

УДК 551.345 : 551.345.3 : 551.89 : 902.66

Ю.К. Васильчук¹, А.К. Васильчук²

ИЗОТОПНО-КИСЛОРОДНЫЙ СОСТАВ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ ОСТРОВА АЙОН И ПАЛЕОТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕКОНСТРУКЦИИ ПОЗДНЕГО ПЛЕЙСТОЦЕНА И ГОЛОЦЕНА ДЛЯ СЕВЕРА ЧУКОТКИ³

Исследованы сингенетические повторно-жильные льды о. Айон, определен их изотопный состав, получена геохимическая характеристика повторно-жильных льдов и вмещающих их отложений, выделено четыре яруса циклитов. Полученные результаты легли в основу палеотемпературных реконструкций для о. Айон и сопредельных территорий севера Чукотки. Отмечено практически полное совпадение тенденций в распределении изотопных характеристик позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов на о. Айон и в низовьях Колымы, а также различия в величине изменения изотопного состава при переходе от позднего плейстоцена к голоцену по сравнению с повторно-жильными льдами Нижней Колымы.

Ключевые слова: повторно-жильные льды, голоцен, поздний плейстоцен, стабильные изотопы, тяжелый кислород, дейтерий, радиоуглерод, остров Айон, Чаун-Чукотка.

Syngenetic ice wedges have been investigated in the Ayon Island. Their isotopic composition, geochemical characteristics of both ice wedges and enclosing sediment have been obtained; four ice-wedges stages have been distinguished. Paleo temperature reconstructions for Ayon Island and adjacent territories of northern Chukotka have been yielded at the basis of these results. It is observed almost identical trends in the distribution of ice-wedge isotopic characteristics in the island and in the lower reaches of the Kolyma River, as well as differences in the magnitude of isotopic oscillations during the transition from Late Pleistocene to the Holocene as compared to ice-wedges of the Lower Kolyma region.

Key words: Ice wedge, Holocene, Late Pleistocene, stable isotope, heavy oxygen, deuterium. Ayon Island, Chaun-Chukotka.

Введение. Первое упоминание об о. Айон связывают с именем землепроходца Исаи Игнатьева, который высадился на берег острова в 1646 г. Однако геологическая и геокриологическая изученность острова слабая. На поверхности позднеплейстоценовой террасы с отметками 55–64 м на северо-западном берегу о. Айон в 1980 г. была пробурена 671-метровая скважина, вскрывшая наиболее полный разрез кайнозоя на шельфе Восточно-Сибирского моря. Анализ фораминифер [Гудина и др., 1984], диатомовых водорослей [Степанова, 1989], спор и пыльцы [Каревская и др., 1984] привел исследователей к разной возрастной трактовке одних и тех же частей разреза скважины, особенно верхней части разреза. Геокриологические особенности о. Айон схематично рассмотрены только А.А. Свиточем с коллегами [Свиточ и др., 1978; Новейшие отложения..., 1980] и неполно в наших работах [Васильчук, 1989, 1992].

Комплексно изученных опорных разрезов позднеплейстоценовых мерзлых толщ с повторно-жильными льдами на территории севера и запада

Чукотки, примыкающей к о. Айон, немного. Они были описаны в четырех местонахождениях (рис. 1, а, б): на о. Айон, в устье р. Раучуа, на о. Врангеля, в долине р. Амгуэма и ее притока р. Экитики, а также в котловине оз. Эльгыгыдгын [Котов, 1997, 1998, 1999а, б; Schwamborn et al., 2006].

Задачи исследования. Цель нашей работы — рассмотреть особенности криолитологического строения позднеплейстоценовых и голоценовых повторно-жильных льдов о. Айон: интерпретировать данные анализа их изотопно-кислородного состава, радиоуглеродные датировки и гидрохимическую характеристику, сопоставить с данными для смежных районов и оценить изменения палеогеокриологических и палеоклиматических условий на севере Чукотки в позднем плейстоцене и голоцене.

Местоположение исследованных едомных толщ. Остров Айон площадью 2 тыс. км² расположен в восточной части Колымского залива (рис. 1,а). Его длина 63 км, ширина 38 км, высотные от-

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра инженерной и экологической геологии; географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, профессор, докт. геол.-минерал. н.; e-mail: vasilch_geo@mail.ru, vasilch@geol.msu.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, лаборатория геоэкологии Севера, вед. науч. с., докт. геогр. н.; e-mail: alla-vasilch@yandex.ru

³ Работа выполнена за счет гранта РНФ (№ 14-27-00083-П) и бюджетного финансирования Московского университета имени М.В. Ломоносова.

метки до 64 м. Остров Айон отделен от материка мелким Малым Чаунским проливом шириной около 2 км. С 21 марта 1942 г. на острове действует гидрометеорологическая станция имени Сидорова (69°56'12" с.ш., 67°59'40" в.д.).

Растительность острова отличается переходными чертами от северных гипоарктических тундр к арктическим с остепненными криофитными, тундростепными сообществами, в понижениях рельефа развиты осоково-гипновые болотные ассоциации. Среднегодовая температура воздуха на Айоне -11,4 °С, среднемноголетние значения среднеянварской температуры составляют -29 °С, среднезимней температуры — -20 °С, среднеиюльской температуры — около +8 °С.

На о. Айон широко распространен полигональный рельеф. В долинах рек в однородных песчано-суглинистых отложениях сформировались практически правильные тетрагоны, очертания которых подчиняются ориентирующим поверхностям. В однородных породах без ориентирующих поверхностей преобладают гексагональные формы. Размеры морозобойных полигонов на о. Айон варьируют от 6–8 до 20–30 м (рис. 1,а). Повторно-жильные льды на о. Айон в основном формировались в течение последних 30 тыс. лет, процесс повторно-жильного льдообразования продолжается и в настоящее время. Едомные отложения изучены на западном побережье о. Айон в протяженном обнажении 30–40-метровой террасы на берегу Восточно-Сибирского моря, на поверхности террасы развит полигональный рельеф с изометричными полигонами размером 5×8 м.

