

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КРИОЛОГИИ ЗЕМЛИ

УДК 551.345:551.345.3:551.89:902.66

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2018-5(3-19)

**ЗИМНИЕ ПАЛЕОТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В НИЗОВЬЯХ КОЛЫМЫ
30–12 ТЫСЯЧ ЛЕТ НАЗАД ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗУЧЕНИЯ
ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ЕДОМЫ ПЛАХИНСКОГО ЯРА****Ю.К. Васильчук^{1,2}, А.К. Васильчук¹**¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический и геологический ф-ты, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; vasilch_geo@mail.ru²Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия

Рассмотрены особенности строения и состава позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов в обнажении Каретовской едомы, расположенном у зимовья Плахино на берегу Стадухинской протоки р. Колымы. Исследован изотопный состав ледяных жил, их радиоуглеродный возраст, гидрохимические и палинологические особенности. Выполнены количественные оценки изменения палеогеокриологических и палеоклиматических характеристик региона в позднем неоплейстоцене 30–12 тыс. лет назад. Подтвержден вывод о существенно более суровых зимах, господствовавших здесь 30–28 тыс. лет назад.

Повторно-жильные льды, поздний неоплейстоцен, многолетнемерзлые породы, едома, изотопы кислорода, радиоуглеродный возраст, пыльца и споры, гидрохимия, Плахинский Яр, северо-восток Якутии

**WINTER AIR PALEOTEMPERATURES AT 30–12 KA BP IN THE LOWER KOLYMA RIVER,
PLAKHINSKII YAR YEDOMA: EVIDENCE FROM STABLE ISOTOPES****Yu.K. Vasil'chuk^{1,2}, A.C. Vasil'chuk¹**¹Lomonosov Moscow State University, Faculties of Geography and Geology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; vasilch_geo@mail.ru²Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia

A continuous 15–18 m long sequence of permafrost with ice wedges at the Plakhinskii Yar site (Karetovo yedoma, left side of the Stadukhin Channel, lower Kolyma River) has been studied in terms of structure, stable isotopes, radiocarbon ages, major ion chemistry, and spore-pollen spectra. The obtained data allow quantitative estimates of Late Pleistocene permafrost and climate conditions in the area between 30 and 12 ka BP. The study confirms the previous inference that local winters at 30–28 ka BP were much colder than at present.

Ice wedge, Late Pleistocene, permafrost, yedoma, oxygen isotope, radiocarbon, pollen and spores, water chemistry, Plakhino site, northeastern Yakutia

ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящей работы: рассмотреть особенности строения и состава позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов в обнажении Каретовской едомы, расположенном у зимовья Плахино на берегу Стадухинской протоки р. Колымы; исследовать их изотопный состав, радиоуглеродный возраст; изучить гидрохимические и палинологические особенности; оценить изменения палеогеокриологических и палеоклиматических характеристик в позднем неоплейстоцене 30–12 тыс. лет назад в этом регионе.

Обнажение едомных отложений на берегу Стадухинской протоки отличается от других разрезов в низовьях Колымы как криолитологическим строением, отражающим особенности Каретовской едомы (плоского мерзлого массива с абсо-

лютными отметками 20–22 м между Стадухинской протокой и Халерчинской тундрой), так и расположением в пределах реликтового леса, характеризующегося особым микроклиматом и растительностью. Именно этот реликтовый лес послужил источником строительного материала для Стадухинского острога – уникального памятника русской истории и культуры периода освоения Колымы и севера Якутии. Древнее Стадухинское поселение обнаружено к юго-западу от пос. Черский по левому берегу р. Колымы. Памятник датируется серединой XVII – серединой XVIII в. [Жарников и др., 2013]. В разные годы разрез едомы Плахинского Яра изучали геокриологи Д.А. Гиличинский, С.А. Зимов, Н.Н. Кудрявцева, М.О. Лейбман, Д.В. Михалев, А.А. Сашов и группа

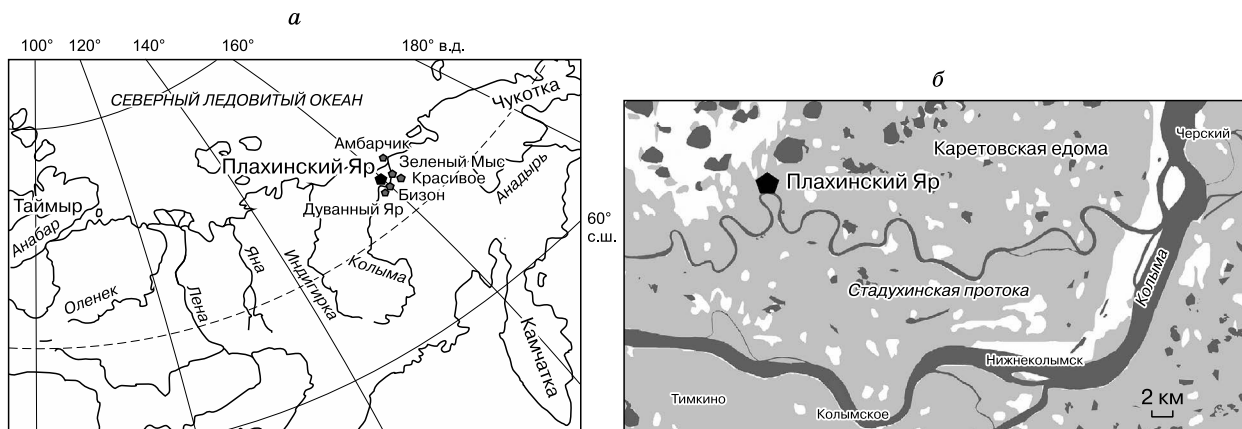


Рис. 1. Расположение разреза Плахинский Яр на северо-востоке Якутии (а) и более точное – на берегу Стадухинской протоки р. Колымы (б – основа из Google Map).

японских исследователей под руководством профессора М. Фукуды [Михалев и др., 2012; Fukuda et al., 1997].

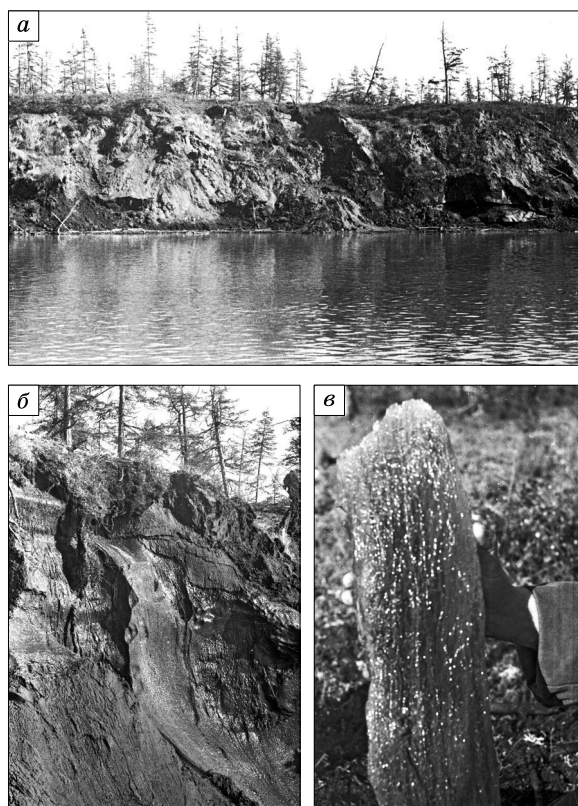


Рис. 2. Сингенетические позднеоплейстоценовые повторно-жильные льды в обнажении едомы Плахинского Яра (14–18-метровая терраса), Стадухинская протока на р. Колыме.

а – общий вид; б – верхняя часть повторно-жильного льда; в – текстура позднеоплейстоценового повторно-жильного льда. Фото Ю. Васильчука.

СТРОЕНИЕ И СОСТАВ ИССЛЕДОВАННЫХ ЕДОМНЫХ ТОЛЩ

Позднеоплейстоценовые отложения, заметно отличающиеся в криолитологическом аспекте от большинства едомных толщ низовий Колымы (Дуванного Яра, Зеленого Мыса, Усть-Омолонского и др.) строением и параметрами ледяных жил, исследованы в обнажении Плахинский Яр на левом берегу протоки Стадухинская (рис. 1, а). Здесь невысокое (14–18 м) обнажение вскрывает толщу Каретовской едомы (68°40'43.8" с.ш., 160°17'6.6" в.д., см. рис. 1, б).

Состав и криолитологические особенности едомной толщи. Толща, вскрытая в обнажении Плахинского Яра, льдистая (до 45 %) с редко- и неполносетчатой тонкошлировой криотекстурой. Основная часть разреза (рис. 2, а) представлена преимущественно тяжелой и средней супесью мощностью более 15 м с включениями растительных остатков. В толще супеси встречаются слабо выраженные линзы песка. В отличие от других разрезов ледового комплекса, в обнажении Плахинский Яр отмечены узкие ледяные жилы, образующие два яруса. Головы ледяных жил верхнего яруса залегают на глубинах 1.2–1.8 м (см. рис. 2, б), нижнего – на глубине 8.5 м. Ширина жил обоих ярусов в верхней части составляет примерно 1–1.5 м, они располагаются на расстоянии 3–4 м друг от друга. В верхней части обнажения, примерно на глубинах 6 и 9 м, есть признаки циклического роста жил – горизонтальные плечики шириной 0.5–0.6 м, которые, как правило, явно выражены только с одной стороны жилы. Нижний ярус повторно-жильных льдов (ПЖЛ) по параметрам близок к верхнему: ширина не превышает 1.8 м, видимая мощность 4.5 м, хвосты жил уходят под урез реки. Общая протяженность жильной системы по вертикали составляет более 14 м. Лед жил обычно вертикально-слоистый (см. рис. 2, в), серый.

**РЕЗУЛЬТАТЫ
АНАЛИТИЧЕСКИХ ОПРЕДЕЛЕНИЙ**

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. Несмотря на сравнительно малое количество органики, сосредоточенной главным образом в основании разреза и в сильно рассеянном виде встречающейся в средней части толщи, удалось определить время начала образования видимой части разреза – в интервале 30–27 тыс. лет назад (табл. 1). Даты в нижней части толщи достаточно надежны, так как образцы органического материала были подготовлены в полевых условиях разными способами и показали непротиворечивые результаты.

Один из образцов непосредственно отмывали от супеси и песка в поле в воде, полученной при таянии льда жил, затем высушивали. Два других образца просто подсушивали перед транспортировкой. В средней части толщи датировка 21.5 тыс. лет получена по корешкам с глубины чуть более 6 м, которые отбирали вручную.

