

ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ СКЛОНОВОЙ ЕДОМЫ ХРЕБТА КУЛАР И РЕКОНСТРУКЦИЯ СРЕДНЕЯНВАРСКОЙ ПАЛЕОТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА 47–25 ТЫСЯЧ ЛЕТ НАЗАД

Ю.К. Васильчук, А.К. Васильчук

*Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический и геологический ф-ты,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия
Тюменский государственный университет,
625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия; vasilch_geo@mail.ru*

Исследованы изотопный состав и гидрохимические особенности поздненеоплейстоценовых повторно-жильных льдов в отложениях, вскрытых на пологом склоне хребта Кулар в западной части Яно-Индигирской низменности. Установлено, что вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в повторно-жильных льдах не превышают 1.6 ‰ (от –32.6 до –31.0 ‰). Реконструкция среднезимней и среднеянварской температуры выполнена на основе палеогеокриологических исследований стабильных изотопов кислорода в повторно-жильных льдах. Среднеянварская температура в позднем неоплейстоцене в районе хребта Кулар была на 7 °С ниже современной. При этом наиболее низкая среднезимняя температура, по-видимому, имела место от 37 до 32 тыс. лет назад.

Повторно-жильные льды, поздний неоплейстоцен, палеотемпература, многолетнемерзлые породы, едома, изотопы кислорода, гидрохимия, микроэлементы, Кулар, север Якутии

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

Yu.K. Vasil'chuk, A.C. Vasil'chuk

*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography and Faculty of Geology,
1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen,
625003, Russia; vasilch_geo@mail.ru*

The isotopic composition and hydro chemical properties of the Late Pleistocene ice wedges in the outcrop of flat side of Kular Ridge located in the western part of the Yana-Indigirka Lowland have been analyzed. It has been established that variations of $\delta^{18}\text{O}$ values in Late Pleistocene ice wedges do not exceed 1.6 ‰ (from –32.6 ‰ to –31.0 ‰). The mean winter and mean January temperature reconstructions have been carried out by means of the palaeogeocryological studies of the oxygen stable isotopes contained in ice wedges. In the Kular Ridge area, the mean January temperature in the Late Pleistocene was by 7 °C lower than the-current one. Besides, the lowest mean winter temperature referred to the 37–32 ka BP.

Ice wedges, Late Pleistocene, paleotemperature, permafrost, yedoma, oxygen isotopes, hydrochemistry, trace elements, Kular, Northern Yakutia

ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящего исследования – реконструировать среднеянварскую и среднезимнюю палеотемпературы в позднем неоплейстоцене (47–25 тыс. лет назад) на основе данных, полученных при изучении едомы на пологом склоне хр. Кулар вблизи заброшенного поселка Кулар, а также выявить геохимические особенности, характерные для повторно-жильных льдов (ПЖЛ) и вмещающих их едомных отложений. Для палеотемпературных реконструкций авторам было необходимо проанализировать изотопный и геохимический состав сингенетических ПЖЛ и установить основ-

ные условия формирования едомной толщи и повторно-жильных льдов. Время формирования куларской едомы – от 47 до 25 тыс. кал. лет назад [Васильчук, Васильчук, 2020].

Местоположение и физико-географические особенности участка исследований

Изученный разрез едомной толщи (70°38'32" с.ш., 134°18'78" в.д.) вскрыт в обнажении террасовала на пологом склоне в предгорьях хр. Кулар у пос. Кулар, на правом берегу р. Бургунат, в 0.5 км от устья руч. Эмись (рис. 1). Подроб-

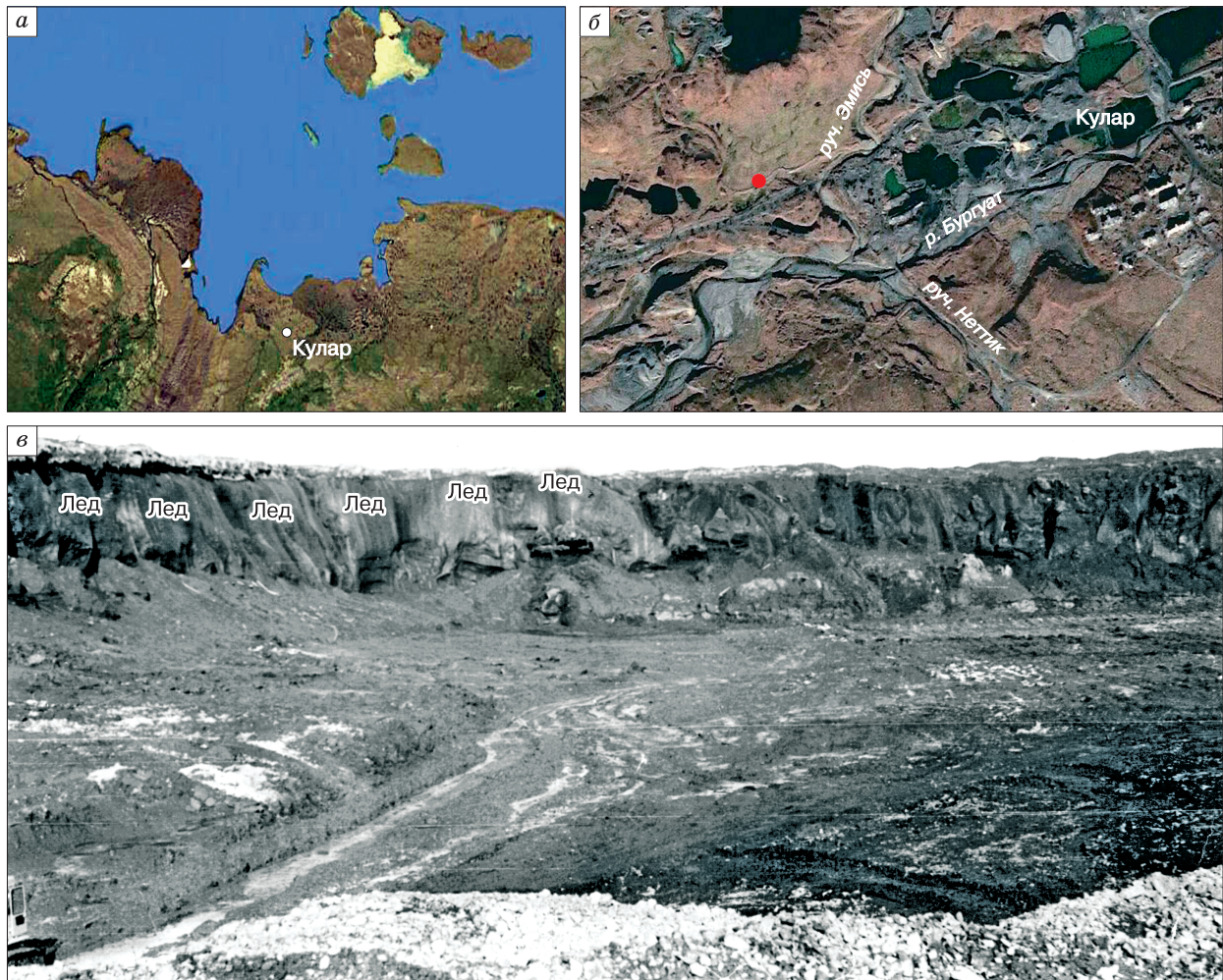


Рис. 1. Местоположение разреза (показано красным кружком) у пос. Кулар (а, б) и общий вид разреза (в).

ное описание разреза приведено в работе [Васильчук, Васильчук, 2020].

На территории исследований господствует арктический климат, средние температуры воздуха в январе ($t_{я}^{\circ}$) достигают $-30...-39^{\circ}\text{C}$, а минимальные $-47...-54^{\circ}\text{C}$ (пос. Казачье). Средние температуры июля составляют $+4...+5^{\circ}\text{C}$ [Справочник..., 1966; <https://ru.climate-data.org/2019>].

Рельеф сформирован в основном склоновыми, озерно-аллювиальными и аллювиальными процессами. Питание водотоков Куларского района осуществляется за счет атмосферных осадков и вод сезонноталого слоя (СТС). Химический состав поверхностных вод, по имеющимся данным [Соловьев и др., 2003], двух типов: либо хлоридно-гидрокарбонатный натриево-кальциевый, либо гидрокарбонатный магниевый-кальциевый, реже встречаются воды смешанного катионного состава. Небольшие водотоки, как правило, характери-

зуются хлоридно-гидрокарбонатным натриево-кальциевым составом.