Криогенное строение. Основная часть разреза едомы сложена темно-коричневой, сизо-серой опесчаненной, сильнольдистой супесью (табл. 1), с характерным «едомным» запахом. Мощность

толщи супесей почти повсеместно превышает 25 м, всю ее по вертикали пронизывает многоярусный полигонально-жильный комплекс. Всего в едоме прослеживаются четыре циклита, циклитность подчеркнута четырьмя ярусами повторно-жильных льдов. В верхней части разреза (на абсолютных отметках 18–23 м) встречаются узкие саблевидные жилки первого яруса высотой 3–4 м, шириной 1,2–1,5 м, внедряющиеся в более широкие жилы нижнего яруса (залегают на отметках 13–18 м). Ширина жил второго яруса не превышает 1,5–2 м, расстояние между ними 5–8 м. Эти жилы расклинивают своими нижними частями чуть более широкие жилы нижерасположенного третьего яруса, которые залегают на отметках 8–13 м. Переход от второго к третьему ярусу не выражен, так как «хвосты» жил второго яруса часто расположены рядом с головами жил третьего яруса. Жилы третьего яруса также неширокие (около 2–2,2 м). Самый нижний, четвертый, ярус повторно-жильных льдов находится на высоте от 5 до 8 м, ледяные жилы этого яруса более узкие (1–1,5 м), сложены вертикально-полосчатым серым льдом.

Более ранними исследованиями в Айонской едоме также зафиксировано четыре яруса повторно-жильных льдов [Новейшие..., 1980]. «Хвосты» ледяных жил нижнего яруса проникают в желтые пески, подстилающие едомные отложения. Песчаная пачка залегают в основании разреза террасы в виде пологого купола. Кровля песка поднимается от 4 м над уровнем моря на краях купола до 8–9 м в его центре, купол протягивается вдоль побережья более чем на 5 км. В песках обнаружен комплекс пресноводных моллюсков [там же], обитающих в стоячих водоемах, т.е. пески накопились в условиях пресноводного водоема. В обнажении термокарстового (аласного) понижения

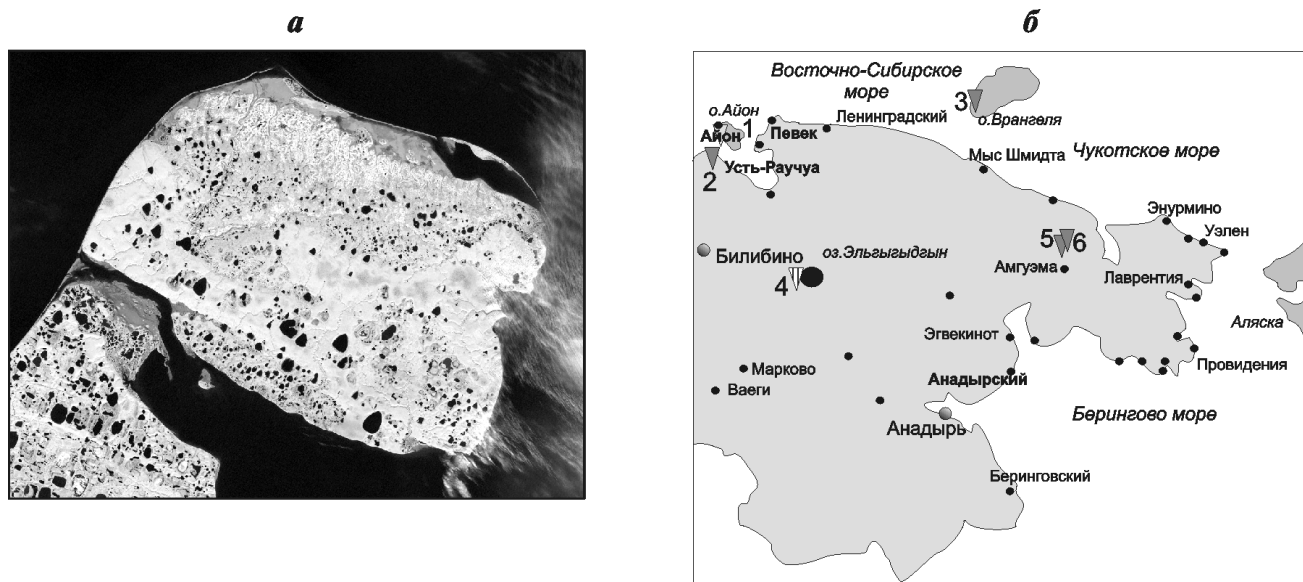


Рис. 1. О. Айон на космическом снимке, четко прослеживается полигональный рельеф (а), и районы исследований позднеплейстоценовых и голоценовых повторно-жильных льдов на севере и западе Чукотки (б): 1 — о. Айон; 2 — устье р. Раучуа; 3 — о. Врангеля; 4 — оз. Эльгыгытгын; 5 — р. Экитыки; 6 — среднее течение р. Амгуэма



Рис. 2. Отбор образцов для изотопно-геохимических определений из позднеплейстоценовой сингенетической ледяной жилы Айонской едомы. Фото Ю.К. Васильчука

на поверхности едомы вскрыт торфяник (алас), который подстиляется серой и коричневой супесью и содержит голоценовые повторно-жильные льды высотой 3 м.

Отбор образцов для аналитических исследований. Едомная толща и позднеплейстоценовые ледяные жилы, а также голоценовые озерно-болотные отложения и голоценовые ледяные жилы опробованы на изотопный, химический, энзиматический и радиоуглеродный анализы (рис. 2). Содержание пыльцы и спор определено в повторно-жильных льдах. Для радиоуглеродного датирования из едомных отложений отобраны корешки трав — наиболее надежный материал для датирования едомных толщ, поскольку они находятся в разрезе *in situ*. Образцы на изотопный анализ отбирали по единой разработанной методике [Васильчук, 1992]. На изотопный анализ образцы льда отобраны из осевых частей ледяных жил с интервалом 0,2–0,5 м. Опробованы как наиболее крупные ледяные жилы, так и мелкие в верхней и нижней частях толщи, а также текстурные льды (рис. 3).

Результаты исследований и их обсуждение. Радиоуглеродные датировки получены для верхней и нижней частей едомной толщи. Датироваемый материал — корешки. Датирование корешков трав в отсутствие других органических макроостатков позволяет получить вполне надежные значения возраста [Васильчук, 1992; Murton et al., 2015]. Корешки на высоте 8,5 м датированы 28,6 тыс. лет, на высоте 9 м — 28,1 тыс. лет и на высоте 30,5 м — 10 тыс. лет (рис. 3, табл. 2). Таким образом, едомная толща на о. Айон накопилась в позднем плейстоцене, в возрастном интервале 30–10 тыс. лет назад (л. н.).

