, Васильчук, 2018]
О. Котельный	74.2778° с.ш., 147.6059° в.д.	-25.0	-18.0	-37	-29	[Васильчук и др., 2019]
16–12 тыс. кал. лет назад						
Зеленый Мыс	68.7875° с.ш., 161.3806° в.д.	-30.7	-25.5	-45	-36	Настоящая работа
Дуванный Яр	68.6000° с.ш., 159.1000° в.д.	-31.0	-25.1	-46	-35	[Vasil'chuk et al., 2001]
Плахинский Яр	68.6788° с.ш., 160.2852° в.д.	-31.0	-25.8	-46	-35	[Васильчук, Васильчук, 2018]

П р и м е ч а н и е. Экстремально низкие значения для каждого периода выделены жирным шрифтом.

даты: $33\,900 \pm 500$ лет (RI-111) по торфу, плохо разложившемуся с травянистыми включениями, и ниже по разрезу – $38\,700 \pm 700$ лет (RI-115) по торфу, плохо разложившемуся [Векслер, Преде, 1985]. Повторно-жильные льды сравнительно узкие, шириной во фронтальном срезе не более 1 м. Во льду одной из наиболее хорошо вскрытых жил в интервале глубин от 1.5 до 4.0 м проанализирована динамика величин $\delta^{18}\text{O}$. Пересчет по формуле Ю.К. Васильчука позволяет говорить, что в районе пос. Черского в конце плейстоцена средняя температура воздуха наиболее холодного зимнего месяца (января или февраля) изменялась от -47 до -49 °С (табл. 5).

Реконструкция среднеянварской температуры в период формирования едомы. Авторами выполнены реконструкции среднеянварской температуры по разрезам низовий р. Колымы. Реконструкции среднеянварской (t_j) температуры получены на основании сравнения изотопного состава современных жильных ростков (ice veinlets) ($\delta^{18}\text{O}_{\text{IV}}$) и современной среднеянварской температуры для периода формирования жильных ростков, т. е. последних 60–100 лет [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, 1991]. В результате этого сравнения получено уравнение

$$t_j = 1.5 \cdot \delta^{18}\text{O}_{\text{IV}} (\pm 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

Диапазон ± 3 °С указывает на средний диапазон вариаций реконструируемой температуры в пределах анализируемого временного интервала.

По приведенным уравнениям рассчитана среднеянварская температура воздуха позднего неоплейстоцена (48–15 тыс. кал. лет назад) для отдельных периодов в опорных разрезах, изученных в низовьях р. Колымы (см. табл. 5).

Для периода 47–42 тыс. кал. лет назад наиболее низкая температура января отмечается для района Дуванного Яра -48 °С, столь же низких значений в этот период среднеянварская температура достигала на о. Курунгнах. Как следует из результатов опробования ПЖЛ в едоме Зеленого Мыса, на этом участке долины Колымы среднеянварская температура не поднималась выше -45 °С (см. табл. 5). Позже, в интервале 37–32 тыс. кал. лет назад, в районе Зеленого Мыса среднеянварская температура снизилась до -49 °С, в то время как на более северных территориях, например на о. Котельном, среднеянварская температура в этот период не превышала -43 °С. В интервале 30–25 тыс. кал. лет назад среднеянварская температура в районе Зеленого Мыса составляла -45 °С, а в районе Плахинского Яра снижалась до -51 °С. В период 24–22 тыс. кал. лет назад среднеянварская температура в долине Колымы по сравнению с предыдущим интервалом не изменилась: в райо-

не Зеленого Мыса -45°C и в районе Дуванного Яра -48°C (см. табл. 5). В долине р. Колымы 20–18 тыс. кал. лет назад наиболее низкие среднеянварские температуры отмечены для района Плахинского Яра -48°C , в районе Дуванного Яра они чуть выше -46°C , а в районе Зеленого Мыса -47°C , т. е. это не самые низкие температуры. Для о. Котельный реконструированная среднеянварская температура заметно выше и равна -37°C . В период 16–12 тыс. кал. лет назад среднеянварская температура в долине Колымы оставалась низкой в районе Зеленого Мыса (-45°C) и в районе Дуванного Яра и Плахинского Яра (-46°C).