Глубина сезонного оттаивания мерзлых пород обычно не превышает 50 см, но на склонах южной экспозиции достигает 1 м. Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород находится в пределах от -6 до -8°C . Воды сезонноталого слоя преимущественно нисходящие грунтово-поровые. По степени минерализации они пресные и весьма пресные (минерализация – до 0.1 г/л), по водородному показателю они классифицируются как нейтральные ($\text{pH } 6.0-7.0$), очень мягкие (общая жесткость не превышает 1.0 мг-экв./дм^3). Питание вод СТС осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, в некоторой степени за счет таяния льда, а также процессов конденсации водяных паров порового воздуха. Химическая характеристика вод СТС близка к характеристике небольших ручьев: состав вод ручьев хлоридно-гид-

рокарбонатный натриево-кальциевый с минерализацией от 0.02 до 0.10 г/л (весьма пресные до пресных). По водородному показателю (рН 6.0) воды классифицируются как нейтральные, по степени жесткости (общая жесткость – от 0.3 до 0.1 мг-экв./дм³) как очень мягкие [Соловьев и др., 2003].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В полевых условиях образцы повторно-жильных льдов на изотопный и химический анализы отбирались из осевых частей жил с использованием метода отбора, разработанного Ю.К. Васильчуком [1992], с интервалом 0.2–0.5 м, из основной стенки обнажения. Едомные отложения отбирали из мерзлой стенки обнажения в двойные полиэтиленовые пакеты и в талом состоянии (с сохранением естественной влажности) доставляли в лабораторию для геохимических определений. Сегрегационные льды ледяных линз и текстурообразующих льдов отбирались отдельно. Образцы повторно-жильного и сегрегационного льда плавляли в полиэтиленовых пакетах при температуре не выше 15 °С и переливали в химически инертные пластмассовые флаконы объемом 20 и 500 мл. В образцах выполнены аналитические определения микроэлементного состава (Sr, Mn, Zn, Cu, Fe, Co) методом атомно-абсорбционной спектроскопии в Почвенном институте им. В.В. Докучаева. Изотопный состав повторно-жильных льдов определен в Институте геологии (Таллин). Химический состав водорастворимых солей в едомных поздненеоплейстоценовых отложениях и ПЖЛ определен титрованием в химической лаборатории ПНИИИС.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ И ВМЕЩАЮЩИХ ИХ ОТЛОЖЕНИЙ

Строение едомной толщи

Обнажение едомной толщи вскрыто на пологом склоне (уклон 4–5°) южной экспозиции долины р. Бургуат. Основание едомы располагается на абсолютных отметках 95–120 м, кровли – 105–140 м. Мощность отложений составляет 20–28 м. В основании залегают коренные скальные породы, которые перекрыты щебнистым элювием, выше залегает черный песок (мощностью до 2–3 м) с включениями гравия и слабоокатанной гальки. Еще выше расположена толща серой супеси с суглинком и линзами торфа. Между черным песком и супесью расположен пласт сегрегационного льда мощностью до 1.5 м. В толще супеси отмечены три линзы чистого торфа на глубине 18, 8 и 4 м. Многоярусные и сливающиеся ледяные жилы (рис. 2) пересекают всю супесчаную толщу, их ширина не менее 3 м, расстояние между ними 10–15 м, голо-

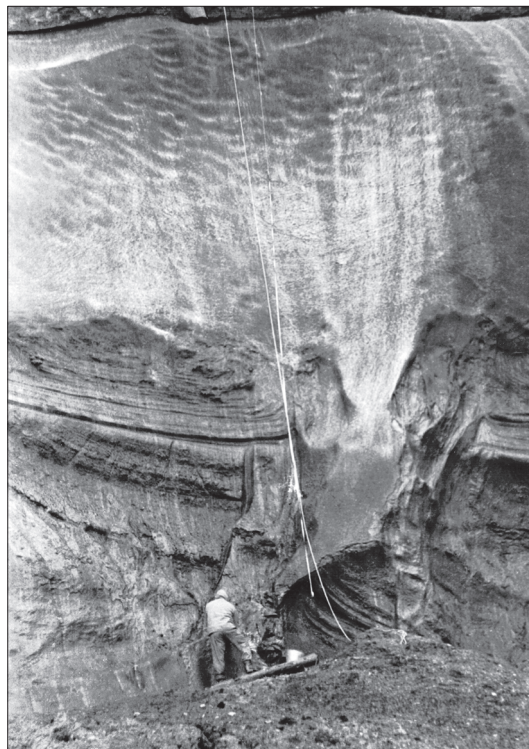


Рис. 2. Мощные повторно-жильные льды в склоновой едомной толще у пос. Кулар.

Фото Ю.К. Васильчука.

вы отдельных жил расположены на разных высотах. Нижний ярус ПЖЛ проникает в коренные породы [Васильчук, Васильчук, 2020].

Отбор образцов на изотопный и гидрохимический анализы производился вдоль осей двух ледяных жил в месте их слияния. Из нижней части разреза образцы отбирались из левой жилы № 1, а в верхней части разреза – из правой ледяной жилы № 2 (рис. 3). Опробованы также сегрегационный лед в линзах и сегрегационный лед шлиров.

Изотопный и химический состав

По образцам из куларской едомы получена полная изотопно-кислородная характеристика: изучены ПЖЛ, а также линзы и шлиры сегрегационных льдов (табл. 1). В ПЖЛ разреза Кулар проанализировано содержание щелочно-земельных металлов – кальция и магния, а также микроэлементов – кобальта, меди, марганца и цинка (табл. 2), содержание макроэлементов природных вод (табл. 3), в едомных отложениях изучено содержание водорастворимых солей (табл. 4).

Изотопный состав текстурообразующего сегрегационного льда шлиров отличается от других едомных разрезов: общий диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$ превысил 13 ‰, хотя чаще значения $\delta^{18}\text{O}$ во льду шлиров в разрезах едомы изменяются в пределах

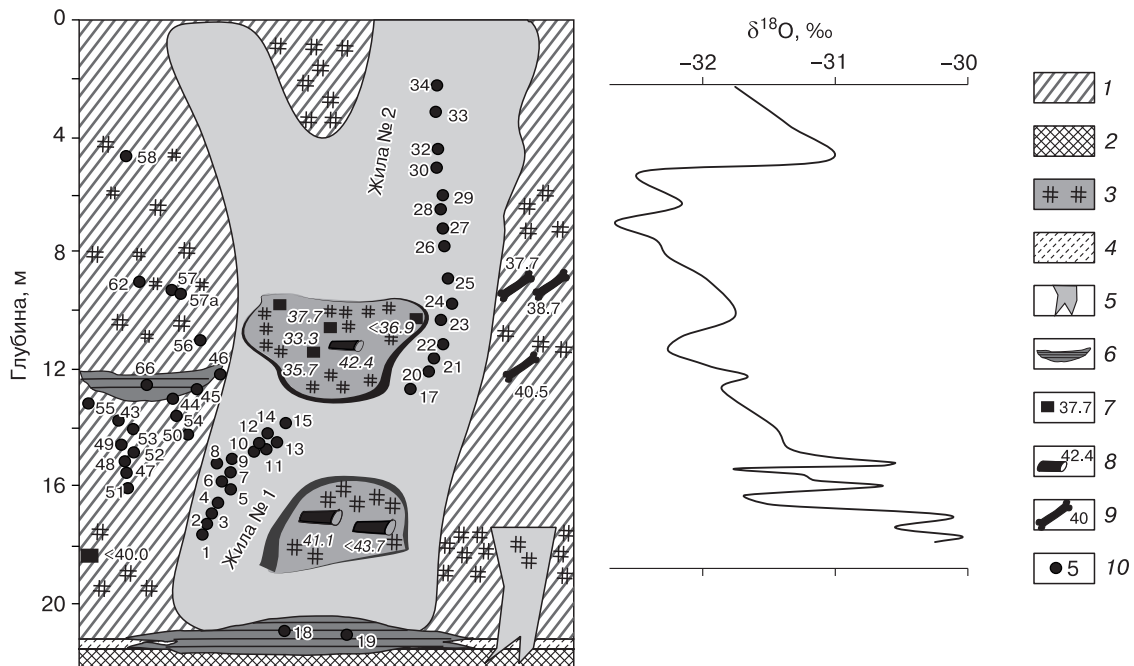


Рис. 3. Схема отбора образцов повторно-жильных льдов на изотопно-кислородный анализ в склоновой едомной толще у пос. Кулар.

1 – супесь серая, мерзлая со среднеслоистой, средне- и тонкошлюровой криотекстурой; 2 – древесно-щебнистые отложения; 3 – торф мерзлый с косослоистыми, решетчатыми и плетенчатыми криотекстурами; 4 – песок черный, мелкий, мерзлый; 5 – лед повторно-жильный; 6 – лед пластовый сегрегационный; ^{14}C -датировки: 7 – торфа, 8 – древесины, 9 – костей; 10 – точки отбора образцов на изотопно-кислородный и химический анализы; цифры – номера образцов (см. табл. 1–4).

3–4 ‰ [Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., 2018]. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в текстурообразующем льду торфяной линзы в центральной части обнажения варьируют от –25.3 до –22.1 ‰, что и составляет 3.2 ‰, однако в боковой части разреза в ледяных шпирях из оторфованной супеси с костными остатками значение $\delta^{18}\text{O}$ составило –35.6 ‰ (см. табл. 1). Это одно из самых низких значений $\delta^{18}\text{O}$, полученных из текстурообразующего льда шпиров в едомных толщах Сибири. Скорее всего, это свидетельствует о процессе фракционирования в замкнутой системе, как, например, отмеченное авторами в пластовых льдах в толще первой террасы в устье р. Гыда (Западная Сибирь), где в наиболее изотопически отрицательном пласте льда величина $\delta^{18}\text{O}$ составила –34.3 ‰ [Васильчук А.К., Васильчук Ю.К., 2018].