Таблица 1

Состав отложений и криогенное строение позднеплейстоценовых едомных и голоценовых торфяных толщ Чукотки

Глубина, м	Состав отложений	Криотекстура	Особенности криогенного строения
О. Айон, западное побережье, едома на берегу Восточно-Сибирского моря, высота 37 м (точка 337-YuV), Чаун-Чукотка			
0–0,5	Торф светло-коричневый, сильноопесчаненный, слоистый за счет переслаивания более и менее опесчаненных слоев	талый	
0,5–2,0	Торф черный и темно-коричневый, с небольшой примесью супеси	массивная и редкослоистая	
2,0–3,0 (иногда до 5,0)	Супесь светло-серая, легкая, опесчаненная	базальная и слоистая	Сильнольдистая
3,0 (5,0)–25,0	Супесь темно-коричневая, опесчаненная, с небольшой примесью корешков растений, иногда с гнездами торфа или копролитами	массивная и мелкосетчатая	шпиры мощностью до 0,5 см
25,0–37,0	Песок серовато-желтый, с редкой фауной морских моллюсков	массивная	
О. Айон, западное побережье, торфяная вкладка в верхней части едомы на берегу Восточно-Сибирского моря (точка 337-YuV), Чаун-Чукотка			
0,0–0,35	Торф коричневый, среднеразложившийся, сухой	талый	
0,35–1,9	Торф коричневый, твердомерзлый	массивная и редкослоистая	сильнольдистый
1,9–3,1	Супесь серая легкая	массивная	льдистая

На основании полученных данных путем интерполяции нижний фрагмент разреза, включающий самый нижний четвертый ярус повторно-жильных льдов, предположительно имеет возраст в интервале 30–26 тыс. л.н. В жилах этого яруса значения колеблются в диапазоне $-34,0 \div -30,3\text{‰}$, среднее значение составляет $-31,15\text{‰}$ (табл. 3). Распределение значений контрастное, начало накопления жильных льдов этого яруса, вероятно, связано с очень холодным периодом, поскольку здесь отмечено наиболее низкое содержание тяжелых изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O} = -34\text{‰}$).

Фрагмент разреза, включающий наиболее мощные жилы третьего яруса, предположительно формировался 26–20 тыс. л. н. Наиболее низкие значения (-33‰) отмечены на отметке +13 м. Среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ в жилах этого яруса составляет $-31,6\text{‰}$.

Время формирования повторно-жильных льдов второго яруса предположительно датируется периодом 15–20 тыс. л. н. Колебания изотопного состава составляют 3 ‰ (от -32 до -29‰). Распределение контрастное, но в целом содержание тяжелых изотопов кислорода выше, чем в первом и втором ярусе, среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ в жилах этого яруса составляет $-30,5\text{‰}$. Жилы верхнего (первого) яруса характеризуются относительно высоким содержанием тяжелых изотопов кислорода, среднее значение $\delta^{18}\text{O}$ в этом фрагменте равно $-29,3\text{‰}$.

Голоценовая озерно-болотная вкладка с ледяными жилами имеет высоту более 3 м (рис. 4) и находится в верхней части разреза. Значения $\delta^{18}\text{O}$ в голоценовых ледяных жилах практически стабильны (от $-21,0$ до $-22,3\text{‰}$), наиболее отрицательные значения отмечены для верхних частей жил; кайма голоценовой ледяной жилы и примыкающие к ней шпирьы льда имеют более тяжелый изотопный состав ($-16,1\%$).

При сравнении изотопно-кислородной диаграммы, полученной по образцам из многоярусного комплекса позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов о. Айон (рис. 5, А), с диаграммой для жил из едомы Плахинский Яр в низовьях Колымы (рис. 5, Б), отложения в которой датированы в интервале 30–11 тыс. л. н., а повторно-жильный лед с помощью прямого AMS-датирования — от 27 до 11 тыс. л. н. [Vasil'chuk et al., 2004], удалось проследить сходные тенденции. На обеих диаграммах выделено 4 цикла: а) 15–12 тыс. л. н., среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -31,1\text{‰}$ (глубина 2,7–1,8 м); б) 20–15 тыс. л. н., среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -32,6\text{‰}$ (глубина 8,1–4,0 м); в) 26–20 тыс. л. н., среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -33,0\text{‰}$ (глубина 12,2–8,6 м); г) 30–26 тыс. л. н., среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -33,8\text{‰}$ (глубина 13,2–14,5 м). На глубине 12 и 6 м в разрезе Плахинский Яр отмечены четко выраженные пики в распределении солей. Здесь сухой остаток превышает 0,2%, при этом пики представлены се-

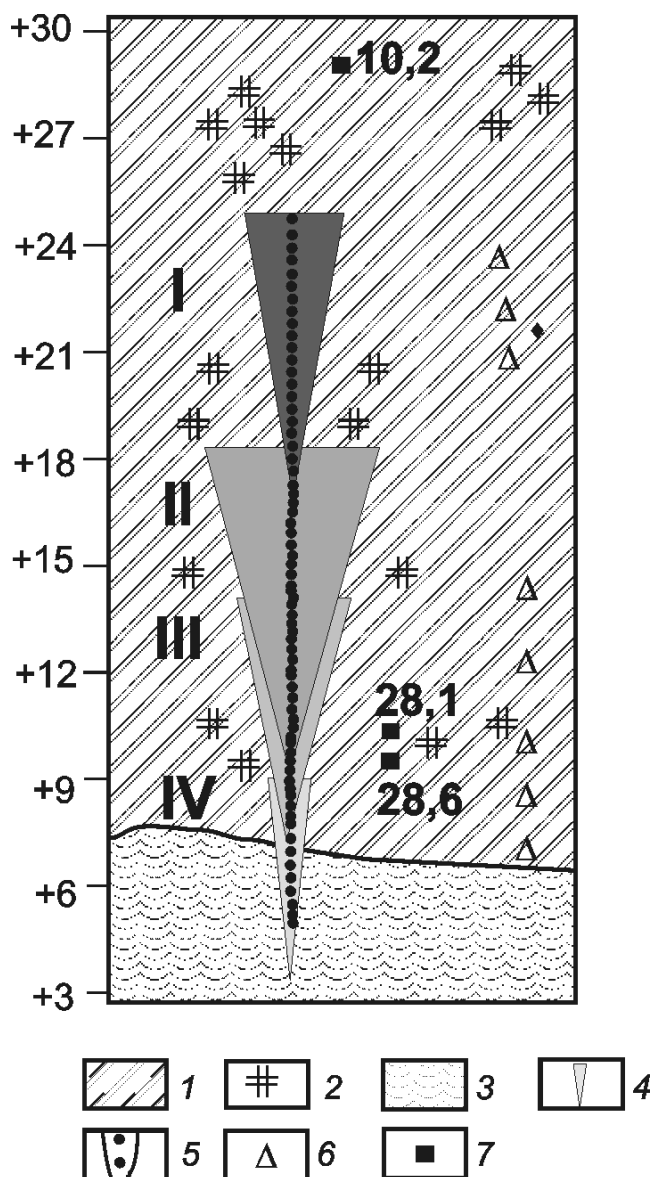


Рис. 3. Схема отбора образцов в позднеплейстоценовой части разреза, криолитологическое строение разреза позднеплейстоценового ледового комплекса на о. Айон: 1 — супесь; 2 — корешки и аллохтонный детрит; 3 — песок; 4 — повторно-жильный лед; 5–7 — точки отбора образцов: 5 — на изотопно-кислородный анализ из повторно-жильных льдов, 6 — на изотопно-кислородный анализ из текстурных льдов, 7 — на радиоуглеродный анализ из вмещающих отложений и ^{14}C -датировки; римскими цифрами обозначены ярусы ледяных жил (I–IV)

риями определений, а не единичными значениями [Васильчук, 1992].