AMS-датировки микровключений органики, непосредственно экстрагированной из ледяных жил, выполнялись в лаборатории ускорительной масс-спектрометрии Сеульского национального университета при содействии проф. Й.-Ч. Кима (табл. 2). Полученные AMS-датировки (SNU) микровключений органики изо льда непротиворечивы и вполне согласуются с датировками по вмещающим отложениям. Так, на глубине 8.6 м датировка изо льда составила 21.4 тыс. лет, это очень хорошее совпадение с датировкой из вмещающих отложений 21.5 тыс. лет на глубине 6 м

Таблица 1. **Радиоуглеродные датировки органического материала из едомных сингенетических позднеоплейстоценовых отложений, вмещающих ПЖЛ в разрезе Плахинский Яр***

Полевой номер	Абс. высота, м	Глубина, м	¹⁴ C-возраст, лет	Лабораторный индекс	Вид датированной органики
311-YuV/59	1.0	13	26 000 ± 1100	ГИН-3980	Корешки
311-YuV/60	1.5	12.5	27 000 ± 800	ГИН-3981	Корешки
311-YuV/71	1.0	13	31 500 ± 1100	ГИН-3983	Корешки с остатками жуков и шишек
NK-1**	8.0	6	21 500 ± 1100	ГИН-4334	Корешки

* 14–18-метровая терраса в низовьях р. Колымы.

** Отбор Н. Кудрявцевой.

Таблица 2. **Радиоуглеродные AMS-датировки органических микровключений из сингенетических позднеоплейстоценовых ПЖЛ в разрезе Плахинский Яр***

Полевой номер	Глубина, м	¹⁴ C-возраст, лет	Лабораторный индекс	δ ¹³ C органики, ‰
311-YuV/18	3.9	11 490 ± 80	SNU02-130	-30.4
311-YuV/6	3.9	13 130 ± 130	SNU02-129	-23.3
311-YuV/21	4.5	17 390 ± 200	SNU01-281	-40.4
311-YuV/29	8.6	21 400 ± 300	SNU02-131	-25.9

* 14–18-метровая терраса в низовьях р. Колымы.

Таблица 3. **Радиоуглеродные датировки органического материала из едомных сингенетических позднеоплейстоценовых отложений, вмещающих ПЖЛ в разрезе Плахинский Яр* [Fukuda et al., 1997]**

Полевой номер	Материал	Глубина, м	¹⁴ C-возраст, лет	Лабораторный индекс	δ ¹³ C органики, ‰
Sl-12	Веточки	3.32	20 680 ± 310	NUTA-4555	-28.00
Sl-11	Веточки	3.70	20 583 ± 982	NUTA-4273	-26.26
Sl-7	Веточки	5.51	22 280 ± 490	NUTA-4559	-24.39
Sl-2	Веточки	7.08	24 271 ± 973	NUTA-4272	-28.98
B-2	Ребро парнокопытного	8.57	29 300 ± 630	NUTA-4560	-20.37
S2-2	Веточки	9.38	27 290 ± 1110	NUTA-4558	-26.62

* Едомная толща, 68°40'43.8" с.ш., 160°17'6.6" в.д.

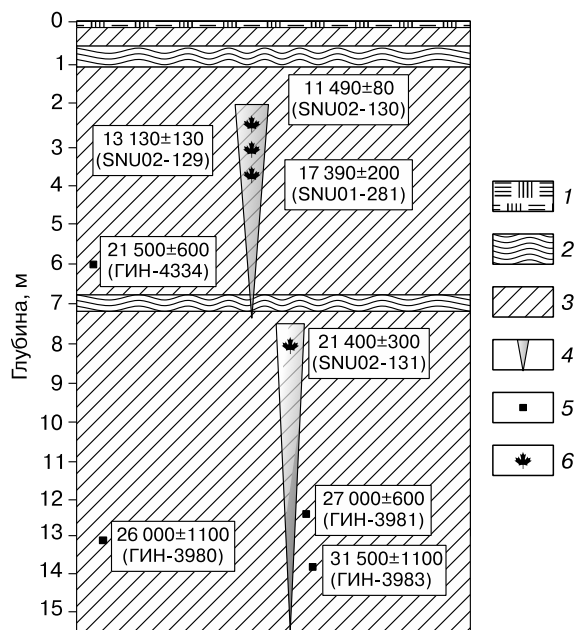


Рис. 3. Радиоуглеродные датировки вмещающих отложений и AMS ¹⁴C-датировки льда в разрезе Плахинского Яра:

1 – торф; 2 – песок; 3 – супесь с корешками и аллохтонным торфом; 4 – сингенетические ПЖЛ; 5 – точки отбора образцов из вмещающих жилы отложений на радиоуглеродный анализ; 6 – точки отбора льда жил на AMS ¹⁴C-анализ.

(см. табл. 1). Вполне вероятно, что около 21.5 тыс. лет назад лед проникал в жилы по морозобойной трещине на 2.0–2.5 м. Из повторно-жильного льда

на глубине 4.5 м получена дата 17.39 тыс. лет, а на глубине около 3.9 м – 11.49 тыс. лет (см. табл. 2).

Для контроля возрастных определений привлечены также данные радиоуглеродного AMS-датирования (NUTA) органического материала из едомных сингенетических позднеплейстоценовых отложений, вмещающих ПЖЛ в разрезе Плахинский Яр, отобранного М. Фукудой с соавт. [Fukuda et al., 1997] (табл. 3). Обе серии датировок показали очень хорошее совпадение. Калиброванный возраст отложений продемонстрировал близкие интервалы (рис. 3, 4, а) для разных лет отбора органики, что позволяет сделать вывод о надежном датировании изученной едомной толщи и о ее монотонном сложении. Начало накопления едомной толщи можно отнести с большой долей вероятности к 32 тыс. кал. лет назад.

С использованием принципа выбора наиболее молодой датировки [Vasil'chuk, Vasil'chuk, 2017], а также прямого датирования ледяных жил по микроорганическим включениям (см. рис. 3, 4, б) показано, что начало формирования вскрытой нижней части жил произошло около 27–25 тыс. кал. лет назад, а завершение накопления едомной толщи и жил – не позднее 12 тыс. кал. лет назад. Таким образом, датирование разреза вполне надежно. Основываясь на полученных радиоуглеродных датировках, можно определить скорость накопления толщи как высокую, примерно 1.3 м за одну тысячу лет.

Гидрогеохимические особенности повторно-жильных льдов и вмещающих отложений. Определения содержания водорастворимых солей во

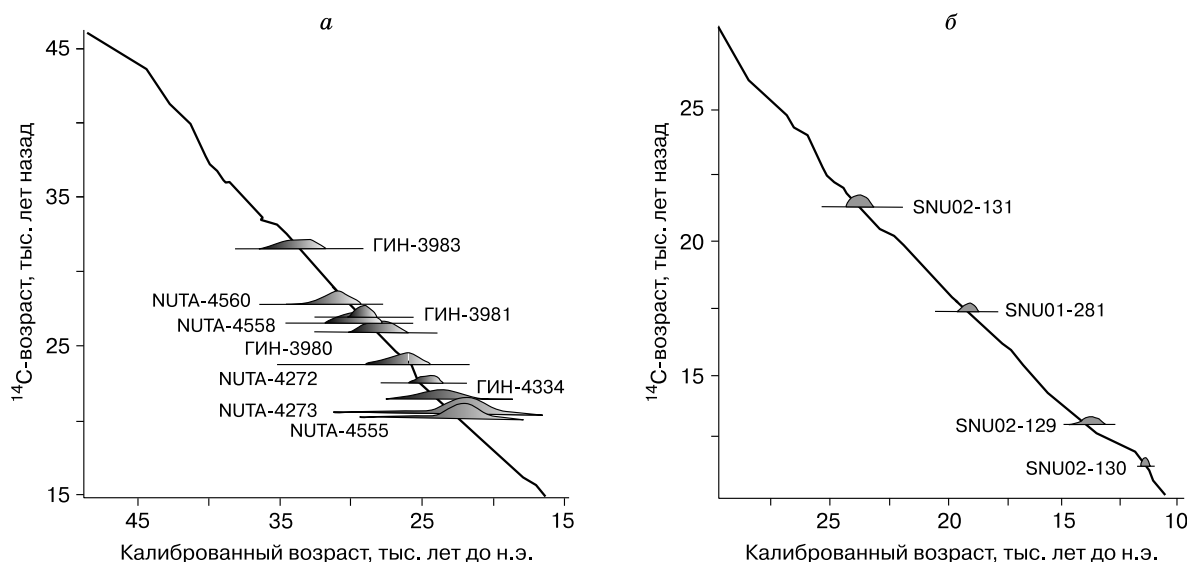


Рис. 4. Калиброванный радиоуглеродный возраст отложений едомы Плахинского Яра (а) и ПЖЛ (б):

а – полученный по образцам корешков стандартным методом (ГИН, радиоуглеродная лаборатория Геологического института РАН) и методом ускорительной масс-спектрометрии (NUTA, тандетронный AMS центр геохронологических исследований университета г. Нагоя, Япония); б – полученный по микроорганическим включениям методом ускорительной масс-спектрометрии (SNU, лаборатория ускорительной масс-спектрометрии Сеульского университета, Корея).