Значение $\delta^{18}\text{O}$ в сегрегационных линзовидных телах, подстилающих едому, равно –23.5 ‰, а в линзе сегрегационного льда, залегающей в средней части едомы, составляет –24.4 ‰, т. е. близко к изотопному составу текстурообразующего льда шпиров. Для сравнения приведены значения $\delta^{18}\text{O}$ в воде р. Бургуат и в свежевыпавшем в сентябре снеге (см. табл. 1).

В повторно-жильных льдах значения $\delta^{18}\text{O}$ существенно ниже, чем в сегрегационных (см.

табл. 1, рис. 3), они варьируют от –32.6 до –30.0 ‰. Все полученные $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ отрицательнее современных на 5–7 ‰ (в современных жильных ростках региона среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ составляет –25 ‰). Прослеживается тренд облегчения изотопного состава снизу вверх от –30 до –32 ‰ и ниже. Локальные изотопные максимумы выделяются на глубинах 16–17, 9–10 и 2–5 м, что, очевидно, отражает циклический характер формирования ледяных жил [Васильчук, 1990]. Менее отрицательные изотопные значения, возможно частично, связаны с теми моментами развития полигонально-жильного комплекса, когда его формирование возобновлялось после некоторого перерыва, вызванного большей обводненностью массива, и в трещины могла попадать озерная и болотная вода. Подобное изменение по латерали минерализации ПЖЛ авторам удалось проследить на первой террасе о. Белый [Васильчук, Васильчук, 2015]. В эти моменты процессу промерзания подвергались и подстилающие супеси, накопившиеся на мерзлом субстрате, и перекрывающий их торф мощностью 2.0–2.5 м.

Общая тенденция соответствует изменениям зимних температур, демонстрируя переход к более холодным условиям зимнего сезона. Об этом свидетельствует сходство изотопной кривой, полу-

Таблица 1. Вариации величин $\delta^{18}\text{O}$ в поздне-неоплейстоценовых повторно-жильных льдах, в текстурных льдах и сегрегационных ледяных линзах, в снегу и воде р. Бургуат

Номер образца	Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	Номер образца	Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰
<i>Сингенетические поздненеоплейстоценовые ПЖЛ в едомной толще</i>					
34	2.0	–31.7	15	13.6	–31.4
33	3.3	–31.3	14	14.3	–31.3
32	4.5	–31.0	13	14.6	–31.0
30	5.0	–32.4	12	14.8	–30.5
29	6.0	–32.1	11	14.9	–30.6
28	6.6	–32.6	10	15.0	–31.7
27	7.2	–32.3	9	15.2	–31.2
26	7.8	–32.2	8	15.4	–31.1
25	8.6	–31.9	7	15.6	–30.6
24	9.8	–31.7	6	15.8	–31.6
23	10.5	–32.1	5	16.1	–31.4
22	11.0	–32.2	4	16.5	–30.1
21	11.5	–31.9	3	17.0	–30.5
20	12.0	–31.6	2	17.3	–30.0
17	12.3	–31.8	1	17.5	–30.2
<i>Сингенетические поздненеоплейстоценовые текстурообразующие льды штиров в едомной толще</i>					
62	9.0	–35.6	55	13.0	–25.3
56	11.0	–25.2	54	13.5	–23.8
46	12.0	–22.1	43	13.5	–25.2
45	12.5	–23.7	53	14.0	–24.2
44	13.0	–23.3			
<i>Сегрегационные ледяные линзы в едомной толще</i>					
65	12.5	–24.4			
<i>Сегрегационные ледяные линзы на нижнем контакте едомной толщи</i>					
18	21.0	–23.5	19	21.5	–23.5
<i>Вода р. Бургуат</i>			<i>Снег 16 сентября</i>		
63ф	0	–21.4	67	0	–25.8

ченной по образцам из ПЖЛ, с вариациями значений $\delta^{18}\text{O}$ в гренландском ледниковом керне NGRIP (рис. 4). Согласно полученным радиоуглеродным датировкам и расчетам скорости накопления едомных отложений и сингенетических ПЖЛ [Васильчук, Васильчук, 2020], с учетом предполагаемой глубины морозобойного растрескивания 2–3 м, мы относим время накопления ПЖЛ к временному интервалу 49–25 тыс. кал. лет назад.

Для сравнения на рис. 4 представлена изотопная кривая вариаций значений $\delta^{18}\text{O}$ в гренландском ледниковом керне NGRIP (привязка керна с использованием результатов калибровочной программы Oxcal 4.2 [Bronk, 2009], символ Н обозначает холодную стадию событий Хайнриха [Васильчук, 2003]). Сходство вариаций значений $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ с изотопной кривой NGRIP подчеркивается прежде всего тем, что в интервале от 47 до

Таблица 2. Содержание микроэлементов и щелочно-земельных металлов в поздненеоплейстоценовых сингенетических ПЖЛ

Номер образ- ца	Глу- бина отбо- ра, м	Co	Cu	Mn	Zn	Ca	Mg
		мкг/л				мг/л	
Ледяная жила № 1							
15	13.6	6.2	24.22	22.94	1.8	6.74	3.25
14	14.3	10.23	20.34	11.47	2.4	10.48	5.56
13	14.6	6.7	35.43	8.57	125.5	9.86	4.14
11	14.9	6.0	28.62	20.64	291.6	10.21	3.66
10	15.0	5.6	26.41	98.97	332.2	4.1	2.42
9	15.2	22.1	26.62	15.36	65.58	9.7	5.38
7	15.6	5.1	20.92	63.83	391.6	9.0	4.34
3	17.0	20.68	23.31	67.46	29.61	13.8	6.16
1	17.5	12.3	36.67	6.9	10.83	9.85	5.32
Ледяная жила № 2							
34	2.0	6.6	31.86	254.4	262.5	6.75	2.76
32	4.5	19.69	36.54	187.4	123.5	5.38	2.78
30	5.0	9.77	32.15	126.5	742.8	9.0	3.76
29	6.0	4.64	30.57	224.2	35.61	9.0	3.94
28	6.6	2.2	30.19	0.63	74.09	9.1	4.51
27	7.2	1.6	35.02	11.34	17.74	8.7	4.09
26	7.8	10.04	24.52	110.7	141.1	12.2	4.73
25	8.6	21.41	60.88	142.3	93.05	9.67	3.71
24	9.8	9.8	30.52	189.6	406.6	10.78	4.29
23	10.5	21.97	39.11	172.0	1764	10.93	4.27
22	11.0	0.62	31.28	9.14	349.5	8.15	2.87
21	11.5	14.36	40.86	8.8	394.6	10.04	4.35
20	12.0	4.7	38.85	2.4	33.82	7.32	3.44
Линзы сегрегационного льда							
18	21.0	6.9	28.99	10.49	565.6	4.0	1.95
19	21.5	4.2	0.65	25.27	102.0	1.04	0.38
Текстурообразующий сегрегационный лед							
43	13.5	5.3	2.88	3304	68.70	39.48	25.34
44`	13.5	4.6	22.85	3119	17.51	—	—
44	13.0	32.05	27.57	597.7	100	69.53	56.74
54	13.5	184.6	28.73	716.6	5.8	75.28	27.01
56	11.0	49.26	44.27	2956	1802	18.10	11.68
58	4.5	7.85	28.94	2681	1.4	208.0	—
58ф	4.5	5.435	32.72	3850	32.66	—	—
66	12.5	20.05	27.09	31.23	1193	3.518	0.46
Река Бургуат							
63 (вода)	0.0	13.42	39.55	98.66	2.5	70.66	39.19
67 (снег)	0.0	14.16	23.77	15.57	30.60	0.6591	0.8174

Примечание к табл. 2–4. Жирным шрифтом выделены максимальные значения; ф – фильтрованные образцы.

44 тыс. кал. лет на обеих диаграммах фиксируется устойчивый негативный изотопный тренд, хотя на куларской изотопной кривой его величина 1.5 ‰,

Таблица 3. Состав и содержание водорастворимых солей в 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⁺	Na ⁺ + K ⁺	
27	7.2	76.0	41.5	6.7	19.8	11.6	2.2	12.0	7.27
26	7.8	88.0	68.3	6.7	13.2	16.8	4.9	7.8	7.15
25	8.6	62.0	42.7	5.4	10.7	12.0	1.5	8.0	7.22
24	9.8	68.0	43.9	6.1	13.2	11.2	2.2	9.7	7.07
22	11.0	76.0	65.9	4.7	10.7	14.4	3.6	9.4	7.08
21	11.5	70.0	48.8	5.4	14.8	7.2	5.8	9.7	7.08
17	12.3	60.0	26.8	7.4	18.1	12.8	1.0	7.1	7.13
15ф	13.6	56.0	30.5	4.7	14.0	6.4	2.9	8.3	7.27
15	13.6	58.0	29.3	5.4	18.1	6.4	4.9	6.7	7.23
13	14.6	60.0	30.5	5.4	17.3	3.6	2.2	15.0	7.24
12	14.8	44.0	24.4	8.1	5.8	4.0	2.9	7.1	7.05
10	15.0	58.0	31.7	6.7	14.0	9.2	2.2	8.3	7.37
9	15.2	58.0	34.2	6.7	14.8	11.6	3.4	4.6	6.97
8	15.4	56.0	36.6	6.7	9.1	12.0	1.9	5.1	7.07
7	15.6	86.0	57.4	6.7	18.1	12.8	5.1	10.4	7.60
6	15.8	68.0	43.9	5.4	15.6	11.2	2.9	9.2	7.14
5	16.1	72.0	57.4	5.4	11.5	12.8	5.4	5.8	7.16
4	16.5	92.0	46.4	5.4	33.7	11.2	6.8	11.3	7.25
2	17.3	70.0	46.4	6.7	15.6	10.4	5.1	7.8	7.38
1	17.5	62.0	46.4	6.1	10.7	10.0	6.1	3.5	7.11