В современных ледяных жилках на лайде о. Айон значения $\delta^{18}\text{O}$ изменяются от $-23,0$ до $-18,6\text{‰}$. На метеостанции о. Айон в 1996–2000 гг. в рамках программы SNIP (Siberian Network of Isotopes in Precipitation) были отобраны атмосферные осадки для изотопных определений. Осредненные значения $\delta^{18}\text{O}$ в осадках составили $-21,09\text{‰}$, а значения $\delta^2\text{H} = -169,3\text{‰}$ [Kurita et al., 2004]. Эти значения сопоставимы с данными о среднем изотопном составе современных и голоце-

Таблица 2

Радиоуглеродные датировки позднеплейстоценовых и голоценовых отложений о. Айон

Разрез, точка	Абсолютная вы-сота/ глубина, м	Материал	Возраст, ^{14}C лет	Возраст, калибр. лет	Индекс
Позднеплейстоценовые отложения					
337-YuV/2	+30,5	Корешки	10180 ± 280	10 743–9210	ГИН-4967
337-YuV/16	+8,5	то же	28600 ± 1000	32 771–29 046	ГИН-4968
337-YuV/3	+9,0	то же	28100 ± 800	31 925–28 983	ГИН-4969
Голоценовые отложения, по [Новейшие отложения..., 1980]					
Пойма ручья	0,5	Торф	1280 ± 20	672–770	МГУ-583
Археологическая стоянка, западный берег	0,2	Древесина	1400 ± 125	387–940	МГУ-598
	0,5	Уголь	1470 ± 125	256–860	МГУ-597
Северо-запад, берег, древние аласы	0,5	то же	5680 ± 900	6685–2472	МГУ-595
Древние аласы*	1,5	Торф	6920 ± 110	6003–5636	МГУ-596
Древние аласы *	0,2	то же	8470 ± 140	7936–7084	МГУ-601
Р. Рывеем, пос. Ленинградский*	6–7	то же	33700 ± 800	38 081–34 233	МГУ-338
	3–4	то же	7890 ± 120	7067–6486	МГУ-273

* По [Тараканов и др., 1974].

новых ледяных жил, так как получены в основном для осадков зимнего сезона.

Отложения, вмещающие и подстилающие ледяные жилы, характеризуются низким содержанием легкорастворимых солей в водной вытяжке. В подстилающей едому песчаной толще их сумма не превышает 0,05% (табл. 4). В едомных отложениях эти значения колеблются от 0,46% в основании пачки супесей до 0,07% в самом веру, в среднем 0,2%. Химический состав водной вытяжки характеризуется преобладанием в составе анионов хлоридов и гидрокарбонатов, а в составе

катионов — натрия и калия. Соотношение содержания хлорид-иона к сульфат-иону в песчаной пачке не превышает 2,2 (рис. 6), а в пачке супесей на абсолютных отметках +8 и +13 м отмечены два пика, где это соотношение составляет 8,5 и 7,2 соответственно, содержание легкорастворимых солей в этих супесях имеет средние значения по разрезу.

Минерализация повторно-жильных льдов соответствует ультрапресным льдам (36–106 мг/л, табл. 5). Среди анионов преобладает гидрокарбонат-ион, среди катионов — натрий и калий. Для срав-

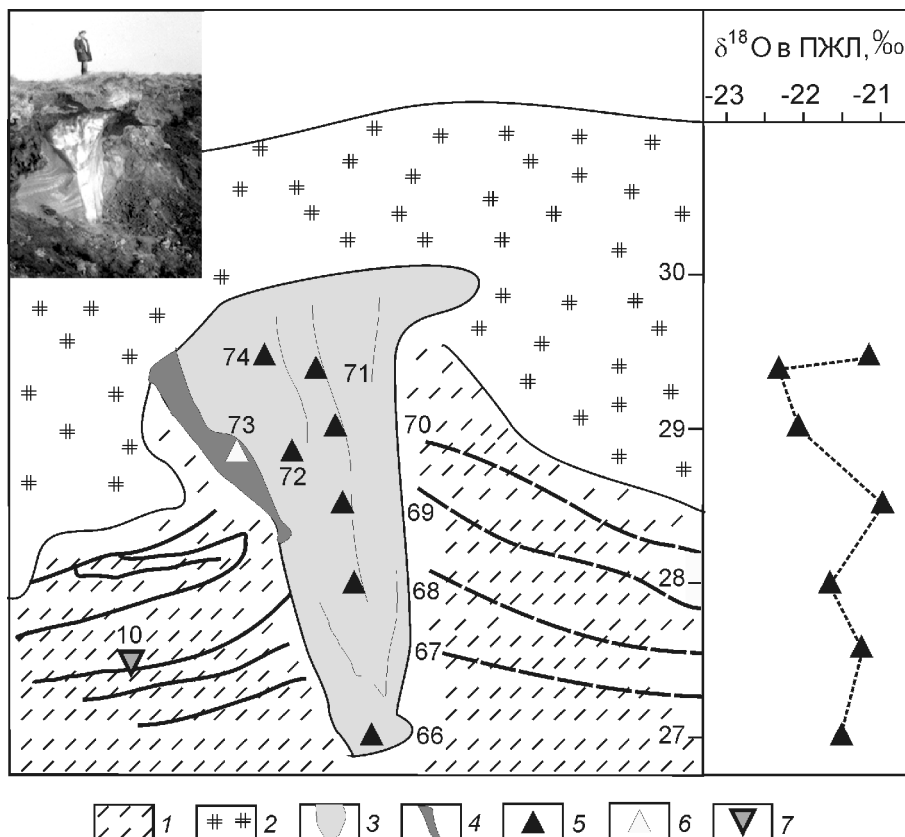


Рис. 4. Криолитологическое строение разреза голоценовой торфяной вкладки в верхней части Айонской едомы. Схема отбора образцов и изотопно-кислородная диаграмма голоценового повторно-жильного льда: 1 — супесь; 2 — торф; 3 — жильный лед; 4 — лед каймы жилы; 5–7 — точки отбора образцов льда для изотопных определений: 5 — из голоценовой жилы, 6 — из каймы, 7 — из ледяного штира