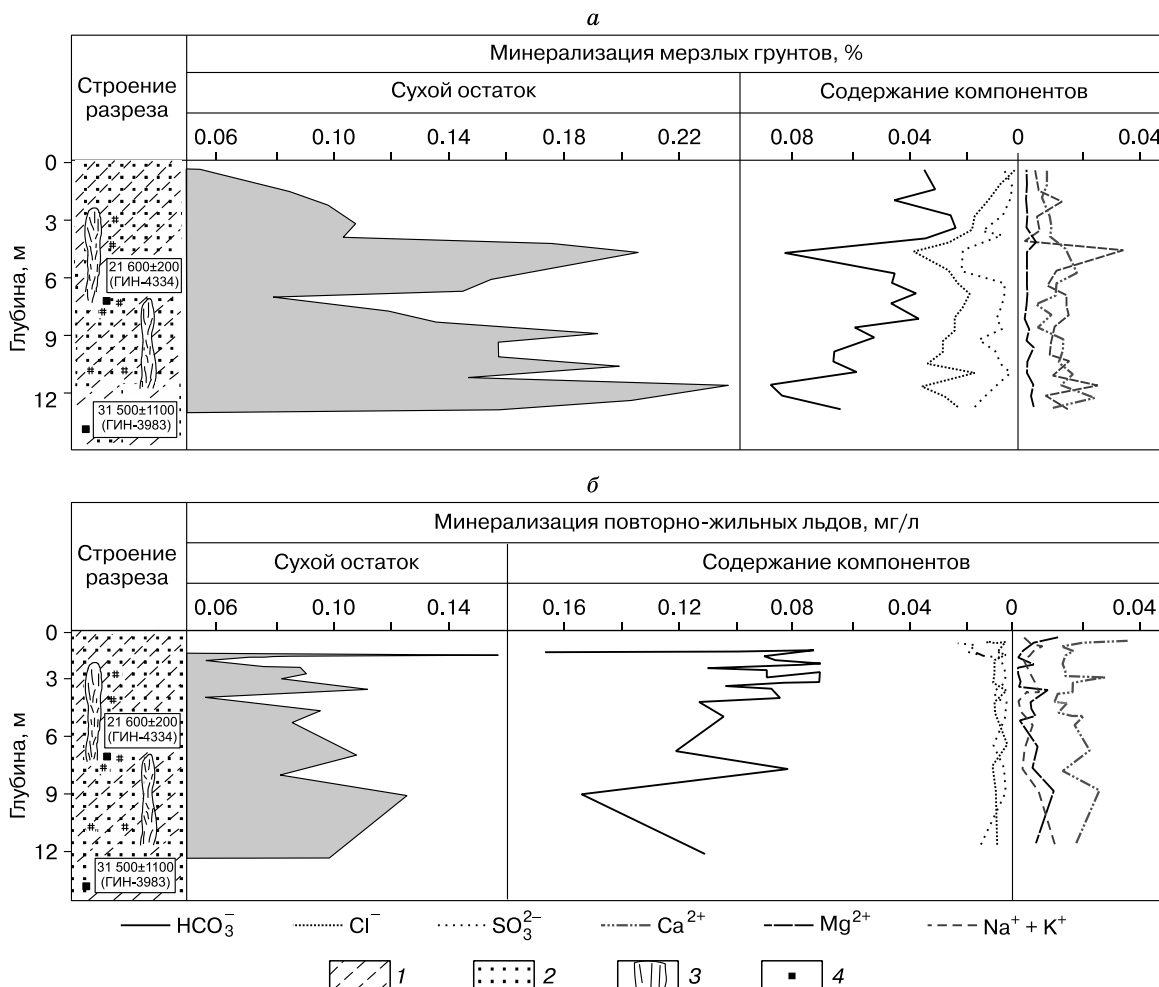


Рис. 5. Геохимические диаграммы едомных отложений разреза Плахинский Яр (а) и сингенетических повторно-жильных льдов (б):

1 – сугесь с корешками и аллохтонным торфом; 2 – песок; 3 – ПЖЛ; 4 – точки отбора проб на ^{14}C -анализ.

льдах и вмещающих едомных отложениях выполнены титрованием в лаборатории ПНИИИС. Распределение солей по вертикали во вмещающих отложениях характеризуется наличием двух четких пиков на глубинах около 12 и 4,5 м, где сухой остаток превышает 0,2 % (рис. 5, а, табл. 4). Важно, что эти пики представлены не единичными образцами, а сериями. Обращает на себя внимание и заметное присутствие хлоридов во вмещающих отложениях, собственно кульминация которых совместно с гидрокарбонатами составляет основную долю в указанных двух максимумах минерализации. В нижней части разреза едомы отмечается преобладание хлоридов над сульфатами, соотношение между этими ионами (ммоль/л) постепенно снижается с 6,4 в нижней части разреза до 1,0 в верхней части (рис. 6, а). Всего для датированного периода формирования едомных отложений отмечено четыре циклических колебания этого соотно-

шения: в интервале 9,5–11,4 м – от 6,40 до 4,5, в интервале 9,4–6,5 м – от 2,0 до 3,67, в интервале 6,3–3,3 м – от 1,05 до 3,43 и в интервале 3,1–0,7 м – от 1,0 до 3,0. Циклическость в распределении минерализации льда жил выражена менее четко, с гораздо менее заметной амплитудой (см. рис. 5, б, табл. 5). Здесь также наблюдается тенденция уменьшения содержания сухого остатка в целом снизу вверх по разрезу. В нижней части преобладают значения сухого остатка в диапазоне 110–150 мг/л, вверху чаще 80–100 мг/л. Однако в самой верхней части отмечен экстремум минерализации – 188 мг/л. Преобладание гидрокарбонатов в составе солей в ледяных жилах заметнее, чем во вмещающих породах. Очень невелико содержание хлоридов, которое, как правило, уступает содержанию сульфатов. Соотношение хлоридов и сульфатов (ммоль/л) циклически изменяется в пределах 0,4–1,6 (см. рис. 6, б), эти значения свидетель-

Таблица 4. Состав и содержание водорастворимых солей в сингенетических едомных позднеоплейстоценовых отложениях в разрезе Плахинский Яр*

Номер образца	Глубина отбора, м	Сухой остаток, %	Состав компонентов, %						pH
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺⁺ K ⁺	
311-YuV/46	0.7	0.057	0.033	0.004	0.004	0.007	0.003	0.003	7.43
311-YuV/47	1.4–1.5	0.082	0.030	0.008	0.004	0.007	0.002	0.003	7.22
311-YuV/49	2.05–2.15	0.097	0.045	0.012	0.004	0.007	0.002	0.014	7.28
311-YuV/50	3.1	0.108	0.025	0.014	0.007	0.010	0.004	0.007	7.10
311-YuV/51	3.8–3.9	0.101	0.023	0.015	0.014	0.010	0.003	0.006	7.66
311-YuV/52	3.9–4.0	0.172	0.031	0.024	0.007	0.009	0.008	0.002	7.54
311-YuV/53	4.9	0.208	0.082	0.040	0.022	0.017	0.005	0.036	7.81
311-YuV/54	6.3	0.155	0.043	0.022	0.021	0.019	0.003	0.012	7.48
311-YuV/55	6.7–6.8	0.143	0.043	0.017	0.006	0.013	0.003	0.010	7.54
311-YuV/56	7.0–7.1	0.078	0.036	0.016	0.005	0.013	0.003	0.014	7.45
311-YuV/57	7.8–7.9	0.118	0.045	0.019	0.006	0.006	0.004	0.014	7.30
311-YuV/58	8.5–8.6	0.135	0.036	0.023	0.009	0.011	0.003	0.017	6.94
311-YuV/61	9.2–9.3	0.192	0.061	0.022	0.006	0.008	0.006	0.011	7.77
311-YuV/62	9.4–9.5	0.157	0.051	0.028	0.014	0.018	0.004	0.015	7.13
311-YuV/63	10.0–10.1	0.157	0.065	0.025	0.009	0.017	0.005	0.015	7.02
311-YuV/64	10.5–10.6	0.206	0.064	0.032	0.005	0.015	0.003	0.017	7.82
311-YuV/65	11.0–11.1	0.146	0.056	0.016	0.003	0.021	0.004	0.011	7.88
311-YuV/66	11.3–11.4	0.236	0.084	0.036	0.008	0.018	0.005	0.029	7.20

* 14–18-метровая терраса в низовьях р. Колымы.

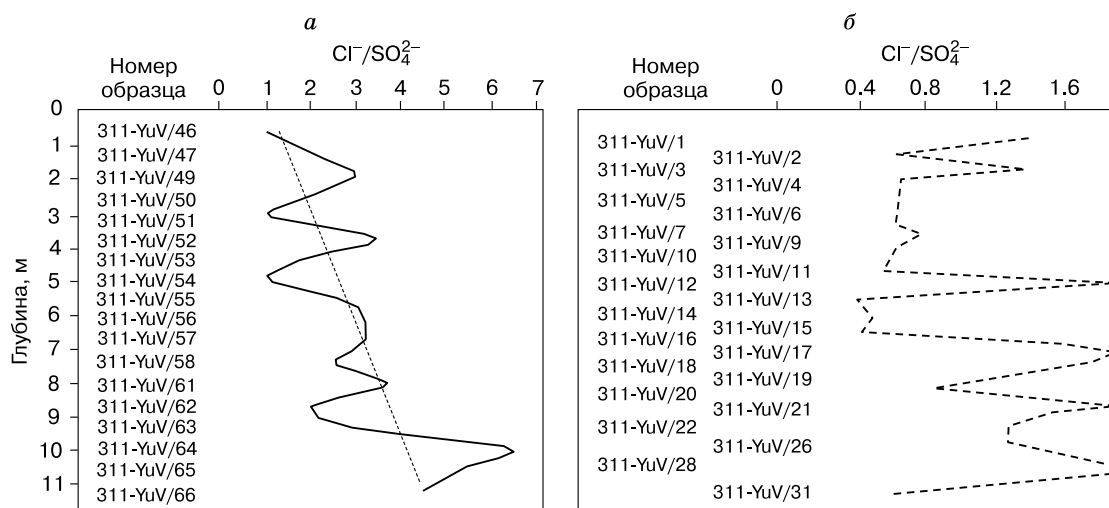


Рис. 6. Соотношение хлоридов и сульфатов в едомных отложениях (а) и в ПЖЛ в разрезе Плахинский Яр (б).

ствуют о формировании льда из воды преимущественно атмосферного происхождения.

Палинологическая характеристика повторно-жильных льдов и вмещающих отложений. Спорово-пыльцевая диаграмма едомной толщи Плахинского Яра построена по 46 образцам: 30 образцов из вмещающих отложений и 16 – непосредственно из повторно-жильных льдов (рис. 7). Расчет компонентов производился от суммы пыльцы и спор. Палиноспектры отложений едомы пред-

ставлены в основном локальными компонентами. Спорово-пыльцевая диаграмма вмещающих отложений характеризуется довольно монотонным распределением по вертикали – во всех образцах преобладает пыльца трав и кустарничков (от 73 до 96 %). Причем основную роль играет плохо определяемая деформированная и недоразвитая пыльца двудольных. Среди спор встречается в основном *Selaginella sibirica*, участие спор сфагновых и зеленых мхов единично. В целом по разрезу пре-

Таблица 5. Состав и содержание водорастворимых солей в ПЖЛ в разрезе Плахинский Яр*