Таблица 4. Состав и содержание водорастворимых солей в едомных позднеплейстоценовых отложениях

Номер образца	Глубина отбора, м	Сухой остаток, %	Содержание водорастворимых солей, %						pH
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	
58	4.5	0.135	0.044	0.011	0.007	0.012	0.006	0.001	8.15
57	9.6	0.138	0.017	0.005	0.005	0.004	0.002	0.004	6.55
57a	9.8	0.142	0.022	0.005	0.007	0.006	0.002	0.004	6.60
56	11.0	0.124	0.016	0.005	0.005	0.003	0.001	0.005	6.10
45	12.5	0.107	0.015	0.005	0.004	0.004	0.002	0.002	6.56
44	13.0	0.113	0.021	0.007	0.005	0.005	0.003	0.002	6.97
55	13.0	0.092	0.028	0.004	0.011	0.007	0.003	0.005	7.74
50	13.4	0.096	0.027	0.013	0.017	0.008	0.003	0.011	7.98
43	13.5	0.082	0.016	0.007	0.007	0.004	0.002	0.005	7.10
53	14.0	0.078	0.034	0.003	0.019	0.010	0.002	0.008	7.96
49	14.3	0.109	0.028	0.014	0.021	0.010	0.004	0.011	7.89
52	14.6	0.090	0.028	0.004	0.024	0.011	0.002	0.008	8.00
48	15.1	0.096	0.026	0.012	0.013	0.006	0.003	0.011	7.75
47	15.7	0.094	0.035	0.008	0.007	0.008	0.003	0.007	7.90
51	16.0	0.092	0.028	0.003	0.026	0.010	0.003	0.008	7.86

а на кривой NGRIP около 2.5 ‰. Скорее всего, изотопные значения меньше –32 ‰ на куларской кривой в интервале глубин 12.0–10.05 м (приблизительно датированном 38–37 тыс. кал. лет) соответствуют четвертому событию Хайнриха, а в интервале 7.2–5.0 м (около 31 тыс. кал. лет) – третьему событию Хайнриха [Васильчук, 2003]. Более ранние похолодания, связанные с глобальными климатическими изменениями на изотопной кривой ПЖЛ из куларской едомы, не зафиксированы, что

может быть связано с участием нескольких источников воды помимо атмосферных осадков.

Содержание ионов кальция во льду ледниковых кернов чаще всего интерпретируется как изменение содержания частиц пыли в атмосферном воздухе, на основании сильной положительной корреляции между содержанием ионов кальция и концентрацией пылеватых частиц [Hansson, 1994]. Предполагается также, что изотопный состав ледникового льда можно точнее оценить с учетом

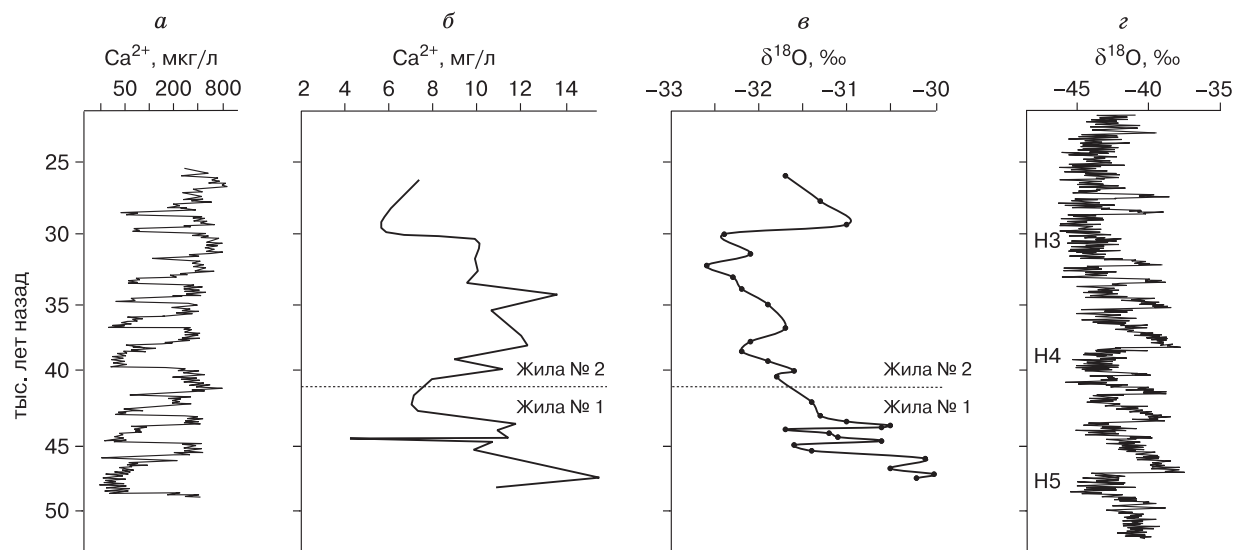


Рис. 4. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ и концентрации ионов кальция в повторно-жильных льдах (б, в) (по данным табл. 1, 2) и сопоставление с гидрохимической кривой ледникового ядра GISP (а) и изотопной кривой ледникового ядра NGRIP (г) (Гренландия).

H3–H5 – холодная стадия событий Хайнриха.

концентрации ионов кальция, являющихся показателем запыленности [Rasmussen *et al.*, 2013]. Для сравнения содержания ионов кальция в ПЖЛ куларской едомы и в ледниковом ядре GISP (Гренландия) использованы определения содержания ионов кальция методом атомно-абсорбционной спектроскопии (см. табл. 2), так как для определения содержания кальция в ледниковом ядре применялся этот же метод [Mayewski, 1999]. Сравнение содержания ионов кальция во льду гренландского ледникового ядра GISP (возрастная привязка по [Mayewski, 1999; Rasmussen *et al.*, 2013]) и в ПЖЛ в разрезе Кулар (см. рис. 4) позволяет интерпретировать относительно высокое содержание ионов кальция как отражение степени запыленности атмосферы в период формирования ПЖЛ в интервале 40–30 тыс. лет назад. Пик содержания кальция в нижней части разреза (см. рис. 4) имеет локальный характер, на диаграмме ледникового ядра GISP не выражен и, по-видимому, соответствует максимальной запыленности в регионе. Повышенное содержание пыли в атмосфере на севере Якутии отмечено для этого периода в низовьях р. Колымы на основе изучения разреза едомных отложений Дуваный Яр [Murton *et al.*, 2015].

Содержание цинка во льдах Кулара варьирует в широком диапазоне 1.4–1802 мкг/л (рис. 5) при медианном значении 93 мкг/л, максимум содержания цинка отмечен в текстурных льдах – 1802 мкг/л (рис. 6), максимум в ПЖЛ того же порядка – 1764 мкг/л. Среднее содержание цинка в

ПЖЛ составляет 506.93 мкг/л. Меньше всего цинка содержится в сегрегационном льду ледяных линз – от 102 до 565.6 мкг/л. В воде р. Бургуат содержание цинка очень мало (2.5 мкг/л). Согласно данным, приведенным С.Л. Шварцевым, воды зоны гипергенеза содержат Zn в среднем 34 мкг/л, по Муру и Рамамурти в незагрязненных пресных водах рек мира растворено Zn от 0.5 до 15 мкг/л [Шварцев, 1978]. Содержание цинка в разрезе Кулар заметно выше. Высокое содержание Zn в текстурных льдах в интервале глубин 11.0–12.5 м (см. рис. 6), возможно, связано с попаданием содержащих цинк продуктов выветривания в озерно-болотную котловину, в которой накапливался торфяник, на фоне увеличения стока. Вероятный источник поступления цинка, по данным групповой геологической съемки масштаба 1:50 000 ГУ ГГП “Янгеология”, – это обнажения пород нижнетарбаганнахской подсытки в долине руч. Неттик, представленные кварцевыми жилами с вкрапленностью пирротина и сфалерита (цинк-содержащих минералов). Содержание Zn в них составляет 0.1 % [Соловьев *и др.*, 2003].