Таблица 3

Вариация значений $\delta^{18}\text{O}$ в позднеплейстоценовых (ПЖЛ) и голоценовых (гПЖЛ) повторно-жильных льдах и текстурных льдах о. Айон

Номер образца	Абсолютная высота отбора, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	Вид льда	Номер образца	Абсолютная высота отбора, м	$\delta^{18}\text{O}$, ‰	Вид льда
Сингенетические позднеплейстоценовые ПЖЛ в едомной толще							
337-YuV/33	+15,5	-29,9*	ПЖЛ	337-YuV/65	+24,0	-29,5	ПЖЛ
337-YuV/34	+15,3	-29,4		337-YuV/77	+5,0	-30,2	
337-YuV/35	+15,1	-29,6		337-YuV/78	+5,4	-34,0*	
337-YuV/36	+15,0	-29,6		337-YuV/79	+5,9	-31,1	
337-YuV/37	+14,8	-29,9		337-YuV/80	+6,2	-31,7	
337-YuV/38	+14,6	-31,1*		337-YuV/81	+6,5	-30,8	
337-YuV/39	+14,4	-31,0		337-YuV/82	+6,7	-30,5	
337-YuV/40	+13,6	-30,0		337-YuV/83	+7,0	-31,8*	
337-YuV/41	+13,5	-30,0		337-YuV/84	+6,5	-30,6	
337-YuV/42	+13,3	-29,5		337-YuV/85	+7,0	-30,9*	
337-YuV/43	+13,0	-29,4		337-YuV/86	+7,5	-30,5	
337-YuV/44	+16,0	-30,5		337-YuV/87	+8,0	-30,6	
337-YuV/45	+16,2	-31,0*		337-YuV/88	+8,5	-30,8	
337-YuV/46	+16,4	-28,7		337-YuV/89	+9,0	-32,3*	
337-YuV/47	+16,7	-30,1		337-YuV/90	+9,5	-31,0	
337-YuV/48	+17,0	-31,2		337-YuV/91	+9,6	-31,3	
337-YuV/50	+17,7	-29,4		337-YuV/92	+10,0	-31,1	
337-YuV/51	+18,0	-29,3		337-YuV/93	+11,0	-32,5*	
337-YuV/52	+18,4	-29,6		337-YuV/94	+12,0	-31,1	
337-YuV/53	+19,0	-29,6		337-YuV/95	+13,0	-32,9*	
337-YuV/54	+19,3	-29,5		337-YuV/96	+14,0	-30,2	
337-YuV/55	+19,3	-29,0		337-YuV/97	+14,5	-30,9	
337-YuV/56	+19,5	-29,2		337-YuV/99	+15,5	-31,7*	
337-YuV/57	+19,8	-28,9		337-YuV/100	+16,0	-30,6	
337-YuV/58	+20,2	-29,7		337-YuV/101	+16,5	-30,4	
337-YuV/59	+20,5	-29,5*		337-YuV/102	+17,0	-30,6	
337-YuV/60	+21,0	-28,9		337-YuV/104	+18,0	-32,2*	
337-YuV/61	+13,5	-28,4*		337-YuV/105	+18,7	-30,0	
337-YuV/62	+13,0	-30,8		337-YuV/106	+19,5	-30,2	
337-YuV/63	+12,5	-30,6		337-YuV/107	+23,0	-29,3	
337-YuV/64	+12,0	-30,1					
Сингенетические позднеплейстоценовые текстурные шпирь льда в едомной толще							
337-YuV/3	+19,4	-31,2	Текст.	337-YuV/9	+24,0	-30,0	
337-YuV/4	+20,9	-30,0		337-YuV/20	+9,5	-30,2	
337-YuV/5	+20,1	-29,0		337-YuV/21	+8,0	-30,0	Текст.
337-YuV/7	+15,0	-29,0		337-YuV/24	+5,5	-29,7	
337-YuV/8	+13,0	-29,9					
Сингенетические голоценовые ПЖЛ в торфяной вкладке							
337-YuV/66	+27,0	-21,5	гПЖЛ	337-YuV/70	+29,0	-22,1	гПЖЛ
337-YuV/66	+27,5	-21,2		337-YuV/71	+29,3	-22,3	
337-YuV/66	+28,0	-21,7		337-YuV/72	+29,0	-21,7	
337-YuV/66	+28,5	-21,0		337-YuV/74	+29,4	-21,1	
Кайма голоценовой ПЖЛ и текстурные шпирь льда в торфяной вкладке							
337-YuV/73	+29,0	-22,1	кайма	337-YuV/10	+27,9	-16,1	Текст.

* Изотопный анализ выполнен в Институте водных проблем РАН, остальные образцы проанализированы в Институте геологии, г. Таллин.