Номер образца	Глубина отбора, м	Сухой остаток, мг/л	Состав компонентов, ммоль/л						pH
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	
311-YuV/1	1.8–2.0	86.0	1.20	0.18	0.12	0.75	0.50	0.18	6.83
311-YuV/2	1.5–1.6	188.0	2.65	0.24	0.43	1.99	1.22	0.14	7.22
311-YuV/3	1.8–2.0	98.0	1.35	0.20	0.14	0.88	0.42	0.26	6.81
311-YuV/4	1.8–2.0	106.0	1.15	0.22	0.34	0.73	0.42	0.35	13.8
311-YuV/5	1.8–2.0	104.0	1.45	0.16	0.26	0.95	0.64	0.20	6.92
311-YuV/6	1.8–2.0	90.0	1.10	0.16	0.26	0.83	0.47	0.16	6.95
311-YuV/7	1.8–2.0	116.0	1.57	0.22	0.28	1.13	0.63	0.21	7.15
311-YuV/9	2.15–2.30	98.0	1.43	0.16	0.22	1.00	0.61	0.15	7.15
311-YuV/10	2.15–2.30	108.0	1.40	0.14	0.29	0.97	0.50	0.24	7.12
311-YuV/11	2.15–2.30	90.0	1.12	0.12	0.19	0.78	0.46	0.14	6.83
311-YuV/12	2.15–2.30	82.0	1.12	0.21	0.10	0.71	0.38	0.22	6.64
311-YuV/13	2.15–2.30	108.0	1.76	0.08	0.22	1.21	0.67	0.15	7.15
311-YuV/14	2.70–2.90	114.0	1.43	0.18	0.28	0.97	0.59	0.22	7.10
311-YuV/15	2.70–2.90	114.0	1.55	0.14	0.26	1.12	0.61	0.16	7.06
311-YuV/16	2.70–2.90	102.0	1.33	0.24	0.14	0.99	0.38	0.22	7.26
311-YuV/17	2.70–2.90	128.0	2.04	0.19	0.09	1.61	0.41	0.22	7.09
311-YuV/18	3.9–4.1	140.0	1.68	0.25	0.14	0.71	1.19	0.14	6.95
311-YuV/19	3.9–4.1	106.0	1.37	0.16	0.17	0.80	0.69	0.16	6.59
311-YuV/20	3.9–4.1	88.0	1.33	0.20	0.09	0.88	0.50	0.16	7.28
311-YuV/21	5.0–5.2	116.0	1.69	0.20	0.12	1.04	0.63	0.24	7.22
311-YuV/22	5.0–5.2	126.0	1.83	0.18	0.14	1.12	0.78	0.19	7.39
311-YuV/26	7.1–7.2	138.0	1.99	0.22	0.17	1.40	0.72	0.20	7.43
311-YuV/28	8.1–8.2	102.0	1.27	0.21	0.10	0.70	0.69	0.14	6.98
311-YuV/31	9.4–9.5	156.0	2.44	0.21	0.10	1.54	0.95	0.21	6.86
311-YuV/39	12.2–12.3	128.0	1.74	0.20	0.26	1.16	0.61	0.29	7.44

* 14–18-метровая терраса в низовьях р. Колымы.

обладает недоразвитая трехбороздная пыльца травянистых растений, ее содержание колеблется от 52.8 до 91.0 %. Однако такая недоразвитая пыльца в палиноспектрах при отсутствии благоприятных тафономических условий не сохраняется, в современных пробах ее нет, но зато в образцах свежевыпавшего в августе снега в окрестностях разреза Дуванный Яр она встречена в количестве 12–23 %. Наличие такой недозрелой пыльцы в отложениях, очевидно, говорит о том, что пыльца попадала в отложения, которые переходили в многолетне-мерзлое состояние достаточно быстро. Это, скорее всего, свидетельствует об очень коротком вегетационном сезоне, в течение которого пыльца трав практически не успевала созреть. Вероятно, сочетание этих двух факторов (короткого вегетационного периода и высокой скорости накопления отложений) и обусловило специфику палиноспектров едомы Плахинского Яра. Таким образом, высокое содержание недоразвитой пыльцы связано с тем, что переход температуры грунта через нуль происходил в период цветения, недоразвитая пыльца не успевала разрушиться, как обычно происходит при более длительном сезоне вегетации.

Содержание механически поврежденных пыльцевых зерен и спор в диапазоне 8–15 % показывает, что отложения накапливались в условиях поймы. Стабильные значения концентрации пыльцы и спор свидетельствуют о довольно высокой продуктивности фитоценозов пойменных лугов времени формирования Каретовской едомы. Короткий, но достаточно теплый, чтобы обеспечить бурный рост трав, вегетационный период, обусловил широкое развитие пойменных лугов. На спорово-пыльцевой диаграмме вмещающих отложений выделяются два максимума содержания недоразвитой трехбороздной пыльцы: в интервале 9.5–12.5 м (временной интервал приблизительно 24–21 тыс. лет назад) и на глубине 4–6 м (приблизительно 17–14 тыс. лет). В эти временные промежутки большая часть пыльцы травянистых растений не успевала вызреть, при этом скорость накопления едомных отложений была высокой. Имеются также признаки улучшения условий вегетации. На глубине 6.3 м в прослое песка встречены пыльцевые зерна лиственницы (4 экз.). Пыльца лиственницы единично обнаружена также в жилах верхнего яруса на глубине 8.1–9.4 м (табл. 6), это

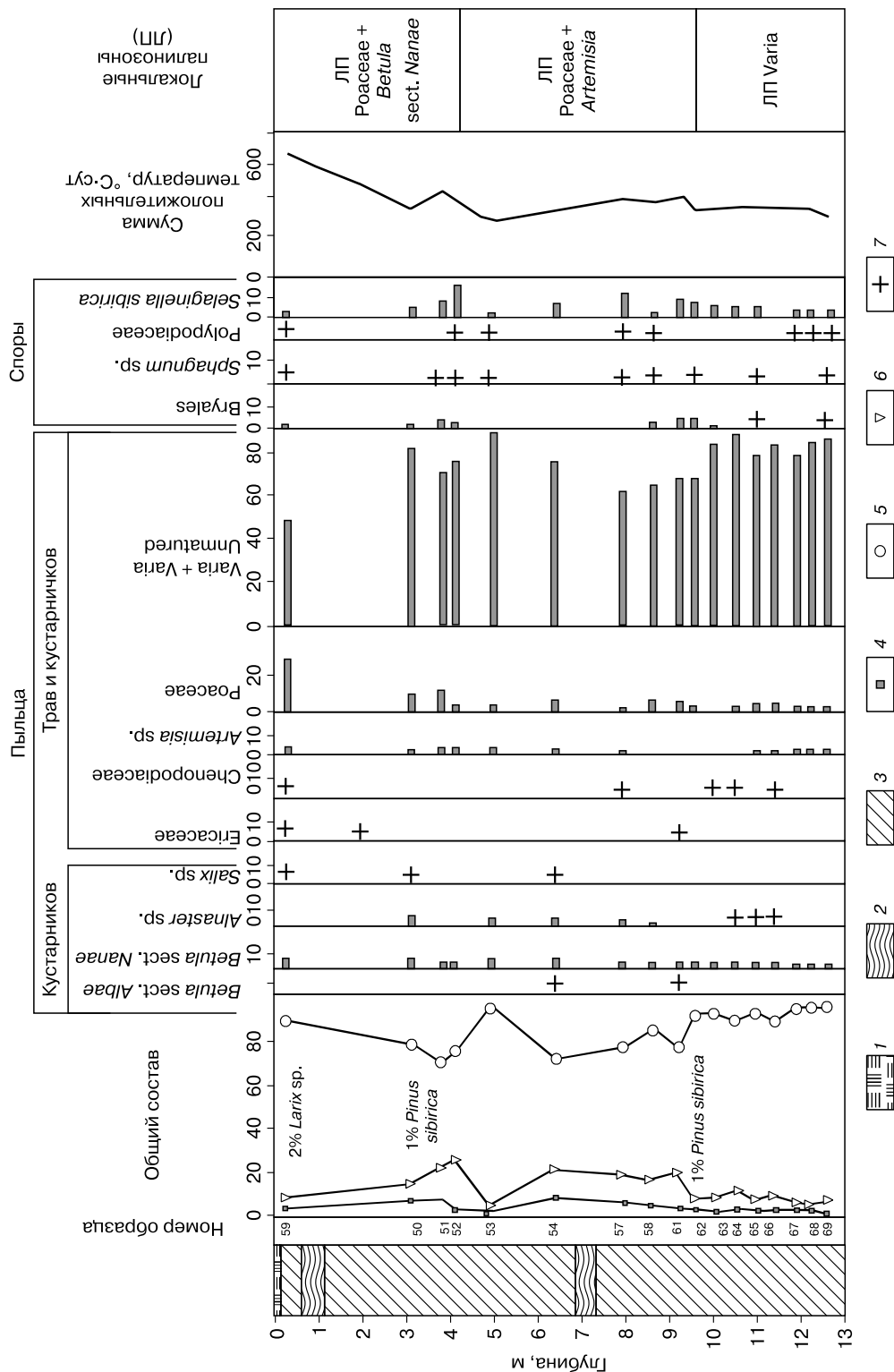


Рис. 7. Спорово-пыльцевая диаграмма едомных отложений в разрезе Плахинский Яр:

1 – торф и растительные остатки; 2 – песок; 3 – сугесь с корешками и аллохтонным торфом. Содержание (%): 4 – пыльцы кустарничков, 5 – пыльцы трав и кустарничков; 6 – спор; 7 – содержание не более 1 %.

Таблица 6. Состав пыльцы и спор (%) в образцах, датированных по микроорганке, в позднеплейстоценовых повторно-жильных льдах разреза Плахинский Яр*

ПЖЛ	Номер образца										
	311-YuV/13	311-YuV/18	311-YuV/20	311-YuV/24	311-YuV/22	311-YuV/26	311-YuV/28	311-YuV/29	311-YuV/31	311-YuV/39	
Глубина, м	2.7	3.9	4.0	4.5	5.0	7.2	8.1	8.6	9.4	12.2	
AMS ¹⁴ C-датировка по микроорганке	11 490 ± 80			17 390 ± 200				21 400 ± 300			
δ ¹⁸ O во льду, ‰	-29.9	-30.9		-33.6		-33.2	-32.6		-33.0	-33.0	
Пыльца деревьев	-	-		-		-	4		2	-	
Пыльца кустарников	9	25		9		15	8		13	2	
Пыльца трав и кустарничков	70	55		75		57	56		65	76	
Спores	21	20		16		28	32		20	22	
<i>Larix</i>	-	-		-		-	4		2	-	
<i>Pinus sibirica</i>	-	-		-		-	-		-	-	
<i>Betula</i>	-	-		-		-	-		-	-	
<i>Betula</i> sect. <i>Nanae</i>	3	-		3		2	-		2	-	
<i>Alnaster</i>	3	-		3		-	-		2	2	
<i>Salix</i>	-	-		-		-	-		-	-	
Рoaceae	8	-		10		3	4		15	36	
Ericaceae	3	-		5		-	-		-	4	
Chenopodiaceae	7	-		-		-	-		-	2	
<i>Artemisia</i>	25	20		23		9	16		21	6	
Varia	27	35		37		45	36		29	28	
Bryales	-	-		-		2	-		-	-	
<i>Sphagnum</i> sp.	-	-		3		2	-		-	-	
Polypodiaceae	3	-		-		-	-		-	2	
<i>Selaginella sibirica</i>	18	20		13		24	32		20	20	
экз./л	144	80		156		220	100		166	224	
Переотложенные	-	-		2		1	-		1	2	

Примечание. Выделенные курсивом номера образцов соответствуют AMS-датировке.

* 14–18-метровая терраса в низовьях р. Колымы.