Изотопные данные показывают, что среднеянварские температуры в наиболее холодные эпохи были на $12\text{--}15^{\circ}\text{C}$ ниже современных и колебались от -48 до -51°C , а в более умеренные отрезки времени – от -40 до -45°C .

ВЫВОДЫ

Подтверждено циклическое строение толщи едомы Зеленого Мыса и циклическое изменение условий формирования ПЖЛ, выделены субаквальные и субаэральные этапы накопления едомных отложений и ПЖЛ.

В обнажении Зеленого Мыса в низовьях р. Колымы развиты позднеплейстоценовые трех-, двухъярусные широкие повторно-жильные льды и погребенные узкие ледяные жилы, фиксирующие отдельные этапы формирования едомного комплекса.

Установлен календарный возраст едомы Зеленого Мыса: начало накопления едомной толщи датируется 48 тыс. кал. лет назад, завершение – 15 тыс. кал. лет назад.

В разрезе Зеленый Мыс выделены три цикла в динамике изотопного состава повторно-жильных льдов: 46–41, 37–32 и примерно 24–22 тыс. кал. лет назад.

Данные сопоставления с изотопным составом жил в опорных разрезах едомных толщ Плахинского Яра, Дуванного Яра, Станчиковского Яра, Черского и других позволяют сделать вывод о существенно более суровых, чем современные, зимах, господствовавших в низовьях Колымы в конце позднеплейстоценового криохрона.

Наиболее низкая среднеянварская температура воздуха (на 15°C ниже современной) в низовьях Колымы получена авторами для периода от 37 до 25 тыс. кал. лет назад, что соответствует снижению температуры в глобальном масштабе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-05-60272. Арктика, изотопные определения и анализ изотопных и радиоуглеродных данных), РФФ (грант 19-17-00126, обобщение результатов).

Литература

- Васильчук Ю.К.** Изотопно-кислородный состав повторно-жильных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций): В 2 т. М., Отдел теор. проблем РАН, МГУ, ПНИИИС, 1992, т. 1, 420 с.; т. 2, 264 с.
- Васильчук Ю.К.** Модель циклически-пульсирующего формирования сингенетических толщ с мощными повторно-жильными льдами // Криосфера Земли, 1999, т. III, № 2, с. 3–12.
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А.** Стабильные изотопы кислорода в новых разрезах едомных и голоценовых отложений поселка Черский, низовья реки Колымы // Арктика и Антарктика, 2018, № 3, с. 95–106, DOI: 10.7256/2453-8922.2018.3.27600.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К.** Зимние палеотемпературы воздуха в низовьях Колымы 30–12 тысяч лет назад по результатам изучения изотопного состава едомы Плахинского Яра // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 5, с. 3–19.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К.** Изотопно-геохимический состав повторно-жильных льдов склоновой едомы хребта Кулар и реконструкция среднеянварской палеотемпературы воздуха 47–25 тысяч лет назад // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 3, с. 25–37.
- Васильчук Ю.К., Макеев В.М., Маслаков А.А. и др.** Реконструкция позднеплейстоценовых и раннеголоценовых зимних температур воздуха на острове Котельный по изотопному составу повторно-жильных льдов // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 2, с. 13–28.
- Векслер В.С., Преде Э.И.** Радиоуглеродные датировки лаборатории аналитических исследований морских грунтов Всесоюзного морского научно-производственного объединения “Союзморинжгеология”. Сообщение IV // Бюл. Комиссии по изучению четвертичного периода. М., Наука, 1985, вып. 54, с. 131–133.
- Губин С.В., Занина О.Г.** Изменение почвенного покрова в ходе формирования отложений ледового комплекса на Колымской низменности (Часть 1) // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 4, с. 48–56.
- Губин С.В., Лупачев А.В.** Почвообразование и подстилающая мерзлота // Почвоведение, 2008, № 6, с. 655–667.
- Занина О.Г., Лопатина Д.А.** Возможности реконструкции состава растительных ассоциаций низовьев реки Колымы с помощью сопряженного (палинологического, фитолитного) и карпологиического анализа // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 3, с. 13–23.
- Кожевников Ю.П.** Ботанико-географические наблюдения на Колыме в районах среднего течения р. Березовка и поселка Черский // Биология и экология растений бассейна Колымы. Владивосток, ДВНЦ АН СССР, 1981, с. 99–117.
- Ложкин А.В.** Радиоуглеродные датировки верхнеплейстоценовых отложений Новосибирских островов и возраст едомной свиты Северо-Востока СССР // Докл. АН СССР, 1977, т. 235, № 2, с. 435–437.
- Михалев Д.В., Николаев В.И., Романенко Ф.А.** Реконструкция условий формирования подземных льдов Колымской низменности в позднем плейстоцене–голоцене // Вестн. МГУ. Сер. 5. География, 2012, № 5, с. 35–42.
- Мурзин Ю.А., Торговкин Я.И.** Новое обнажение ледового комплекса в низовьях долины р. Колымы // Криогенные процессы и явления в Сибири. Якутск, Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО АН СССР, 1984, с. 119–127.
- Bronk Ramsey C.** Bayesian analysis of radiocarbon dates // Radiocarbon, 2009, vol. 51, iss. 1, p. 337–360.