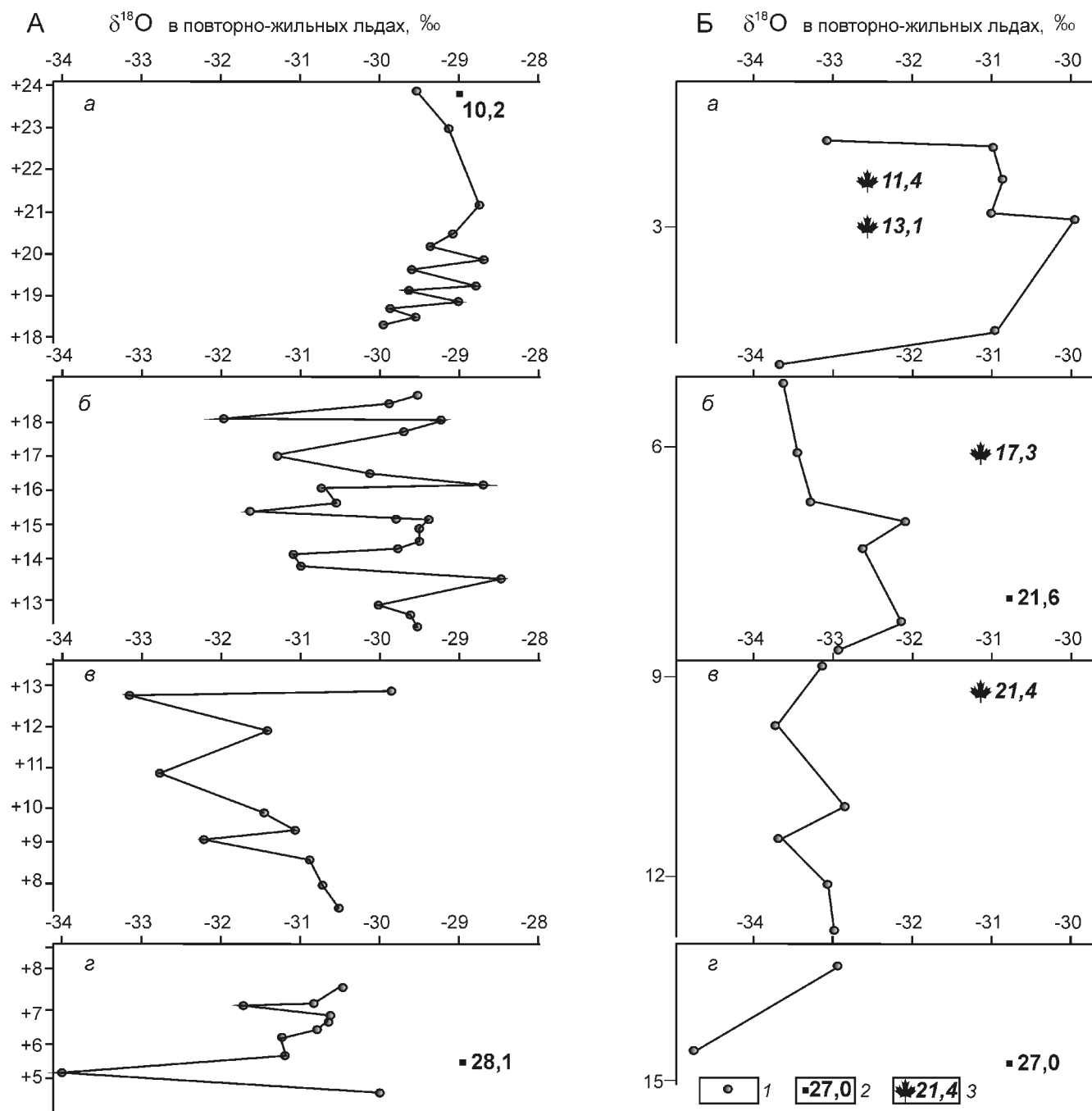
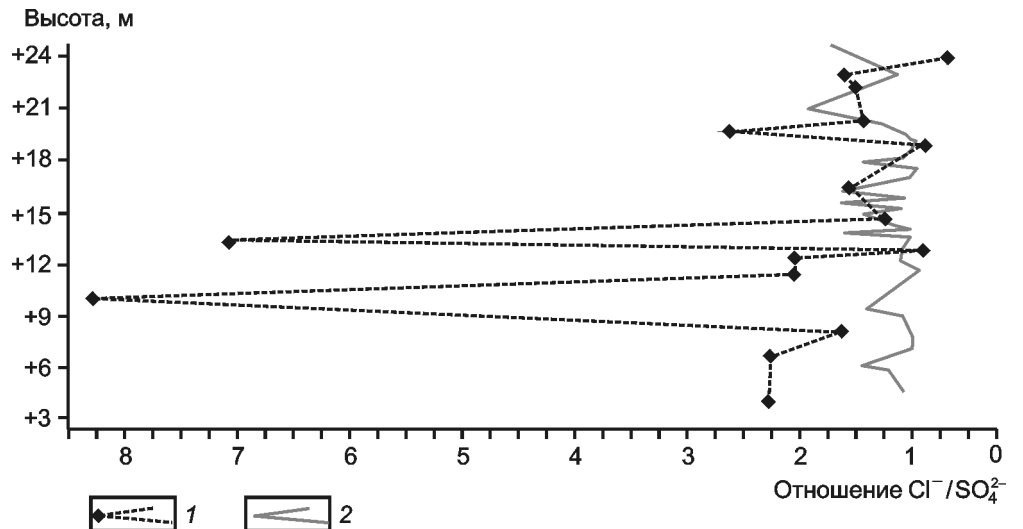


Рис. 5. Изотопно-кислородные диаграммы четырех ярусов позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов в едомной толще о. Айон (А) и в едомной толще Плахинского Яра (Б), формировавшихся 30–12 тыс. л. н. В едомной толще о. Айон выделены фрагменты жил с возрастом: а — 15–12 тыс. л. н., среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -29,6\text{‰}$ (18–23 м над уровнем моря); б — 20–15 тыс. л. н., среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -30,5\text{‰}$ (13–18 м над уровнем моря); в — 26–20 тыс. л. н., среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -31,6\text{‰}$ (8–13 м над уровнем моря); г — 30–26 тыс. л. н., среднее значение $\delta^{18}\text{O} = -31,7\text{‰}$ (5–8 м над уровнем моря); 1 — значения $\delta^{18}\text{O}$ (‰); 2 — ^{14}C -датировка из вмещающих отложений; 3 — AMS ^{14}C -датировка из повторно-жильного льда

нения определен химический состав воды озера на низкой и высокой лайте, воды из полигональной канавки на высокой лайте, снежника и морского льда. Полученные данные показали, что химический состав повторно-жильных льдов близок к составу снежника и заметно отличается от химического состава озера, воды из полигональной канавки и морского льда. Химический состав льда предполагает его преимущественно атмосферное происхождение. Соотношение ионов хлора и суль-

фата стабильно, несколько увеличивается снизу вверх (рис. 6). Сопоставление с вмещающими отложениями свидетельствует, что нижняя часть супесчаной пачки (от +3 до +13 м) накапливалась при периодическом участии морских вод: отмечены два максимума (8,5 и 7,2 на отметках +8,0 и +13,0 м над уровнем моря соответственно), а при формировании верхней части осадков влияние морских вод существенно снизилось, значения этого показателя лежат в диапазоне 0,6–2,7.