дает основание для предположения о произрастании лиственницы на сравнительно небольшом расстоянии. Интересно также отметить некоторые закономерности в распределении пыльцы. Так, каждому максимуму недоразвитой пыльцы предшествует небольшой пик содержания пыльцы полыни и кедрового стланика, а локальный пик содержания пыльцы карликовой березки (6.3 %) совпадает с верхним максимумом. Пики полыни практически совпадают с повышенной минерализацией, что может указывать на связь режима увлажнения и характера палиноспектров в данном районе.

Спорово-пыльцевые спектры, полученные непосредственно при анализе повторно-жильных льдов Плахинского Яра (см. табл. 6), отражают региональный пыльцевой дождь. Поскольку содержание недоразвитой трехбороздной пыльцы в ПЖЛ существенно ниже, очевидно, что это локальный компонент, связанный со своеобразными локальными фитоценозами. Значительно более высокое содержание пыльцы полыней и злаков свидетельствует, что пыльца этих растений относится к региональным компонентам. Максимум содержания пыльцы полыни интерпретируется как преимущественное распространение ксерофильных фитоценозов на фоне мозаичных арктических тундр в региональном масштабе. Согласно полученным радиоуглеродным датировкам повторно-жильного льда, подобные фитоценозы могли иметь широкое распространение в интервалах 14–12 и 21–20 тыс. лет. На спорово-пыльцевой диаграмме вмещающих отложений им соответствуют локальные максимумы содержания пыльцы полыни в интервале 10–11 м. При этом во льду, датированном 21–20 тыс. лет, встречены пыльцевые зерна лиственницы, а во льду, датированном 14–12 тыс. лет, – пыльцевые зерна маревых. Максимум содержания пыльцы злаков отмечен в основании ледяной жилы (36 %), датированной интерполяцией радиоуглеродных датировок около 23–22 тыс. лет; это позволяет проследить динамику изменения пыльцевого дождя в течение формирования жил верхнего яруса и верхней части жил нижнего яруса.

Условия вегетации в период формирования едомы Плахинского Яра. По данным спорово-пыльцевого анализа отложений данного разреза можно выделить три локальные палинозоны (см. рис. 7). Первая палинозона (интервал 14.0–9.5 м) – с доминированием *Varia*, которая предположительно датируется 24–18 тыс. лет назад. Она характеризуется отсутствием пыльцы кустарников, преобладанием пыльцы разнотравья, среди которой много недоразвитой. Встречается также пыльца *Angelica*, *Asteraceae*, *Brassicaceae*, *Chichorioideae*, *Caryophyllaceae*, *Epilobium*, *Galium*, *Koenigia*, *Oxyria*, *Polygonum aviculare*, *Polygonaceae*,

Saxifragaceae, *Senecio*. Отмечено незначительное участие полыни и злаков. Вероятно, в этот период были условия для произрастания лиственницы, но участие ее в растительном покрове было ограниченным. Этим может объясняться находка нескольких пыльцевых зерен в прослое песка на периферии разреза и в ПЖЛ при отсутствии макроостатков лиственницы в отложениях. Снизу вверх несколько повышается содержание спор плаунка сибирского. Вероятно, условия увлажнения были достаточно близки к современным. Состав разнотравья говорит о существовании зарастающих полигонов в условиях арктических тундр. Сумма положительных температур, вероятно, составляла 200–250 градусо-дней. Вторая палинозона (глубина 9.5–3.9 м) – с участием *Poaceae* + *Artemisia*, приблизительно датируемая 18–14 тыс. лет, характеризуется более засушливыми условиями, судя по повышению роли пыльцы полыни и злаков. Максимальное содержание недоразвитой пыльцы разнотравья (89 %) отвечает наиболее суровым условиям вегетационного периода, пик содержания спор плаунка сибирского, на наш взгляд, – повышению скорости накопления отложений. Реконструируемая сумма положительных температур колеблется в пределах 200–300 градусо-дней и соответствует арктическим тундрам. Третья палинозона (глубина 3.9–0.1 м) – с доминированием *Poaceae* + *Betula* sect. *Nanae* – датируется в интервале примерно 14–11 тыс. лет. Она отвечает более благоприятным условиям, судя по повышению содержания пыльцы злаков и карликовой березки, снижению содержания недоразвитой пыльцы разнотравья до 20–32 % от общего состава. Возможно, что сумма положительных температур в период накопления отложений в интервале 3.9–0.1 м несколько повысилась, примерно до 450–500 градусо-дней [Васильчук А.К., 2003].

Таким образом, в этом разрезе на фоне доминирования недоразвитой пыльцы разнотравья зафиксированы колебания, выраженные сменой субдоминантов. Палиноспектры с участием пыльцы полыни и карликовой березки сменяются палиноспектрами с участием пыльцы злаков на глубине 9.5–12 и 4–6 м. Однако колебания сглажены высоким содержанием недоразвитой пыльцы разнотравья.

В целом условия вегетации растительности во время формирования едомы Плахинского Яра характеризовались коротким периодом вегетации, резким переходом от положительных температур к отрицательным.

Изучение палиноспектров датированных образцов повторно-жильных льдов (см. табл. 6) показало, что все компоненты палиноспектров экологически сочетаются, дочетвертичных палиноморф не зафиксировано, встречены тонкостенные быстро разрушающиеся в процессе переотложе-

Таблица 7. Вариации значений $\delta^{18}\text{O}$ в позднеплейстоценовых и голоценовых ПЖЛ и в современных ростках жил (рост.) в разрезе Плахинский Яр*

Номер образца	Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	Вид льда	Номер образца	Глубина, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	Вид льда
<i>Сингенетические позднеплейстоценовые ПЖЛ в едомной толще Плахинского Яра</i>							
311-YuV/1	1.8	-33.1	ПЖЛ	311-YuV/28	8.1	-32.6	ПЖЛ
311-YuV/3	1.9	-30.9	ПЖЛ	311-YuV/29	8.6	-32.1	ПЖЛ
311-YuV/6	2.0	-30.8	ПЖЛ	311-YuV/31	9.4	-33.0	ПЖЛ
311-YuV/12	2.2	-31.0	ПЖЛ	311-YuV/33	10.2	-33.7	ПЖЛ
311-YuV/13	2.7	-29.9	ПЖЛ	311-YuV/35	11.0	-32.8	ПЖЛ
311-YuV/16	4.0	-30.9	ПЖЛ	311-YuV/37	11.7	-33.6	ПЖЛ
311-YuV/21	5.0	-33.6	ПЖЛ	311-YuV/39	12.2	-33.0	ПЖЛ
311-YuV/24	6.3	-33.4	ПЖЛ	311-YuV/41	13.2	-32.9	ПЖЛ
311-YuV/26	7.1	-33.2	ПЖЛ	311-YuV/44	14.5	-34.7	ПЖЛ
311-YuV/25	7.2	-32.1	ПЖЛ				
<i>Сингенетические голоценовые ПЖЛ в толще аласа, вскрытого близ зимовья Плахино</i>							
312-YuV/4	1.7	-26.5	ПЖЛ	312-YuV/6	1.7	-27.4	ПЖЛ
312-YuV/5	1.1	-27.1	ПЖЛ	312-YuV/7	3.1	-27.2	ПЖЛ
<i>Современные жильные ростки, внедряющиеся в ПЖЛ в толще аласа</i>							
312-YuV/1	0.1	-27.0	рост.	312-YuV/12	0.35	-25.3	рост.
312-YuV/2	0.5	-27.1	рост.	312-YuV/13	0.65	-23.4	рост.
312-YuV/3	0.5	-26.4	рост.				

* 14–18-метровая терраса в низовьях р. Колымы.

ния пыльцевые зерна *Salix*, *Larix* и недоразвитые трехбороздные пыльцевые зерна, отнесенные к *Varia*. Из этого следует, что переотложение во фракции пыльцевого концентрата не отмечено и полученные по микроорганическим включениям датировки с большой вероятностью достоверны.

Особенности изотопного состава повторно-жильных льдов едомы Плахинского Яра. Убедительным свидетельством сурового режима формирования жил является их изотопно-кислородный состав (проанализировано 15 образцов). Значения $\delta^{18}\text{O}$ в жилах составляют от -33.4 до -26.4 ‰ (табл. 7), здесь же, на пойме в ростке сингенетической жилы, $\delta^{18}\text{O}$ колеблется от -27.0 до -26.4 ‰. Экстремально низкие содержания тяжелых изотопов кислорода – ниже -34 ‰, указывающие на наиболее суровые зимы периода формирования жил, отмечаются в нижней половине диаграммы (рис. 8), что примерно соответствует временному отрезку 30–28 тыс. лет назад и сопоставляется с третьим событием Хайнриха, выделенным на спорово-пыльцевой диаграмме разреза Плахинского Яра [Васильчук А.К., 2003]. Отрезок диаграммы со значениями $\delta^{18}\text{O}$ выше -31.0 ‰ (датируемый 15–13 тыс. кал. лет) свидетельствует о геокриологической ситуации, лишь немного суровее современной. Большая же часть изотопной диаграммы характеризуется значениями $\delta^{18}\text{O}$ ниже -32.0 ‰, что указывает на заметно более суровые, чем современные, зимы. Этому не противоречат и данные по распределению значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в тек-

стурных шпировых льдах едомы Плахинского Яра (рис. 9).

Средний изотопный состав осадков в районе пос. Черский представлен в базе данных глобальной сети изучения изотопов в осадках (данные из базы GNIP [https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx]) (табл. 8). Согласно этим данным, средний

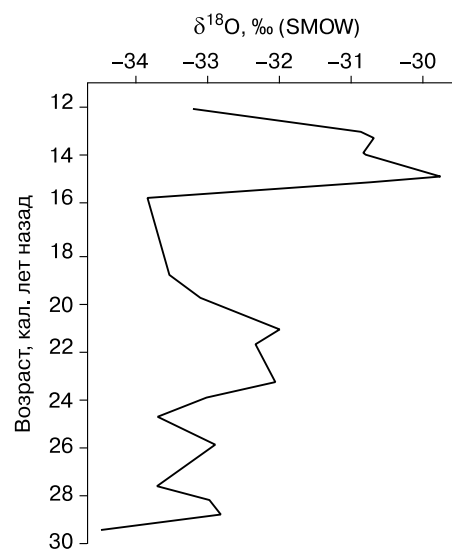


Рис. 8. Изотопно-кислородная диаграмма позднеплейстоценовых ПЖЛ в разрезе Плахинский Яр, построенная относительно калиброванного радиоуглеродного возраста льда жил.