Максимум содержания марганца отмечен в сегрегационном текстурообразующем льду шпиров – от 597 до 3850 мкг/л (см. рис. 6), минимум в сегрегационном льду линз – от 10.4 до 25.2 мкг/л (см. табл. 2). Содержание Mn в ПЖЛ изменяется в широком диапазоне – от 0.6348 до 254.4 мкг/л при среднем содержании 79.7 мкг/л (см. рис. 5) и медианном значении 16.1 мкг/л [Васильчук *и др.*, 2017]. Для сравнения в воде р. Бургуат содержа-

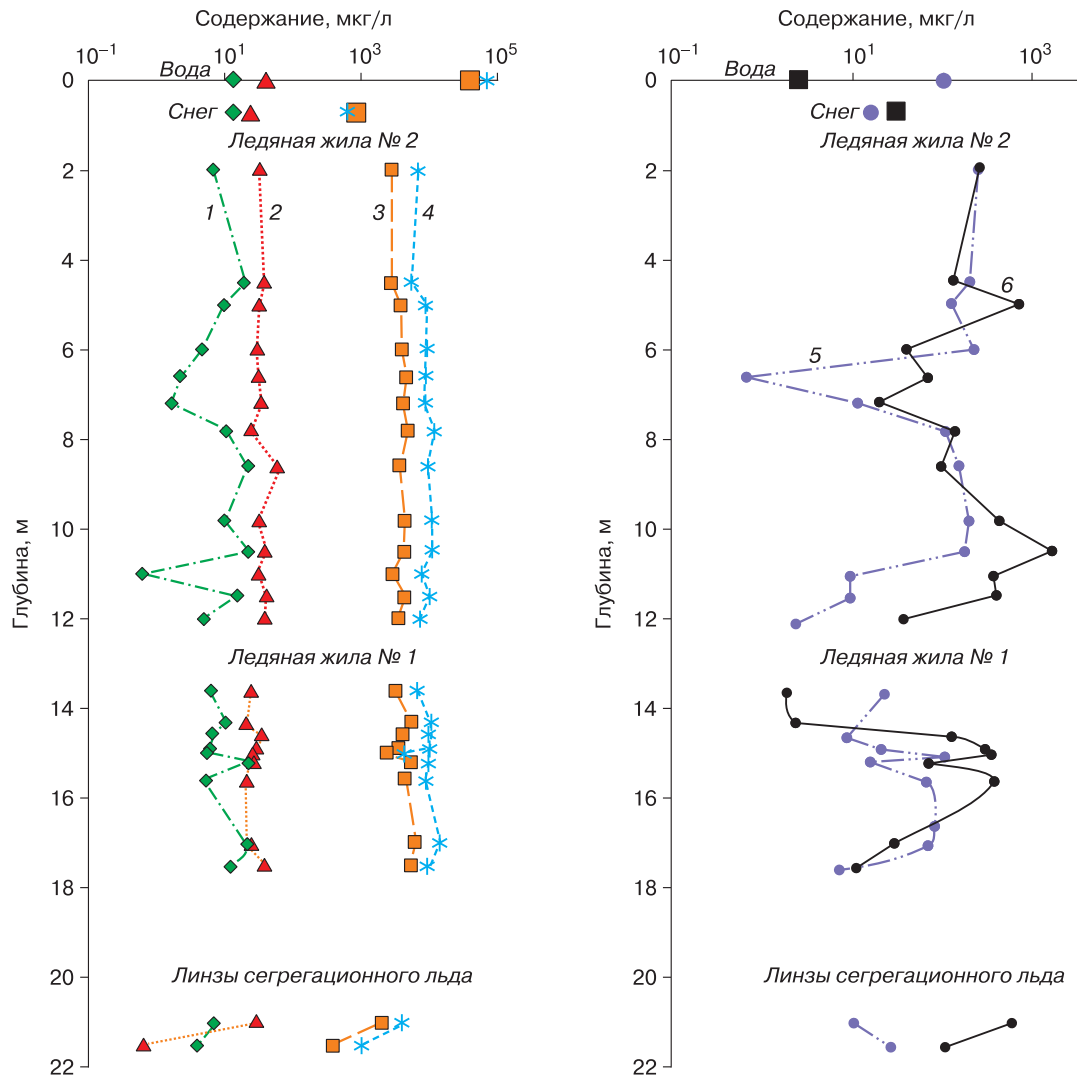


Рис. 5. Содержание микроэлементов и щелочно-земельных металлов в сингенетических повторно-жильных льдах и линзах сегрегационных льдов.

1 – Co; 2 – Cu; 3 – Ca; 4 – Mg; 5 – Mn; 6 – Zn.

ние марганца составляет 98.6 мкг/л, а в снегу, отобранном в непосредственной близости от разреза, 15.57 мг/л, т. е. значения содержания марганца в ПЖЛ ближе к содержанию Mn в снегу. В дождевой воде, по данным Г.Н. Батурина [Юдович, Кетрис, 2014], марганец содержится в количестве от 0.14 до 94 мкг/л, при среднем содержании 0.2 мкг/л. В целом содержание марганца в ПЖЛ куларской едомы ближе к полученным значениям Mn в снегу и воде р. Бургуат. Высокое содержание Mn именно в текстурном льду, вероятно, обусловлено тем, что марганец переходит в текстурный лед из растворов, фильтрующихся сквозь минеральные (оглеенные) и органические (торфяные) горизонты, поскольку глееземы и торфяно-глеиземы являются характерными типами почв региона,

а именно в этих почвах отмечено наиболее существенное накопление марганца [Лаптева и др., 2015], так как в процессе оглеения происходит биохимическое восстановление элементов с переменной валентностью, в первую очередь железа и марганца. Высокое содержание Mn в едомных отложениях позволяет предположить, что процессы оглеения играли существенную роль при накоплении едомных отложений на склонах хр. Кулар.

Содержание меди в повторно-жильных льдах варьирует в диапазоне 20.3–60.8 мкг/л (см. рис. 5), среднее содержание Cu составило 32.0 мкг/л, медианное содержание 30.9 мкг/л. Содержание меди в речной воде (39.55 мкг/л) и снегу (23.77 мкг/л) соответствует диапазону значений содержания Cu в ПЖЛ.

Содержание кобальта в ПЖЛ варьирует в диапазоне 0.6–22.1 мкг/л (см. рис. 5), среднее содержание составляет 10.1 мкг/л, при этом медианное значение 8.2 мкг/л. В речной воде и снегу содержание Со примерно одинаково – 13.42 и 14.16 мкг/л соответственно.

ПЖЛ куларской едомы характеризуются повышенным содержанием меди, цинка и кобальта, которое выше среднемирового значения (кларка) для природных поверхностных вод [Шварцев, 1978]. Источниками тяжелых металлов, вероятно, являются долериты дербекинского комплекса позднеюрских интрузий, характеризующиеся высоким содержанием меди и кобальта, обнажения которых распространены в долинах рек Бургуат и Куччугуй-Кюэжюлор [Соловьев и др., 2003]. Цинк, медь и кобальт также входят в геохимическую ассоциацию элементов, характерных для золоторудных месторождений и их ореолов рассеяния. В непосредственной близости от изученного разреза расположено Эмисское месторождение золота, среди основных сопутствующих элементов в данном месторождении отмечаются медь и цинк [Соловьев и др., 2003], в меньшем количестве встречается кобальт. Для накопления меди, цинка и марганца в едомных отложениях и повторно-жильных льдах благоприятна глеевая обстановка, которая могла возникать при отсутствии аэрации и избы-

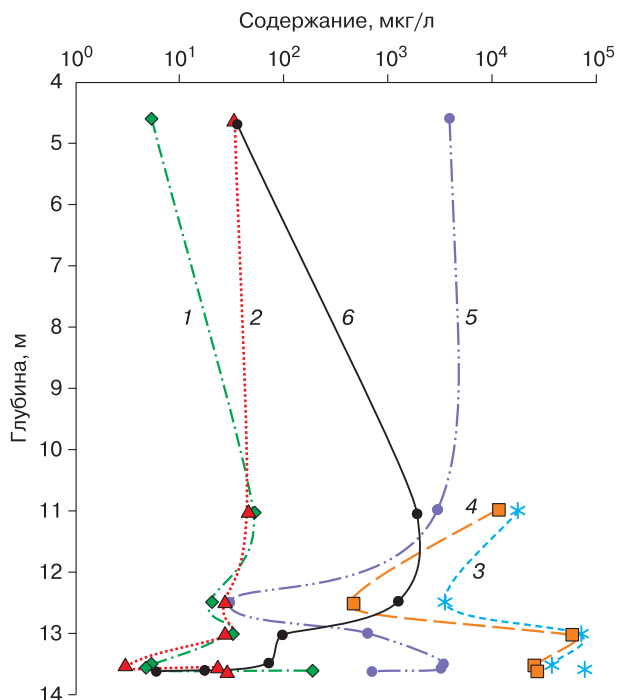


Рис. 6. Содержание микроэлементов и щелочно-земельных металлов в текстурообразующих сегрегационных льдах.

1 – Со; 2 – Cu; 3 – Ca; 4 – Mg; 5 – Mn; 6 – Zn.