Рис. 6. Отношение содержания ионов Cl^- к содержанию ионов SO_4^{2-} во вмещающих отложениях (1) и в позднелайстоценовых сингенетических повторно-жильных льдах (2) Айонской едомы



Для определения морского влияния на состав повторно-жильных льдов в 12 образцах проанализирована энзиматическая (протеолитическая) активность. Полученные значения составили от 30 до 216 ферментных единиц (ф.ед.) на 1 л. В современном ростке жильного льда на лайде о-ва Айон протеолитическая активность составила 82 ф.ед. на 1 л, а в образце плавучего льда на море — 130 ф.ед. на 1 л, в пресной озерной воде значения протеолитической активности составили 20 ф.ед. на 1 л. В повторно-жильных льдах нижнего яруса отмечена самая высокая протеолитическая активность по разрезу — 216 ф.ед. на 1 л. Полученные данные могут свидетельствовать о том, что нижний ярус ледяных жил формировался с участием морских аэрозолей. В средней части разреза зна-

чения протеолитической активности составляют от 30 до 112 ф.ед. на 1 л. Это может указывать на периодическое изменение роли морских аэрозолей в формировании жильных льдов.

В едомных отложениях определена диатомовая флора: 14 пресноводных и пресноводно-солонатоводных видов диатомей и один морской вид (*Melosira sulcata*), как правило, с оценками встречаемости «единично» [Новейшие отложения..., 1980]. Почвенные комплексы диатомей на глубине 28,0 и 11,5 м свидетельствуют, по меньшей мере, о двукратном осушении водоема. Результаты анализа фауны жуков из едомной толщи позволяют предположить однократную смену открытых ландшафтов сухих тундр мезофильными ландшафтами с широким распространением кустарников

Таблица 4

Состав и содержание воднорастворимых солей в сингенетических мерзлых отложениях 25–30-метровой позднелайстоценовой едомы о. Айон

Номер образца	Абсолютная высота отбора, м	Сухой остаток, %	Состав компонентов, %						pH
			HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^+ + K^+$	
337-YuV/9	+24,0	0,074	0,015	0,010	0,016	0,002	0,001	0,016	7,56
337-YuV/4	+20,9	0,105	0,026	0,026	0,017	0,008	0,002	0,022	7,90
337-YuV/5	+20,1	0,137	0,026	0,034	0,029	0,012	0,004	0,026	7,76
337-YuV/6	+19,8	0,160	0,027	0,044	0,032	0,015	0,001	0,036	7,81
337-YuV/14	+19,5	0,214	0,029	0,058	0,045	0,013	0,007	0,042	7,15
337-YuV/3	+19,4	0,093	0,011	0,030	0,011	0,006	0,003	0,017	7,26
337-YuV/15	+16,5	0,177	0,034	0,035	0,038	0,013	0,005	0,029	7,86
337-YuV/17	+14,5	0,153	0,040	0,031	0,020	0,011	0,005	0,023	8,05
337-YuV/7	+15,0	0,182	0,049	0,035	0,029	0,009	0,003	0,040	8,18
337-YuV/8	+13,0	0,165	0,049	0,036	0,005	0,010	0,003	0,027	8,16
337-YuV/18	+13,0	0,205	0,032	0,039	0,044	0,016	0,006	0,029	7,81
337-YuV/19	+11,0	0,200	0,046	0,033	0,016	0,019	0,008	0,009	7,84
337-YuV/20	+9,5	0,166	0,046	0,022	0,010	0,015	0,006	0,008	7,82
337-YuV/21	+8,0	0,218	0,024	0,034	0,004	0,012	0,005	0,011	6,44
337-YuV/22	+7,0	0,462	0,043	0,086	0,066	0,039	0,015	0,031	7,60
337-YuV/23	+5,0	0,052	0,015	0,011	0,005	0,005	0,001	0,007	7,33
337-YuV/25	+3,0	0,040	0,012	0,011	0,005	0,004	0,001	0,007	7,24

Таблица 5

Состав и содержание воднорастворимых солей в сингенетических повторно-жильных льдах 25–30-метровой позднелейстоценовой едомы и современных льдах и водоемах о. Айон

Номер образца	Абсолютная высота отбора, м	Сухой остаток, мг/л	Состав компонентов, мг/л						pH
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ + K ⁺	
Сингенетические повторно-жильные льды									
337-YuV/65	+24,0	82	49	16	12	11	4	15	7,47
337-YuV/107	+23,0	60	34	7	13	7	2	12	7,48
337-YuV/58ф	+20,2	104	61	20	12	5	4	28	7,87
337-YuV/58	+20,2	80	40	12	18	5	2	23	7,52
337-YuV/57	+19,8	70	46	5	12	9	1	14	7,64
337-YuV/55	+19,3	90	52	8	23	10	4	18	7,42
337-YuV/53	+19,0	78	46	9	17	8	3	16	7,63
337-YuV/52	+18,4	66	37	8	12	7	2	14	7,20
337-YuV/104	+18,0	84	37	17	17	8	4	16	7,50
337-YuV/103	+17,5	88	49	9	19	9	3	17	7,58
337-YuV/102	+17,0	54	28	6	12	4	2	12	7,35
337-YuV/46	+16,4	108	67	18	16	9	5	24	7,65
337-YuV/45	+16,2	74	43	9	16	9	3	16	7,65
337-YuV/44	+16,0	54	33	9	8	6	2	12	7,38
337-YuV/100	+16,0	70	49	7	12	7	2	17	7,46
337-YuV/33	+15,5	106	61	18	17	8	5	24	7,00
337-YuV/34	+15,3	56	40	7	8	7	2	12	7,07
337-YuV/35	+15,1	44	15	8	11	6	3	4	7,52
337-YuV/98	+15,0	48	28	7	10	5	1	12	7,63
337-YuV/37	+14,8	68	37	9	16	5	2	18	7,63
337-YuV/38	+14,6	70	55	8	7	9	3	13	7,41
337-YuV/39	+14,4	58	34	6	11	5	1	14	7,40
337-YuV/96	+14,0	50	24	7	10	3	3	10	7,40
337-YuV/40	+13,6	68	33	9	15	7	2	15	7,13
337-YuV/61	+13,5	50	34	5	8	8	1	9	7,12
337-YuV/41	+13,5	76	49	9	10	11	1	15	7,52
337-YuV/42	+13,3	104	49	12	26	11	1	24	7,67
337-YuV/36	+13,0	58	35	9	10	4	3	14	7,47
337-YuV/43	+13,0	64	37	11	8	7	1	15	7,48
337-YuV/63	+12,5	62	37	7	13	5	4	11	7,06
337-YuV/64	+12,0	50	28	7	11	6	2	10	7,27
337-YuV/94	+12,0	48	18	6	15	5	1	9	7,35
337-YuV/89ф	+9,0	36	21	5	5	4	2	5	6,86
337-YuV/89	+9,0	44	24	5	8	5	1	8	7,30
337-YuV/85	+7,0	36	15	5	9	4	1	7	6,75
337-YuV/83	+7,0	36	14	5	9	4	1	7	7,15
337-YuV/82	+6,7	42	18	7	7	5	3	4	6,92
337-YuV/79	+5,9	62	28	10	13	7	1	13	7,23
337-YuV/77	+5,0	54	15	8	14	6	1	10	6,95
Современные льды, снежник и озера									
Морская льдина	0,0	1138	9	673	27	5	25	399	6,35
Озеро, высокая лайда	+2	50	21	14	5	3	3	10	7,05
Озеро, низкая лайда	+0,5	1238	119	741	24	126	122	160	7,63
Вода из полигональной канавки на высокой лайде	+1,5	318	12	185	7	14	13	87	6,4
Снежник	+1,5	48	12	7	12	2	0,1	13	7,33