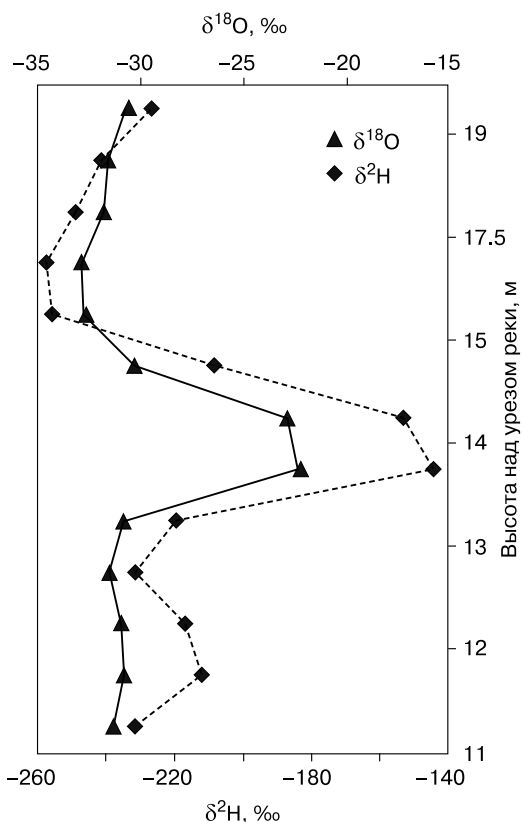


Рис. 9. Распределение значений $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в текстурообразующих льдах в едомой толще Плахинского Яра [Михалев и др., 2012].

изотопный состав снега существенно варьирует год от года. Значения $\delta^{18}\text{O}$ к завершению зимнего сезона в марте составляют -31.77‰ , а $\delta^2\text{H}$ равны -250.1‰ . Изотопный состав выпадающих осадков в мае, когда талая вода проникает в морозобойные трещины, гораздо более тяжелый, значения $\delta^{18}\text{O}$ составляют в среднем -18.12‰ , $\delta^2\text{H}$ равны -151.5‰ .

Вариации среднемесячных величин $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$ в выпадающем снеге в пос. Черский, по данным М.А. Коныхина с соавт. [1996], составляют от -36.7 до -22‰ и от -279.2 до -169.4‰ соответственно. Однако в морозобойные трещины, очевидно, попадает талая вода из поздневесенней снежной толщи, среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ которой составляет -27.6‰ , что близко к значениям $\delta^{18}\text{O}$ в ростках современных жил, формирующихся в низовьях Колымы близ Черского, варьирующих в среднем в апреле от -24 до -26‰ .

ИЗОТОПНЫЕ ВАРИАЦИИ В ЕДОМНЫХ ТОЛЩАХ НИЗОВИЙ КОЛЫМЫ, СИНХРОННЫХ ЕДОМЕ ПЛАХИНСКОГО ЯРА

Характерной особенностью изотопной диаграммы ПЖЛ Плахинского Яра являются экстре-

Таблица 8. Вариации среднемесячных величин $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ и d_{exc} в метеосадах пос. Черский за период 2001–2010 гг.

Месяц	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	$\delta^2\text{H}$, ‰	d_{exc} , ‰
Январь	-34.61 ± 3.93	-265.0 ± 28.3	11.9 ± 3.4
Февраль	-32.10 ± 2.62	-247.3 ± 22.2	9.5 ± 1.3
Март	-31.77 ± 3.62	-250.1 ± 28.7	4.0 ± 5.3
Апрель	-25.58 ± 4.22	-215.3 ± 32.5	4.9 ± 3.8
Май	-18.12 ± 3.44	-151.5 ± 23.2	-1.0 ± 9.8
Июнь	-18.34 ± 4.29	-156.5 ± 42.0	2.0 ± 2.8
Июль	-17.90 ± 2.51	-142.7 ± 5.5	3.4 ± 2.7
Август	-17.32 ± 1.65	-135.6 ± 12.5	3.7 ± 2.1
Сентябрь	-17.54 ± 2.02	-135.0 ± 13.4	6.7 ± 2.4
Октябрь	-23.77 ± 3.45	-178.5 ± 24.2	11.7 ± 6.9
Ноябрь	-27.28 ± 3.45	-204.4 ± 20.7	13.9 ± 8.0
Декабрь	-30.90 ± 3.94	-233.4 ± 31.8	13.8 ± 5.3

Примечание. Данные из базы GNIP (<https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>) [Partner: Northeast Science Station, Cherskij]).

мально низкие величины $\delta^{18}\text{O}$, особенно в нижних частях жил (см. рис. 8, 10, а), которые, вероятно, свидетельствуют о чрезвычайно суровых (даже на фоне достаточно холодных зим позднего неоплейстоцена) зимних условиях в этом регионе. Можно даже, пожалуй, говорить о четко выраженном изотопном минимуме в жилах Плахинского Яра по сравнению с аналогичными и синхронными им полигонально-жилыми образованиями Северо-Востока России [Vasil'chuk, Vasil'chuk, 1998, 2014, 2017]. Примечательно, что в строении всего комплекса это также отразилось посредством очень небольшого расстояния между соседними жилами, которое и ранее считалось признаком суровости геокриологической ситуации, а в этом случае столь убедительно подтвердилось.

Из других Нижнеколымских разрезов синхронно отдельным частям едомы Плахинского Яра формировались едома в обнажении Красивое на правом берегу р. Малый Анюй, вероятно, едомые толщи, вскрытые в разрезе Алешкинской террасы, едома в обнажении Бизон в устье протоки Лакеевская, верхняя часть едом Дуванного Яра и Зеленого Мыса, а также, вероятно, едома близ пос. Амбарчик в устье Колымы.

В едоме у Амбарчика ($69^{\circ}39'$ с.ш., $162^{\circ}18'$ в.д.) М. Фукудой и А. Сашовым с коллегами встречено значительное содержание переотложенного органического материала, судя по инверсиям ^{14}C -датировок [Fukuda et al., 1997]. Авторы могут лишь предположить, что верхняя треть разреза формировалась несколько позднее 32 тыс. лет назад, значения $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ в среднем составляет -32.6‰ (см. рис. 10, б).

Разрез Красивое ($68^{\circ}18'34''$ с.ш., $161^{\circ}44'09''$ в.д.) расположен на правом берегу р. Малый Анюй, в

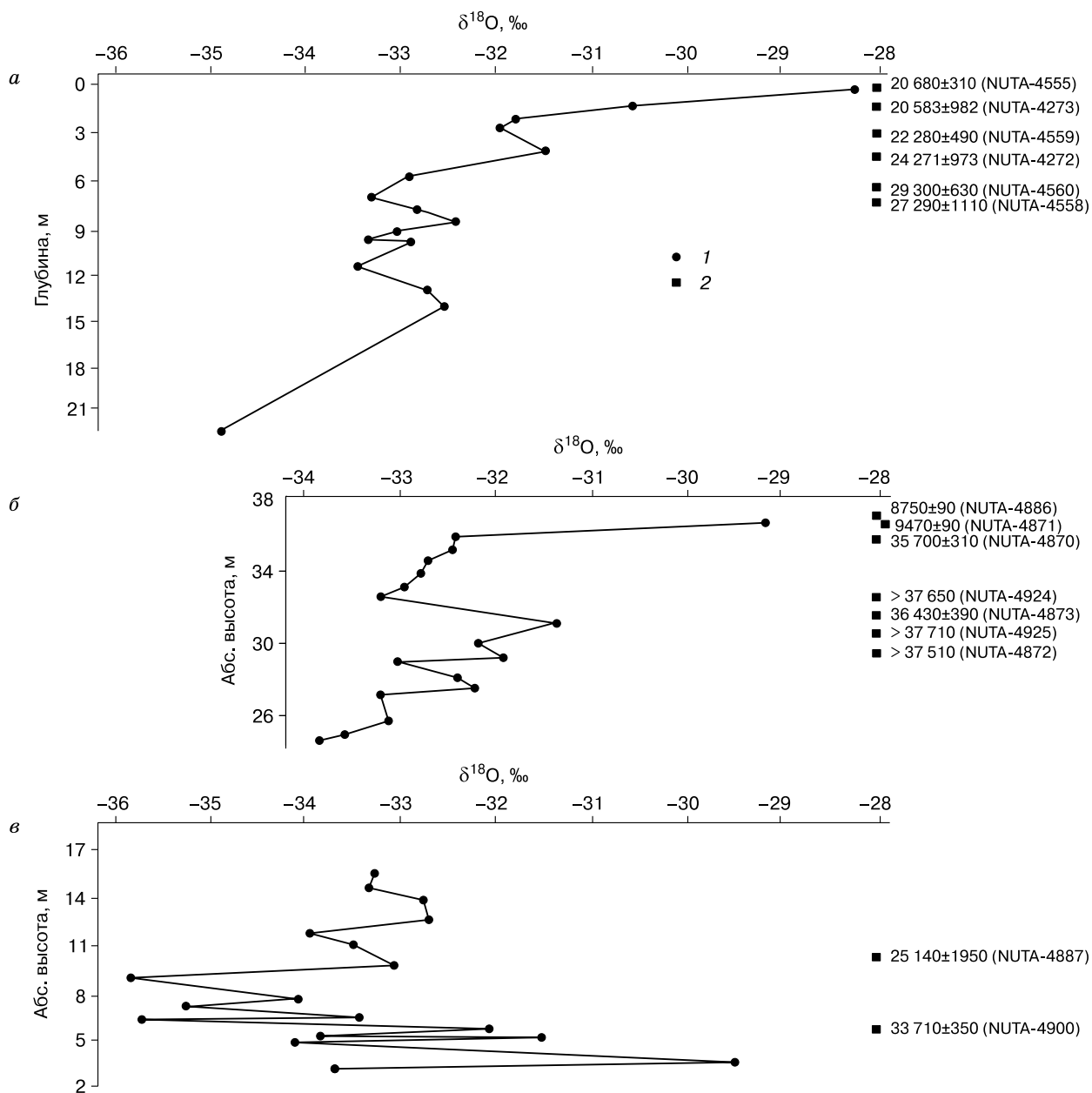


Рис. 10. Изотопно-кислородная диаграмма и AMS радиоуглеродные датировки вмещающих отложений в позднеплейстоценовых едомных полигонально-жилых массивах:

а – Плахинский Яр на левобережье Стадухинской протоки р. Колымы; *б* – Амбарчик в устье р. Колымы; *в* – Красивое на р. Малый Аной; 1 – значения $\delta^{18}\text{O}$ в ледяных жилах; 2 – точки отбора образцов на радиоуглеродный анализ и AMS-датировки университета г. Нагоя (NUTA, тандетронный AMS центр геохронологических исследований) [Fukuda et al., 1997].

15 км выше пос. Анойск. Здесь вскрываются отложения низкой аккумулятивной поверхности высотой до 15–17 м. В основании залегает пачка горизонтально-слоистых супесей сизовато-серого цвета видимой мощностью 4–6 м. По разрезу Красивое в нижней части получены датировки в интервале 18.7–27.3 тыс. лет: 18 700 ± 1400 лет (МГУ-881), 22 700 ± 1500 лет (МГУ-886) и 27 300 ± 300 лет (ГИН-3209) [Шер, Плахт, 1988].