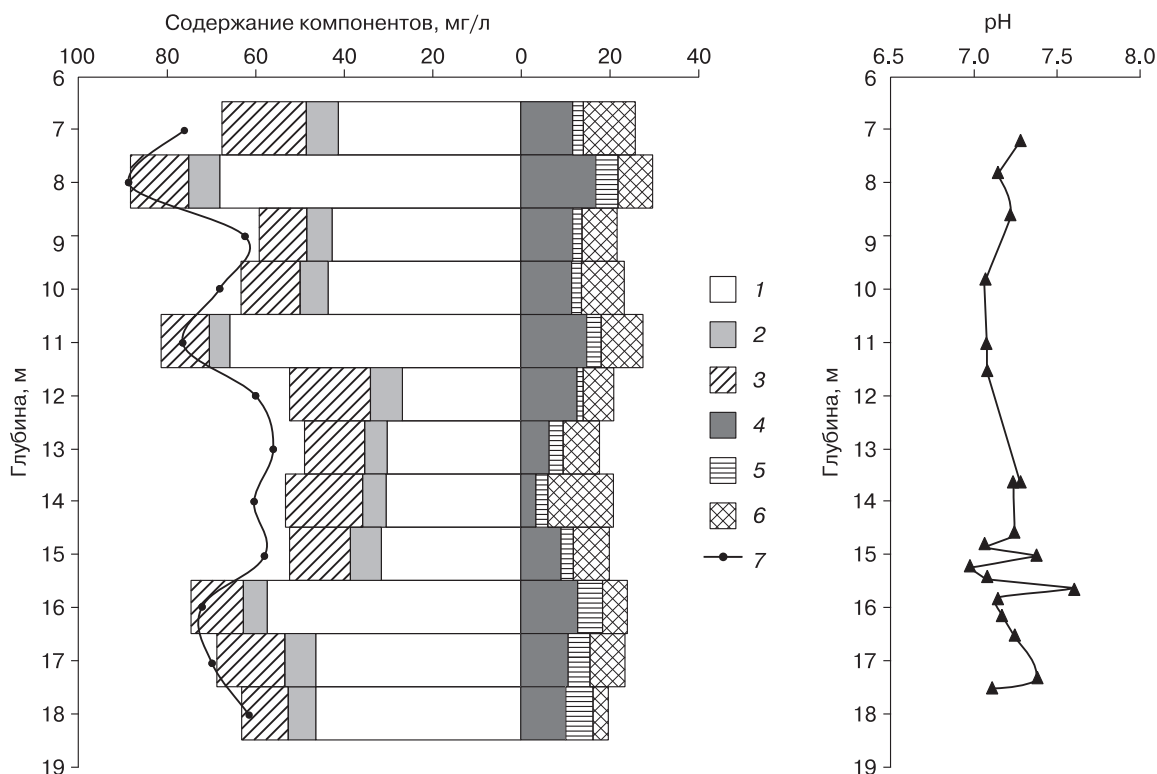


Рис. 7. Состав водорастворимых солей в сингенетических повторно-жильных льдах.

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

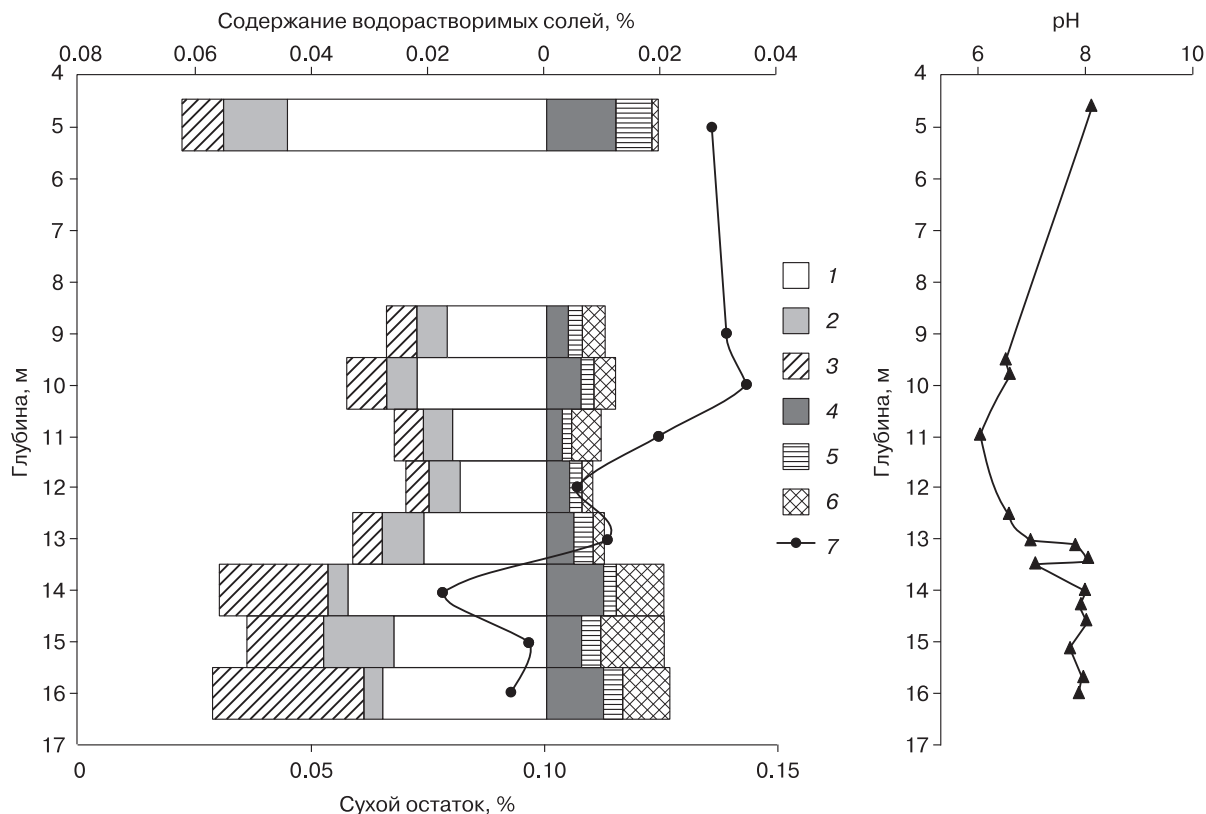


Рис. 8. Состав водорастворимых солей во вмещающих повторно-жильные льды сингенетических отложениях.

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

точном увлажнении во время формирования ледяных жил.

По данным геологической съемки масштаба 1:50 000 [Соловьев и др., 2003], в составе ПЖЛ в окрестностях Кулара обнаружены аномальные концентрации марганца, железа, бериллия, фтора, алюминия и вольфрама, достигающие 8 ПДК (предельно допустимых концентраций для IV климатического района [ГН 2.1.5.1315-03, 2003]). В наледях в окрестностях Кулара также обнаружены повышенные концентрации бериллия, вольфрама, алюминия, титана, марганца и железа примерно в том же диапазоне от 1 до 8 ПДК.

Лед жил в целом характеризуется как пресный, преимущественно гидрокарбонатно-кальциевый калиево-натриевый, сухой остаток в среднем составляет 67 мг/л. Содержание кальция в ПЖЛ варьирует от 4 до 13.8 мг/л (рис. 7), в среднем 10.38 мг/л, содержание магния составляет 2.4–6.1 мг/л (см. табл. 2). В повторно-жильных льдах в долине р. Лены содержание кальция от 2.8 до 15.6 мг/л, магния от 1.3 до 9.5 мг/л при низкой минерализации льда (от 0.05 до 0.08 г/л) [Анисимова, 1981]. Следовательно, содержание ионов кальция и магния в большой степени определяется, как и

для ПЖЛ в долине р. Лены [Анисимова, 1981], составом зимних атмосферных осадков.

Содержание водорастворимых солей в едомных отложениях не превышает 0.142 %, породы незасоленные (см. табл. 4). Для всего разреза характерно преобладание ионов кальция и гидрокарбонат-иона. Среднее содержание гидрокарбонат-иона – 0.026 %, хлор-иона – 0.007 %, сульфат-иона – 0.0119 % (рис. 8), среднее содержание ионов кальция – 0.0072 %, магния – 0.0027 %, натрия и калия – 0.0061 %. По содержанию сухого остатка толщу можно разделить на две части: нижнюю, в интервале глубин 13–16 м, где среднее содержание сухого остатка составляет 0.092 %, и верхнюю, в интервале глубин 4.5–13 м, где среднее содержание сухого остатка выше 0.127 %.