Davydov S.P., Fyodorov-Davydov D.G., Neff J.C. et al. Changes in active layer thickness and seasonal fluxes of dissolved organic carbon as a possible baseline for permafrost monitoring // Proc. of the Ninth Intern. Conf. on Permafrost, 2008, vol. 2, p. 333–336.

Fyodorov-Davydov D.G., Sorokovikov V.A., Ostroumov V.E. et al. Spatial and temporal observations of seasonal thaw in the Northern Kolyma lowland // Polar Geography, 2004, vol. 28, iss. 4, p. 308–325.

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, Bd. 70, S. 37–51.

Opel T., Wetterich S., Meyer H. et al. 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, p. 587–611.

Reimer P.J., Bard E., Bayliss A. et al. IntCal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50 000 years cal BP // Radiocarbon, 2013, vol. 55, p. 1869–1887.

Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G. et al. Thermal state of permafrost in Russia // Permafrost and Periglacial Processes, 2010, vol. 21, p. 136–155.

Schirrneister L., Grosse G., Schwamborn G. et al. Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): a multidisciplinary approach // Polar Geography, 2003, vol. 27, No. 4, p. 277–319.

Schirrneister L., Grosse G., Kunitsky V. et al. Periglacial landscape evolution and environmental changes of Arctic lowland areas for the last 60 000 years (western Laptev Sea coast, Cape Mamontov Klyk) // Polar Research, 2008, vol. 27, p. 249–272.

Vasil'chuk Yu.K. Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone // Water Resources, 1991, vol. 17, No. 6, p. 640–647.

Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., van der Plicht J. et al. Radiocarbon dating of the Late Pleistocene ice wedges in the Bison section in the lower reaches of the Kolyma River // Doklady Earth Sci., 2001, vol. 379, No. 5, p. 589–593.

Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Kim J.-C. The AMS radiocarbon dating of pollen concentrate from the Late Pleistocene ice wedges of the Bison section, Kolyma Region // Doklady Earth Sci., 2003, vol. 393, No. 8, p. 1141–1145.

Vasil'chuk Yu.K., Yesikov A.D., Oprunenko Yu.F. et al. New data of stable oxygen isotopes composition in syngenetic Late Pleistocene ice wedge of the lower Kolyma River // Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections. Published by Scripta Technica, Inc. A Wiley Company. New York, 1985, vol. 281, No. 2, p. 91–94.