ПЖЛ второй генерации, полностью залегающие в сизовато-серых супесях, характеризуются высокими значениями $\delta^{18}\text{O}$: от –22.6 до –22.9 ‰. Значения $\delta^{18}\text{O}$ ПЖЛ первой генерации, рассекающих этот горизонт, колеблются от –30.5 до –32.0 ‰ [Николаев и др., 2010; Михалев и др., 2012]. Ранее здесь были получены величины $\delta^{18}\text{O}$ от –28.9 до –32.6 ‰ [Коняхин и др., 1996]. Возможно, эти жилы формировались позже, в более холодных ус-

ловиях накопления едомных отложений, по сравнению с жилами, залегающими выше.

В едоме разреза Красивое М. Фукудой и А. Сашовым с коллегами получены убедительные изотопные свидетельства (см. рис. 10, в) того, что интервал 30–28 тыс. лет назад (здесь по ледяным жилам ими получены значения $\delta^{18}\text{O}$ в среднем равные -34.0‰) был несколько суровее, чем 24–22 тыс. лет назад (здесь полученные по ледяным жилам значения $\delta^{18}\text{O}$ в среднем составляют -33.3‰) [Fukuda et al., 1997].

Слабая обнаженность *разреза Алешкинской террасы* ($68^{\circ}43'$ с.ш., $158^{\circ}42'$ в.д.) не позволила авторам при ее посещении опробовать жилы, датированные указанным возрастным диапазоном: там встретились только мощные голоценовые клинья льда. Однако такие данные все же были получены по Алешкинской едоме М.А. Коняхиным и Д.В. Михалевым [Коняхин и др., 1996]. Жилы, датруемые самым концом позднего неоплейстоцена, опробованы ими в обнажении Красивое на правом берегу р. Малый Аной и у Алешкинской заимки. По одновысотному с Красивым обнажению Алешкинской террасы (14–16 м) датирование проводилось трижды, во всех случаях по редким растительным остаткам в песках: на глубине 5 м – $14\,780 \pm 300$ лет (СОАН-2307), на глубине 7 м – $17\,260 \pm 140$ лет (СОАН-2308) [Томирдиаро, Черненький, 1987]. Ранее здесь получены даты от 15 до 16 тыс. лет назад [Черненький, Федорова, 1982]. Палинологическая характеристика едомных отложений Алешкинской террасы [Там же] прямо коррелирует с данными спорово-пыльцевого анализа, полученными по едомным отложениям Плахинского Яра, что дает основание предполагать, что едома Алешкинской террасы накопилась примерно в тот же временной интервал.

Авторами детально датирована *едома Бизон* ($68^{\circ}33'$ с.ш., $159^{\circ}41'$ в.д.) на правом берегу р. Колымы, в устье протоки Лакеевская, в 15 км ниже Дуванного переката. Прямое AMS-датирование микровключений органики и пыльцевого концентрата показало, что ПЖЛ в этом разрезе непрерывно формировался от 32 до 26 тыс. лет назад. Значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют в ПЖЛ разреза Бизон от -33.32 до -32.02‰ , составляя в среднем около -33‰ , значит, среднеянварская температура была -50°C (а современная $t_{\text{я}}$ здесь равна -35°C), т. е. разница составляет около 15°C .

Изученные М.А. Коняхиным с соавт. [1996] в верхней части разреза Красивое и у Алешкинской заимки позднего неоплейстоценовые жилы, вероятнее всего, имеют возраст от 17 до 14–12 тыс. лет.

Опираясь на принятые представления об исключительной суровости этого этапа, можно было бы ожидать встретить значения $\delta^{18}\text{O}$ ледяных жил существенно более низкие, чем в более древних толщах, но это не так: значения $\delta^{18}\text{O}$ в этих жилах

не ниже -32.6‰ , даже чаще они варьируют в диапазоне от -29 до -31‰ . Это указывает на то, что, хотя заключительный (сартанский – МИС-2) этап позднего неоплейстоцена на севере Колымской низменности и был суровым, однако изотопного и температурного минимума предшествующего (каргинского – МИС-3) периода он не достиг. Отметим, что И.Д. Стрелецкая с соавт. [2015], ориентируясь на опубликованные данные по изотопному составу ПЖЛ по северо-восточным районам, предположили, что в восточном секторе Арктики похолодание в течение МИС-2 (сартанское время) было по сравнению с МИС-3 незначительным.

На основе изучения восьми ледяных жил и семи ледяных линз, вскрытых в туннеле Фокс пермафрост (Крелл), формирование которых датруется М. Лачнетом и Э. Слот самым концом позднего неоплейстоцена: примерно от 26 до 12.9 тыс. кал. лет [Lachniet et al., 2012; Sloat, 2014], выделены четыре холодных интервала и одно слабое потепление, на фоне существенно более холодного общего климата. Этот временной интервал соответствует периоду активной аккумуляции верхней части едомы Плахинского Яра и едомы, вскрытой в обнажениях Красивое и Алешкинская терраса. Исследование Э. Слот показало, что минимальные значения $\delta^{18}\text{O}$ во льду жил составляют -28.9‰ , а средний изотопный состав современного снега -22.3‰ , в молодых жилах $\delta^{18}\text{O} = -21.8\text{‰}$. Весьма низкие значения $\delta^{18}\text{O}$ дают основание предположить, что повторно-жильные льды накапливались в основном в климатических условиях гораздо более суровых, чем современные [Lachniet et al., 2012; Sloat, 2014].

Наиболее холодный интервал на севере Аляски связывают с подвижкой ледников с хребта Брукса Иткиллик II в интервале 27–21 тыс. кал. лет назад. Реконструкции летнего климата по данным изучения хириноид в разрезе едомы на оз. Буриал (расположенном в 335 км юго-западнее Иткиллика) показали снижение среднеиюльских температур на 3.5°C [Kurek et al., 2009]. В период примерно от 25 до 17 тыс. кал. лет назад среднеиюльские температуры в районе оз. Загоскин были ниже современных в среднем на 2.3°C [Kanevskiy et al., 2011; Lapointe et al., 2017]. По данным М. Лачнета с соавт., для периода 26–22 тыс. кал. лет назад среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ в ПЖЛ в районе Фэрбенкса равно -27.9‰ [Lachniet et al., 2012, 2016]. На основании этого М. Лачнет рассчитал среднюю температуру на самую холодную четверть года: -38°C , а в настоящее время она составляет -21.1°C , т. е. температуры по его расчетам были ниже на 17°C .

Контрастирующий с этим вывод получен В. Майером с соавт. [Meyer et al., 2017]. Основываясь на палеотермометре, разработанном ими по анализу терригенных биомаркеров из донных от-

ложений прибрежных районов Камчатки, было показано, что лето 20–18 тыс. лет назад было таким же теплым, как в настоящее время. Теплое лето могло быть результатом более сильного, чем сейчас, южного ветра над Камчаткой и воздействия мощного антициклона над субарктическим северо-западом Тихого океана. Это говорит о том, что, несмотря на территориальную близость Аляски и Северо-Востока России, наличие такого мощного климатического регулятора, как Тихий океан, заставляет с большой осторожностью сопоставлять палеотемпературные реконструкции, получаемые в этих двух регионах.

РЕКОНСТРУКЦИИ ЗИМНЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ИЗОТОПНЫМ ДАННЫМ

Авторами выполнены реконструкции среднезимней и среднеянварской температуры по разрезам низовой р. Колымы. Реконструкции среднеянварской ($t_{я}^{\circ}$) и среднезимней ($t_{ср.з}^{\circ}$) температуры получены на основании сравнения изотопного состава современных жильных ростков ($\delta^{18}O_{р.ж}$) и современной зимней температуры для периода формирования жильных ростков, т. е. последних 60–100 лет [Васильчук, 1992; Vasil'chuk, 1991]. В результате сравнения получено два уравнения: $t_{я}^{\circ} = 1.5\delta^{18}O_{р.ж} (\pm 3^{\circ}C)$ и $t_{ср.з}^{\circ} = \delta^{18}O_{р.ж} (\pm 2^{\circ}C)$.

По этим уравнениям рассчитана зимняя температура воздуха позднего неоплейстоцена (30–12 тыс. лет назад) для ряда опорных разрезов, изученных в низовьях р. Колымы (табл. 9) [Vasil'chuk, 2014].

Наиболее низкая температура отмечается для периода 30–28 тыс. лет назад, температура января понижалась в долине р. Колымы до $-51, -47^{\circ}C$ (см. табл. 9) при современных средних значениях $-35, -33^{\circ}C$.

Полученные радиоуглеродные датировки ПЖЛ позволяют сделать вывод, что в районе низовой р. Колымы наиболее низкая температура зимнего сезона относится к интервалу 30–28 кал. лет назад. Согласно геохронологической привязке глобальных событий позднего неоплейстоцена [Rasmussen et al., 2014], этот период соответствует третьему событию Хайнриха. На него приходится и минимальные значения суммы положительных температур из-за снижения длительности вегетационного периода.

ВЫВОДЫ

В обнажении Плахинского Яра в низовьях р. Колымы развиты поздненеоплейстоценовые двухъярусные узкие повторно-жильные льды с размерами полигонов не более 3–5 м.

Начало накопления едомной толщи датируется 32 тыс. лет назад, начало формирования вскрытой нижней части жил – периодом 30–25 тыс. кал. лет назад, а завершение накопления едомной толщи датируется не позднее 12 тыс. кал. лет назад.

Существенно негативный изотопный состав ПЖЛ в опорных разрезах едомных толщ низовой р. Колымы дает возможность отнести весь период от 30 до 12 тыс. лет назад к единому поздненеоплейстоценовому криохрону.

Данные по изотопному составу жил в опорных разрезах едомных толщ Плахинского Яра, Зеленого Мыса, Дуванного Яра, Красивого, Амбарчика позволяют сделать вывод о существовании более суровых, чем современные, зимах, господствовавших здесь в конце поздненеоплейстоценового криохрона.