РЕКОНСТРУКЦИИ СРЕДНЕЯНВАРСКОЙ И СРЕДНЕЗИМНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ИЗОТОПНЫМ ДАННЫМ

Реконструкции среднеянварской ($t_{я}$) и среднезимней ($t_{ср.з}$) температуры получены на основе сравнения изотопного состава современных жильных ростков ($\delta^{18}\text{O}_{р.ж}$) и современных зимних температур для периода формирования жильных

Таблица 5. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в позднелепесточных и современных сингенетических повторно-жильных льдах Кулара и окрестных едом Северной Якутии

Опорный разрез	Палеореконструкции					Современные значения					Источник
	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ж}}$	Σt_3	$t_{\text{ср.з}}$	$t_{\text{я}}$	$t_{\text{палео}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ж}}$	Σt_3	$t_{\text{ср.з}}$	$t_{\text{я}}$	$t_{\text{совр}}$	
47–42 тыс. кал. лет назад											
Кулар	–31.0	–7750	–31.0	–46.0	–20	–25.0	–5920	–25.0	–37.0	–14	[Васильчук, 1992, с доп.]
Мамонтова Хаята	–30.2	–7550	–30.0	–45.0	–19	–23.0	–5382	–21.5	–31.0	–14	[Meyer et al., 2002]
О. Курунгнах	–31.8	–7900	–32.0	–48.0	–21	–24.6	–5540	–22.0	–34.3	–15	[Wetterich et al., 2008]
Ойгосский Яр	–29.5	–7375	–29.5	–44.0	–19	–24.4	–5230	–21.0	–30.4	–14	[Opel et al., 2017]
37–32 тыс. кал. лет назад											
Кулар	–32.5	–8000	–32.5	–49.0	–22	–25.0	–5920	–25.0	–37.0	–14	[Васильчук, 1992, с доп.]
Мамонтова Хаята	–31.0	–7750	–31.0	–46.0	–20	–23.0	–5382	–21.5	–31.0	–14	[Meyer et al., 2002]
Низовья р. Яны	–31.4	–7800	–31.4	–47.8	–19	–21.0	–6006	–24.0	–38.0	–14	[Павлова и др., 2015]
Ойгосский Яр	–31.4	–7800	–31.4	–47.8	–19	–24.4	–5230	–21.0	–30.4	–13	[Opel et al., 2017]

Примечание. $\delta^{18}\text{O}_{\text{ж}}$ – изотопный состав ПЖЛ, ‰; Σt_3 – сумма отрицательных температур, °C; $t_{\text{ср.з}}$ – средняя температура зимнего сезона, °C; $t_{\text{я}}$ – средняя температура января, °C; $t_{\text{палео}}$ – среднегодовая палеотемпература поверхности почвы, °C; $t_{\text{совр}}$ – современная среднегодовая температура поверхности почвы, °C.

ростков, т. е. последних 60–100 лет [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, 1991]. В результате этого сравнения получены уравнения

$$t_{\text{я}} = 1.5 \delta^{18}\text{O}_{\text{р.ж}} (\pm 3^\circ\text{C}), t_{\text{ср.з}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{р.ж}} (\pm 2^\circ\text{C}).$$

По ним рассчитаны $t_{\text{я}}$ и $t_{\text{ср.з}}$ для разных временных интервалов куларской и ряда близлежащих едом северо-запада Якутии (табл. 5).

Если сопоставить изотопные данные двух существенно различающихся (см. рис. 4) периодов позднего неоплейстоцена: 47–42 и 37–32 тыс. кал. лет назад (–31.0 и –32.5 ‰ соответственно) с данными по разрезам едомных отложений северо-запада Якутии: Мамонтов Хаята (–30.2 и –31.0 ‰ соответственно) и Ойгосского Яра (–29.5 и –31.4 ‰ соответственно), то более древний лед, формировавшийся 47–42 тыс. кал. лет назад, заметно (на 1–2 ‰) тяжелее льда ПЖЛ, формировавшегося 37–32 тыс. кал. лет назад (см. табл. 5). Это указывает на то, что среднеянварская температура 47–42 тыс. кал. лет назад была на 1.0–3.8 °C выше, чем 37–32 тыс. кал. лет назад. В Куларе $t_{\text{я}} = -46$ и 49°C соответственно 47–42 и 37–32 тыс. кал. лет назад, на севере Быковского п-ова (Мамонтов Хаята) $t_{\text{я}} = -45$ и -46°C , в районе Ойгосского Яра $t_{\text{я}} = -44$ и -47.8°C соответственно.

Отложения едомы, которые накопились в нижнем течении р. Яны [Павлова и др., 2015; Pitulko et al., 2004], приблизительно соответствуют по возрасту едоме в районе Кулара. Отложения представлены синкриогенными осадками прирусловой и пойменной фаций аллювия с развитой сетью ПЖЛ двух генераций общей мощностью 14–16 м. Ледяная жила, возраст которой отнесен к морской изотопной стадии 3 (МИС 3) опробована в поперечном горизонтальном профиле на уровне культурного слоя, который датирован 28.5–

27.0 тыс. лет назад. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ близки к полученным авторами в ПЖЛ куларской едомы, в ПЖЛ Янской стоянки варьируют от –32.7 до –29.4 ‰ при среднем значении –31.4 ‰. Значения $\delta^2\text{H}$ изменяются в пределах –260.8...–230.6 ‰ при среднем –250.9 ‰. Величина дейтериевого эксцесса (d_{exc}) находится в интервале от –7.6 до –5.3 ‰ [Павлова и др., 2015]. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ аппроксимируется прямой линией согласно уравнению $\delta^2\text{H} = 7.3 \cdot \delta^{18}\text{O} - 20$.

Близкие значения изотопного состава ПЖЛ получены С. Веттерихом с соавторами [Wetterich et al., 2008] на острове Курунгнах в дельте р. Лены. Сингенетические повторно-жильные льды, отнесенные, согласно полученным датировкам, к интервалу 50–31 тыс. лет назад, характеризуются средними значениями $\delta^{18}\text{O} = -32$ ‰ и $\delta^2\text{H} = -248$ ‰, среднее значение d_{exc} составляет 6 ‰. Что касается вегетационного периода, наиболее благоприятные условия по палинологическим данным отмечены около 42 и 40–32 тыс. лет назад [Wetterich et al., 2014].

Приведенные данные подтверждают интенсивное формирование едомного комплекса на протяжении всего позднелепесточного криохрона. Одновременное накопление в едомных толщах ледяных жил и органического материала указывает на возможность синхронного увеличения суровости зим и некоторого улучшения условий вегетации в отдельные периоды позднелепесточного криохрона.

ВЫВОДЫ

Значения $\delta^{18}\text{O}$ повторно-жильных льдов склоновой едомы хр. Кулар варьируют от –32.6 до –30.0 ‰, в текстуробразующих сегрегационных льдах в едомной толще составляют от –35.6 до

–22.1 ‰, в сегрегационных ледяных линзах – от –24.4 до –21.5 ‰.

Для двух периодов позднего неоплейстоцена: 47–42 тыс. кал. лет назад и 37–32 тыс. кал. лет назад – значения $\delta^{18}\text{O}_{\text{ж}}$ (в районе хр. Кулар) составили –31.0 и –32.5 ‰ соответственно.

Среднеянварская температура в исследованном районе 47–42 тыс. кал. лет назад была на 1.0–3.8 °C выше, чем 37–32 тыс. кал. лет назад, и составляла –46 и –49 °C соответственно.

Наиболее низкая среднеянварская температура (на 10 °C ниже современной) в районе хр. Кулар относится к периоду 37–32 тыс. кал. лет назад.

Химический состав подземных льдов отражает геохимические особенности региона и характеризуется повышенным содержанием марганца, цинка, меди и кобальта, что связано с Эмисским рудопоявлением и позднеюрскими интрузиями долеритов, откуда осуществлялся интенсивный сток рассеянных элементов.

Относительно высокое содержание ионов кальция, вероятно, отражает повышенную степень запыленности атмосферы в период формирования ПЖЛ в интервале 40–30 тыс. лет назад.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФНФ (грант 19-17-00126).