Wetterich S., Rudaya N., Tumskey V. et al. Last Glacial Maximum records in permafrost of the East Siberian Arctic // Quaternary Sci. Rev., 2011, vol. 30, p. 3139–3151. – <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.07.020>

Zanina O.G. Fossil rodent burrows in frozen Late Pleistocene beds of the Kolyma Lowland // Entomological Rev., 2005, vol. 85, suppl. 1, p. S133–S140.

URL: www.pogoda.klimat.ru (дата обращения: 28.06.2020).

References

Vasil'chuk Yu.K. Izotopno-kislorodnyi sostav povtorno-zhil'nykh l'dov (opyt paleogeocriologicheskikh rekonstruktsii) [Oxygen Isotope Composition of Ground Ice (Application to

Paleogeocryological Reconstructions)]. Moscow, Theor. Probl. Dept., RAS, Moscow University, Research Institute of Engineering for Construction (PNIIS), 1992, Book 1, 420 p.; Book 2, 264 p. (in Russian).

Vasil'chuk Yu.K. The model of cyclic-pulsing formation of syngenetic permafrost thickness with large ice-wedges. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 1999, vol. III, No. 2, p. 50–61 (in Russian).

Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A. Stable oxygen isotopes in new sections of the yedoma and Holocene sediments of the Chersky town, the lower Kolyma River. Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic], 2018, No. 3, p. 95–106 (in Russian).

Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. Winter air paleotemperatures at 30–12 Kyr BP in the lower Kolyma River, Plakhinskii Yar yedoma: evidence from stable isotopes. Earth's Cryosphere, 2018, vol. XXII, No. 5, p. 3–16.

Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. Isotope-geochemical composition of the ice wedges in the slope yedoma on the Kular Ridge and reconstruction of the mean January air paleotemperature during 47,000–25,000 BP. Earth's Cryosphere, 2020, vol. XXIV, No. 3, p. 22–33.

Vasil'chuk Yu.K., Makeev V.M., Maslakov A.A. et al. Late Pleistocene and Early Holocene winter air temperatures in Kotelny Island: reconstructions using stable isotopes of ice wedges. Earth's Cryosphere, 2019, vol. XXIII, No. 2, p. 12–24.

Veksler V.S., Prede E.I. Radiocarbon datings made at the laboratory of marine soil analytical studies of VMNPO "Soyuzmorinzheologiya", report IV. Byulleten Komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda [Commission for Study of the Quaternary Bulletin]. Moscow, Nauka, 1985, iss. 54, p. 131–133 (in Russian).

Gubin S.V., Zanina O.G. Variation of soil cover during the ice complex deposit formation, Kolyma lowland (Part 1). Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2013, vol. XVII, No. 4, p. 48–56 (in Russian).

Gubin S.V., Lupachev A.V. Soil formation and the underlying permafrost. Pochvovedeniye [Eurasian Soil Science], 2008, vol. 41, p. 574–585.

Zanina O.G., Lopatina D.A. The possibilities of reconstructing the composition of vegetation communities on the basis of conjugated palynological, phytolith and carpological analyses for lower course area of the Kolyma River. Earth's Cryosphere, 2017, vol. XXI, No. 3, p. 12–22.

Kozhevnikov Yu.P. Botanical-geographical observations in the Kolyma in areas of the middle Berezovka River and Chersky town. In: Biologiya i ekologiya rastenii basseina Kolymy [Biology and ecology of plants in the Kolyma basin]. Vladivostok, DVNTS, 1981, p. 99–117 (in Russian).

Lozhkin A.V. Radiocarbon dates of the Upper Pleistocene deposits on Novosibirsk Islands and the age of the yedoma suite of the North-Eastern USSR. Doklady Akademii Nauk SSSR, 1977, vol. 235, No. 2, p. 435–437.