Наиболее низкая среднеянварская температура воздуха (на $14-17^{\circ}C$ ниже современной) в ни-

Таблица 9. Среднеянварская температура воздуха ($t_{я}^{\circ}$) в низовьях Колымы в сравнении с современными значениями [Васильчук, 2016; Vasil'chuk, 1991, с уточнениями]

Пункт	Параметр	Период (кал. лет назад)				Соврем.	Источник
		30–28	24–22	20–18	16–12		
Плахинский Яр	$\delta^{18}O_{пжл}, \text{‰}$	-34.8	-31.6	-32.0	-31.1	-25.8	[Васильчук, 1992; Fukuda et al., 1997]
	$t_{я}^{\circ}, \text{°C}$	-51.0	-47.0	-48.0	-46.0	-35.0	
Амбарчик	$\delta^{18}O_{пжл}, \text{‰}$	-32.6	-	-	-	-24.0	[Fukuda et al., 1997]
	$t_{я}^{\circ}, \text{°C}$	-49.0	-	-	-	-32.0	
Зеленый Мыс	$\delta^{18}O_{пжл}, \text{‰}$	-31.6	-30.4	-31.6	-30.7	-25.5	[Васильчук, 1992]
	$t_{я}^{\circ}, \text{°C}$	-47.0	-45.0	-47.0	-45.0	-33.0	
Дуванный Яр	$\delta^{18}O_{пжл}, \text{‰}$	-31.8	-32.2	-30.5	-31.0	-25.1	[Васильчук, 1992, 2016]
	$t_{я}^{\circ}, \text{°C}$	-47.0	-48.0	-46.0	-46.0	-35.0	
Бизон	$\delta^{18}O_{пжл}, \text{‰}$	-33.0	-	-	-	-26.0	[Vasil'chuk et al., 2001]
	$t_{я}^{\circ}, \text{°C}$	-50.0	-	-	-	-35.0	
Красивое	$\delta^{18}O_{пжл}, \text{‰}$	-34.0	-33.3	-31.0	-	-26.0	[Коняхин и др., 1996; Николаев и др., 2010; Fukuda et al., 1997]
	$t_{я}^{\circ}, \text{°C}$	-51.0	-47.0	-46.0	-	-35.0	
Алешкинская терраса	$\delta^{18}O_{пжл}, \text{‰}$	-	-	-31.0	-	-26.0	[Коняхин и др., 1996]
	$t_{я}^{\circ}, \text{°C}$	-	-	-46.0	-	-35.0	

зовьях Колымы получена авторами для периода от 30 до 28 тыс. кал. лет назад, что соответствует резкому снижению температуры в глобальном масштабе – третьему событию Хайнриха.

Авторы выражают особую признательность профессору [С.М. Фотиеву] за тщательное рецензирование статьи и многочисленные ценные предложения по ее улучшению.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (грант № 14-27-00083-П) и бюджетного финансирования Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова с использованием масс-спектрометрического оборудования, приобретенного на средства Программы развития МГУ.

Литература

- 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.
- Vasil'chuk, A.C., 2003. Appearance of Heinrich events in radiocarbon dated pollen diagrams of ice wedges and its surrounding yedoma sediments of the lower Kolyma River. *Earth's Cryosphere* VII (4), 3–13.
- 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.
- Vasil'chuk, Yu.K., 1992. Oxygen Isotope Composition of Ground Ice (Application to Paleogeocryological Reconstructions), *Theor. Probl. Dept., RAS, Moscow University, Research Institute of Engineering for Construction (PNIIS), Moscow, Book 1, 420 pp, Book 2, 264 pp.* (in Russian)
- Васильчук Ю.К.** Пространственно-временное распределение среднеянварских палеотемператур воздуха на территории Российской Арктики для периода 30–12 тыс. лет назад с высоким временным разрешением // Арктика и Антарктика, 2016, № 1, с. 86–103, DOI: 10.7256/2453-8922.2016.1.21310.
- Vasil'chuk, Yu.K., 2016. Spatio-temporal distribution of mean January air temperature over the Russian Arctic during 30–12 ka BP with high temporal resolution. *Arktika i Antarktika (Arctic and Antarctic)*, No. 1, 86–103, DOI: 10.7256/2453-8922.2016.1.21310.
- Жарников З.Ю., Визгалов Г.П., Князева Е.В., Коноваленко М.В., Мыглан В.С.** Результаты дендрохронологической датировки Стадухинского острога // Рос. археология, 2013, № 6, с. 122–128.
- Zharnikov, Z.Yu., Vizgalov, G.P., Knyazeva, E.V., Konovalenko, M.V., Myglan, V.S., 2013. Tree-ring chronology for the Stadhinsky Ostrog. *Ros. Arkheologiya*, No. 6, 122–128.
- Коняхин М.А.** Изотопно-кислородный состав подземных льдов / М.А. Коняхин, Д.В. Михалев, В.И. Соломатин. М., Изд-во Моск. ун-та, 1996, 156 с.
- Konyakhin, M.A., Mikhalev, D.V., Solomatin, V.I., 1996. Oxygen Isotope Composition of Ground Ice. *Moscow University Press, Moscow*, 156 pp. (in Russian)
- 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.
- Mikhalev, D.V., Nikolaev, V.I., Romanenko, F.A., 2012. Reconstruction of the Late Pleistocene–Holocene formation conditions of ground ice in the Kolyma Lowland. *Bull. MGU, Ser. 5, Geografiya*, No. 5, 35–42.
- Николаев В.И., Михалев Д.В., Романенко Ф.А., Брилли М.** Реконструкция условий формирования многолетнемерзлых пород Северо-Востока России по результатам изотопных исследований (на примере опорных разрезов Колымской низменности) // Лед и снег, 2010, т. 50, № 4, с. 79–90.
- Nikolaev, V.I., Mikhalev, D.V., Romanenko, F.A., Brilli, M., 2010. Reconstruction of the formation conditions for permafrost in Northeastern Russia from isotope data (example from reference sections in the lower Kolyma Lowland). *Led i Sneg* 50 (4), 79–90.
- Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Токарев И.В.** Реконструкция палеоклимата Российской Арктики в позднем неоплейстоцене–голоцене на основе данных по изотопному составу полигонально-жильных льдов // Криосфера Земли, 2015, т. XIX, № 2, с. 98–106.
- Streletskaya, I.D., Vasiliev, A.A., Oblogov, G.E., Tokarev, I.V., 2015. Reconstruction of paleoclimate of Russian Arctic in Late Pleistocene–Holocene on the basis of isotope study of ice wedges. *Earth's Cryosphere* XIX (2), 86–94.
- Томирдиаро С.В.** Криогенно-эоловые отложения Восточной Арктики и Субарктики / С.В. Томирдиаро, Б.И. Черненький. М., Наука, 1987, 198 с.
- Tomirdiario, S.V., Chernenkii, B.I., 1987. Cryogenic-Aeolian Deposits in the Eastern Arctic and Subarctic Areas. *Nauka, Moscow*, 198 pp. (in Russian)
- Черненький Б.И., Федорова И.Н.** Некоторые особенности состава и строения отложений Аleshкинской свиты на р. Колыма // Четвертичные отложения востока СССР. Магадан, 1982, вып. 2, с. 11–13. (Препр. / Сев.-Вост. комплекс. НИИ).
- Chernenkii, B.I., Fedorova, I.N., 1982. Some structure and composition features of the Aleshkinskaya terrace deposits in the Kolyma River valley, in: *Quaternary Deposits in the Eastern USSR. Northeastern Complex NII, Magadan, Issue 2*, pp. 11–13. (Preprint)
- Шер А.В., Плахт И.Р.** Радиоуглеродное датирование и проблема стратиграфии плейстоцена низменностей Северо-Востока СССР // Изв. АН СССР. Сер. геол., 1988, № 8, с. 17–31.
- Sher, A.V., Plakht, I.R., 1988. Radiocarbon dating and Pleistocene stratigraphy of plainlands in the northeastern USSR. *Izv. AN SSSR, Ser. Geol.*, No. 8, 17–31.
- Fukuda, M., Nagaoka, D., Saijyo, K., et al.** Radiocarbon dating results of organic materials obtained from Siberian permafrost areas. *Sapporo, Hokkaido Univ.*, 1997, p. 17–28. (Rep. Inst. Low Temperature Sci.).
- Kanevskiy, M., Shur, Y., Fortier, D., et al.** Cryostratigraphy of late Pleistocene syngenetic permafrost (Yedoma) in northern Alaska, Itkillik River exposure // *Quatern. Res.*, 2011, vol. 75, iss. 3, p. 584–596, DOI: 10.1016/j.yqres.2010.12.003.
- Kurek, J., Cwynar, L.C., Ager, T.A., et al.** Late Quaternary paleoclimate of western Alaska inferred from fossil chironomids and its relation to vegetation histories // *Quatern. Sci. Rev.*, 2009, vol. 28, iss. 9–10, p. 799–811, DOI: 10.1016/j.quascirev.2008.12.001.
- Lachniet, M.S., Lawson, D.E., Sloat, A.R.** Revised ¹⁴C dating of ice wedge growth in interior Alaska (USA) to MIS 2 reveals cold paleoclimate and carbon recycling in ancient permafrost terrain // *Quatern. Res.*, 2012, vol. 78, p. 217–225.
- Lachniet, M.S., Lawson, D.E., Stephen, H., et al.** Isoscapes of ¹⁸O and ²H reveal climatic forcings on Alaska and Yukon precipitation // *Water Resources Res.*, 2016, vol. 52, iss. 8, p. 6575–6586, DOI: 10.1002/2016WR019436.

- Lapointe, E.L., Talbot, J., Fortier, D., et al.** Middle to late Wisconsinan climate and ecological changes in northern Alaska: Evidences from the Itkillik River Yedoma // *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2017, DOI: 10.1016/j.palaeo.2017.08.006.
- Meyer, V.D., Hefter, J., Lohmann, G., et al.** Summer temperature evolution on the Kamchatka Peninsula, Russian Far East, during the past 20 000 years // *Climate of the Past*, 2017, vol. 13, p. 359–377, DOI: 10.5194/cp-13-359-2017.
- Rasmussen, S.O., Bigler, M., Blockley, S.P., et al.** A stratigraphic framework for abrupt climatic changes during the Last Glacial period based on three synchronized Greenland ice-core records: refining and extending the INTIMATE event stratigraphy // *Quatern. Sci. Rev.*, 2014, vol. 106, p. 14–28.
- Sloat, A.** Modern to Late Pleistocene Stable Isotope Climatology of Alaska. PhD Thesis UNLV Pap. 2143. Depart. Geosci. Univ. Nevada, Las Vegas, USA, 2014, 181 p.
- Vasil'chuk, Yu.K.** Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene on 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.** Oxygen-isotope and ^{14}C data associated with Late Pleistocene syngenetic ice-wedges in mountains of Magadan Region, Siberia // *Permafrost and Periglacial Processes*, 1998, vol. 9, No. 2, p. 177–183.
- Vasil'chuk, Yu.K., Vasil'chuk, A.C., van der Plicht, J., Kutschera, W., Rank, D.** 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., Vasil'chuk, A.** Spatial distribution of mean winter air temperatures in Siberian permafrost at 20–18 ka BP using oxygen isotope data // *Boreas*, 2014, vol. 43, iss. 3, p. 678–687.
- Vasil'chuk, Yu.K., Vasil'chuk, A.C.** Validity of radiocarbon ages of Siberian yedoma // *GeoRes J*, 2017, vol. 13, p. 83–95. URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx> [Partner: Northeast Science Station, Cherskij]. (Дата обращения: 24.05.2018).

*Поступила в редакцию
21 сентября 2017 г.*