Литература

- Анисимова Н.П. Криогидрохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск, Наука, 1981, 153 с.
- Васильчук А.К. Отражение событий Хайнриха на датированных по радиоуглероду спорово-пыльцевых диаграммах повторно-жильных льдов и вмещающих их едомных отложений низовий р. Колымы // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 4, с. 3–13.
- Васильчук А.К., Васильчук Ю.К. Палинологическая характеристика и возраст повторно-жильных льдов в устье р. Ыльда // Арктика и Антарктика, 2018, № 1, с. 97–121, DOI: 10.7256/2453-8922.2018.1.25949.
- Васильчук Ю.К. Изотопно-геохимическая характеристика позднеплейстоценового повторно-жильного комплекса Куларской котловины // Докл. АН СССР, 1990, т. 310, № 1, с. 154–157.
- Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав повторно-жильных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций): В 2 т. М., ОТП РАН, МГУ, ПНИИИС, 1992, т. 1, 420 с.; т. 2, 264 с.
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук Дж.Ю. Тяжелые металлы и микроэлементы в позднеплейстоценовых повторно-жильных льдах Северной Якутии // Арктика и Антарктика, 2017, № 1, с. 23–37, DOI: 10.7256/2453-8922.2017.1.22232.
- Васильчук Ю.К., Васильчук А.К. Инженерно-геологические и геохимические условия полигональных ландшафтов острова Белый (Карское море) // Инж. геология, 2015, № 1, с. 50–65.
- 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. Сингенетические повторно-жильные льды и возраст склоновой едомы в предгорье хребта Кулар // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 2, с. 3–14.
- ГН 2.1.5.1315-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования. Минздрав РФ. М., 2003, 152 с. (Зарегистрировано в Минюсте РФ 19.05.2003 № 4550).
- Лаптева Е.М., Каверин Д.А., Пастухов А.В. и др. Ландшафтно-биогеографические аспекты аккумуляции и миграции тяжелых металлов в почвах Арктики и Субарктики европейского Северо-Востока // Изв. Коми науч. центра УрО РАН, 2015, вып. 3 (23), с. 47–60.
- Павлова Е.Ю., Иванова В.В., Майер Х., Питулько В.В. Изотопный состав ископаемых льдов как индикатор палеоклиматических изменений на севере Новосибирских островов и западе Яно-Индигоирской низменности // Фундаментальные проблемы квартера, итоги изучения и основные направления дальнейших исследований: Материалы IX Всерос. совещания по изучению четвертичного периода (Иркутск, 15–20 сент. 2015 г.). Иркутск, Изд-во ИГ СО РАН, 2015, с. 349–351.
- Соловьев М.Н., Федянин А.Н., Сорокина К.М. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:200 000 (2-е изд.). Сер. Верхоянская. Лист R-53-XV, XVI – Кулар. Объяснит. записка. Батагай, ГУ ГП «Янгеология», 2003, 177 с.
- Справочник по климату СССР. Вып. 24. Якутская АССР. Ч. 2. Температура воздуха и почвы. Л., Гидрометеиздат, 1966, 403 с.
- Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. М., Недра, 1978, 287 с.
- Юдович Я.Э. Геохимия марганца / Я.Э. Юдович, М.П. Кетрис. Сыктывкар, Геопринт, 2014, 538 с.
- Bronk R.C. Bayesian analysis of radiocarbon dates // Radiocarbon, 2009, vol. 51, iss. 1, p. 337–360.
- Hansson M. The Renland ice core. A Northern Hemisphere record of aerosol composition over 120,000 years // Tellus, 1994, vol. 46B, p. 390–418.
- Mayewski P.A. GISP2 Ions: Deep (D) Core. PANGAEA, 1999, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.55537>
- 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.
- Murton J.B., Goslar T., Edwards M.E. et al. Palaeoenvironmental interpretation of Yedoma Silt (Ice Complex) deposition as cold-climate loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia // Permafrost and Periglacial Processes, 2015, vol. 26, p. 208–288, DOI: 10.1002/ppp.1843.
- 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) // Clim. Past., 2017, vol. 13, p. 587–611.
- Pitulko V.V., Nikolsky P.A., Girya E.Y. et al. The Yana RHS site: humans in the Arctic before the Last Glaciation // Science, 2004, vol. 303, p. 52–56.
- Rasmussen S.O., Abbott P.M., Blunier T. et al. A first chronology for the North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM) ice core // Clim. Past, 2013, vol. 9, p. 2713–2730, DOI: 10.5194/cp-9-2713-2013.
- 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.
- Wetterich S., Kuzmina S., Andreev A.A. et al. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, Northeast Siberia,

Russia // Quatern. Sci. Rev., 2008, vol. 27, iss. 15–16, p. 1523–1540.

Wetterich S., Tumskey V., Rudaya N. et al. Ice Complex formation in arctic East Siberia during the MIS3 Interstadial // Quatern. Sci. Rev., 2014, vol. 84, p. 39–55.

URL: <http://ru.climate-data.org/> азия/российская-федерация/республика-саха-якутия/ (дата обращения: 03.07.2019).

References

Anisimova N.P. Kriogidrokhimicheskiye osobennosti myorzloi zony [Cryohydrochemical Features of the Frozen Zone]. Novosibirsk, Nauka, 1981, 153 p. (in Russian).

Vasil'chuk A.C. Appearance of Heinrich events in radiocarbon dated pollen diagrams of ice wedges and its surrounding yedoma sediments of the lower Kolyma river. Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere], 2003, vol. VII, No. 4, p. 3–13 (in Russian).

Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Yu.K. The pollen features and age of sediments and ice wedges in the Gyda River mouth. Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic], 2018, No. 1, p. 97–121, DOI: 10.7256/2453-8922.2018.1.25949 (in Russian).

Vasil'chuk Yu.K. Isotope-geochemical characteristics of the Late Pleistocene ice-wedge complex of Kular depression. Trudy AN SSSR. Otdeleniye Nauk o Zemle [Transactions of the USSR Academy of Sciences. Earth Science Department], 1990, vol. 310, No. 1, p. 154–157 (in Russian).

Vasil'chuk Yu.K. Izotopno-kislorodniy sostav povtorno-zhilnykh ldov (opyt paleogeokriologicheskikh rekonstruktsiy) [Oxygen-isotope composition of ground ice (Application to paleogeocryological reconstructions)]. Moscow, Theoretical Problems Department of the Russian Academy of Science, Moscow State University, Research Institute of Engineering for Construction (PNIIS), 1992, vol. 1, 420 p.; vol. 2, 264 p. (in Russian).

Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk J.Yu. Heavy metals and trace elements in the Late Pleistocene ice wedge of Northern Yakutia. Arktika i Antarktika [Arctic and Antarctic], 2017, No. 1, p. 23–37, DOI: 10.7256/2453-8922.2017.1.22232 (in Russian).

Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C. The engineering-geological and geochemical features of the polygonal landscapes of Bely Island (Kara Sea). Inzhenernaya Geologiya [Engineering Geology], 2015, No. 1, p. 50–65 (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. Syngenetic ice wedges and age of slope yedoma deposits on the foothill of the Kular ridge. Earth's Cryosphere, 2020, vol. XXIV, No. 2, p. 3–14.

Health standard 2.1.5.1315-03. Predelno dopustimiye kontsentratsiyi khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh ob'yektov khozyaistvenno-pityevogo i kulturno bytovogo vodopolzovaniya [Maximum allowable concentrations of chemicals in the water of water objects used for drinking and domestic-recreation purposes]. Minzdrav RF. Moscow, 2003, 152 p. (Registered in the Justice Ministry of Russia 19.05.2003 No. 4550) (in Russian).

Laptev E.M., Kaverin D.A., Pastukhov A.V. et al. Landscape-biogeographical aspects of the accumulation and migration of heavy metals in the soils of the Arctic and Subarctic of the European Northeast. In: Proc. of the Komi Scientific Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015, No. 3 (23), p. 47–60 (in Russian).

Pavlova E.Y., Ivanova V.V., Meyer H., Pitulko V.V. The isotope compositions of fossil ice as an indicator for palaeoclimate changes in the northern New Siberian Islands and in the west of the Yana-Indigirka Lowland. In: Fundamental problems of

the Quaternary, results of research and prospects of future studies. Proc. of the Ninth Conf. on the Quaternary (Irkutsk, Sept. 15–20, 2015). Irkutsk, Izdatelstvo Instituta Geografiyi, 2015, p. 349–351 (in Russian).

Soloviev M.N., Fedyanin A.N., Sorokina K.M. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsiyi masshtab 1:200,000. Verkhoyanskaya seriya. List R-53-XV, XVI – Kular. Poyasnitelnaya zapiska [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Verkhoyanskaya series. Sheet R-53-XV, XVI – Kular. Explanatory note]. 2nd edition. Bagtagay, State Unitary Enterprise "Yangeology", 2003, 177 p. (in Russian).

Spravochnik po klimatu SSSR. Yakutskaya ASSR. Ch. 2. Temperatura vozdukh i pochvy [Reference Book of the USSR Climate. Issue 24. Yakutsk ASSR. Part 2. Air and Soil Temperature]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1966, 403 p. (in Russian).

Shvartsev S.L. Gidrogeokhimiya zony gipergeneza [Hydrogeochemistry of the Hypergenesis Zone]. Moscow, Nedra, 1978, 287 p. (in Russian).

Yudovich Y.E., Ketris M.P. Geokhimiya margantsa [Geochemistry of the Manganese]. Syktyvkar, Geoprint, 2014, 538 p. (in Russian).

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

Hansson M. The Renland ice core. A Northern Hemisphere record of aerosol composition over 120,000 years. Tellus, 1994, vol. 46B, p. 390–418.

Mayewski P.A. GISP2 Ions: Deep (D) Core. PANGAEA, 1999, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.55537>

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.

Murton J.B., Goslar T., Edwards M.E. et al. Palaeoenvironmental interpretation of Yedoma Silt (Ice Complex) deposition as cold-climate loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia. Permafrost and Periglacial Processes, 2015, vol. 26, p. 208–288, DOI: 10.1002/ppp.1843.

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.

Pitulko V.V., Nikolsky P.A., Giryay E.Y. et al. The Yana RHS site: humans in the Arctic before the Last Glaciation. Science, 2004, vol. 303, p. 52–56.

Rasmussen S.O., Abbott P.M., Blunier T. et al. A first chronology for the North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM) ice core. Climate of the Past, 2013, vol. 9, p. 2713–2730.

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.

Wetterich S., Kuzmina S., Andreev A.A. et al. Palaeoenvironmental dynamics inferred from late Quaternary permafrost deposits on Kurungnakh Island, Lena Delta, Northeast Siberia, Russia. Quatern. Sci. Rev., 2008, vol. 27, iss. 15–16, p. 1523–1540.

Wetterich S., Tumskey V., Rudaya N. et al. Ice complex formation in arctic East Siberia during the MIS3 Interstadial. Quatern. Sci. Rev., 2014, vol. 84, p. 39–55.

URL: <http://ru.climate-data.org/> азия/российская-федерация/республика-саха-якутия/ (last visited: 03.07.2019).

*Поступила в редакцию 4 апреля 2019 г.,
после доработки – 28 октября 2019 г.,
принята к публикации 23 декабря 2019 г.*