Mikhalev D.V., Nikolayev V.I., Romanenko F.A. Reconstruction of the conditions of underground ice formation within the Kolyma Lowland during the Late Pleistocene–Holocene using the results of isotope investigations. Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seria 5, Geografia, 2012, No. 5, p. 35–42.

Murzin Yu.A., Torgovkin Ya.I. New outcrop of the ice complex in the lower Kolyma river valley. In: Kriogennye protsessy iyavleniya v Sibiri [Cryogenic Processes and Phenomena in Siberia]. Yakutsk, Izd-vo Instituta Merzlotovedeniya SO RAN, 1984, p. 119–127 (in Russian).

Bronk Ramsey C. Bayesian analysis of radiocarbon dates. Radiocarbon, 2009, vol. 51, iss. 1, p. 337–360.

- Davydov S.P., Fyodorov-Davydov D.G., Neff J.C. et al. Changes in active layer thickness and seasonal fluxes of dissolved organic carbon as a possible baseline for permafrost monitoring. In: Proceedings of Ninth International Conference on Permafrost, 2008, vol. 2, p. 333–336.
- Fyodorov-Davydov D.G., Sorokovikov V.A., Ostroumov V.E. et al. Spatial and temporal observations of seasonal thaw in the Northern Kolyma Lowland. *Polar Geography*, 2004, vol. 28, iss. 4, p. 308–325.
- 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, Bd. 70, S. 37–51.
- Opel T., Wetterich S., Meyer H. et al. 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, p. 587–611.
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A. et al. IntCal13 and marine13 radiocarbon age calibration curves 0–50 000 years cal BP. *Radiocarbon*, 2013, vol. 55, p. 1869–1887.
- Romanovsky V.E., Drozdov D.S., Oberman N.G. et al. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, vol. 21, p. 136–155.
- Schirrmeister L., Grosse G., Schwamborn G. et al. Late Quaternary history of the accumulation plain north of the Chekanovsky Ridge (Lena Delta, Russia): a multidisciplinary approach. *Polar Geography*, 2003, vol. 27, No. 4, p. 277–319.
- Schirrmeister L., Grosse G., Kunitsky V. et al. Periglacial landscape evolution and environmental changes of Arctic lowland areas for the last 60 000 years (western Laptev Sea coast, Cape Mamontov Klyk). *Polar Research*, 2008, vol. 27, p. 249–272, DOI: 10.1111/j.1751-8369.2008.00067.x.
- Vasil'chuk Yu.K. Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone. *Water Resources*, 1991, vol. 17, No. 6, p. 640–647.
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., van der Plicht J. et al. Radiocarbon dating of the Late Pleistocene ice wedges in the Bison section in the lower reaches of the Kolyma River. *Doklady Earth Sci.*, 2001, vol. 379, No. 5, p. 589–593.
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Kim J.C. The AMS radiocarbon dating of pollen concentrate from the Late Pleistocene ice wedges of the Bison section, Kolyma Region. *Doklady Earth Sciences*, 2003, vol. 393, No. 8, p. 1141–1145.
- Vasil'chuk Yu.K., Yesikov A.D., Oprunenko Yu.F. et al. New data of stable oxygen isotopes composition in syngenetic Late Pleistocene ice wedge of the lower Kolyma River. In: Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Sections. Published by Scripta Technica, Inc. A Wiley Company. New York, 1985, vol. 281, No. 2, p. 91–94.
- Wetterich S., Rudaya N., Tumskey V. et al. Last Glacial Maximum records in permafrost of the East Siberian Arctic. *Quaternary Science Reviews*, 2011, vol. 30, p. 3139–3151. – <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.07.020>
- Zanina O.G. Fossil rodent burrows in frozen Late Pleistocene beds of the Kolyma Lowland. *Entomological Review*, 2005, vol. 85, suppl. 1, p. S133–S140.
- URL: www.pogoda.klimat.ru (last visited: 28.06.2020).

*Поступила в редакцию 27 мая 2020 г.,
после доработки – 30 ноября 2020 г.,
принята к публикации 23 декабря 2020 г.*