Таблица 6

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в ростках современных сингенетических повторно-жильных льдов на о. Айон, на севере Чукотки и близлежащих островах Восточной Арктики России, по [Васильчук, 1992] с дополнениями

Местоположение современных жилок и координаты	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р.}}$, ‰	Σt°_3	$t_{\text{ср.з}}$	$t_{\text{я}}$	$t_{\text{гр}}$
О. Айон (69°47' с.ш., 168°39' в.д.)	-20.0	-5047	-20	-29	-12
Устье р. Раучуа (69°30' с.ш., 166°43' в.д.)	-22.0	-5436	-21	-32	-13
Р. Кувет (69°16' с.ш., 175°02' в.д.)	-21.0	-4700	-18	-27	-11
О. Врангеля (71°14' с.ш., 179°24' з.д.)	-20.0	-4272	-17	-25	-11
Р. Амгуэма (67°03' с.ш., 178°53' з.д.)	-19.0	-4992	-19	-29	-11
Оз. Коолень (65°59' с.ш., 170°58' з.д.)	-16.0	-3400	-14	-22	-7
Оз. Эльгыгытгын (67°30' с.ш., 172°00' в.д.)	-20.4	-4598	-18	-27	-10
О. Генриетты (77°06' с.ш., 156°30' в.д.)	-15.3	-5330	-17	-27	-12
О. Жохова (76°09' с.ш., 152°43' в.д.) [5]	-20.0	-5363	-18	-29	-13
О. Котельный (75°27' с.ш., 140°50' в.д.)	-18.1	-5408	-19	-29	-14
О. Земля Бунге (75°24' с.ш., 141°16' в.д.) [4]	-17.6	-5989	-21	-28	-14
О. Малый Ляховский (74°07' с.ш., 140°40' в.д.)	-18,0	-5408	-20	-31	-14
О. Большой Ляховский, юг (74°07' с.ш., 140°40' в.д.)	-20.4	-5400	-20	-31	-14
О. Новая Сибирь (75°03' с.ш., 148°28' в.д.)	-18.0	-5500	-20	-30	-14
О. Четырехстолбовый (70°47' с.ш., 161°36' в.д.)	-20.0	-5143	-19	-30	-13
Плахинский Яр (70°47' с.ш., 161°36' в.д.)	-25.0	-5733	-23	-35	-13

Примечания. $\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р}}$ — значения $\delta^{18}\text{O}$ в ростках повторно-жильных льдов, ‰ к SMOW; Σt°_3 — сумма зимних температур, град.-сут., $t_{\text{ср.з}}$ — среднезимняя температура воздуха, °С; $t_{\text{я}}$ — средняя январская температура воздуха, °С; $t_{\text{гр}}$ — среднегодовая температура грунта °С, без снежного и растительного покровов.

и позднее ландшафтами характерного криоксеротического облика. Аналогичные изменения фауны жуков зафиксированы в разрезе едомной свиты Дуванного Яра на Колыме.

По результатам аналитических определений можно проследить, что за весь период накопления едомных отложений на о. Айон фациальная обстановка изменялась: субаквальные условия сменялись субаэральными, что фиксируется данными диатомового анализа. Отмечено по крайней мере 2 непродолжительных периода повышения роли морских аэрозолей при формировании едомного циклита, содержащего третий ярус повторно-жильных льдов.

Реконструкции значений зимней температуры.

Для сравнения с данными для о. Айон авторами проведены реконструкции значений среднезимней и среднеянварской температуры по разрезам Чаун-Чукотки, которые сопоставлены с данными по разрезу Плахинский Яр в низовьях Колымы. Изотопный состав позднеплейстоценовых сингенетических повторно-жильных льдов в ряде местонахождений Чаун-Чукотки изучен А.Н. Котовым в устье р. Раучуа на побережье Восточно-Сибирского моря, на р. Экитыки, в среднем течении р. Амгуэма, на о. Врангеля [Котов, 1998, 1999а, б]. Ре-

конструкции среднеянварской ($t_{\text{я}}$) и среднезимней ($t_{\text{ср.з}}$) температуры выполнены на основании сравнения изотопного состава современных жильных ростков ($\delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р}}$) и современной зимней температуры для периода формирования жильных ростков, т.е. последних 60–100 лет (табл. 6) [Васильчук, 1992], и полученных двух уравнений:

$$t_{\text{я}} = 1,5 \delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р}} (\pm 3 \text{ } ^\circ\text{C}) \text{ и } t_{\text{ср.з}} = \delta^{18}\text{O}_{\text{ж.р}} (\pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}).$$

По приведенным уравнениям рассчитаны значения зимней температуры воздуха для ряда разрезов Чаун-Чукотки (табл. 7).

В период накопления повторно-жильных льдов в районе устья р. Раучуа и в долине р. Экитыки (№ 5, 6 на рис. 1) 45–30 тыс. л. н. среднезимняя температура была ниже современной на 7–9 °С, а средняя температура января на 19–14 °С ниже. Для периода 30–26 тыс. л. н. на о. Айон, когда формировались повторно-жильные льды нижнего четвертого яруса, среднезимняя температура была ниже современной на 11 °С, а средняя температура января — на 17 °С, но если учитывать минимальное значение $\delta^{18}\text{O}$ жильного льда (–34‰), то разница с современной среднеянварской температурой достигала 21 °С. Для

Таблица 7

Значения $\delta^{18}\text{O}$ в повторно-жильных льдах Северной Чукотки и палеотемпературные характеристики позднего плейстоцена и голоцена

Наименование опорного разреза	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ж}}$, ‰	Палеорекострукции				Современные значения				
		$\Sigma t_{\text{з}}$	$t_{\text{сз}}$	$t_{\text{я}}^{\circ}$	$t_{\text{палео.гр}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{ж}}$, ‰	$\Sigma t_{\text{з}}$	$t_{\text{сз}}$	$t_{\text{я}}^{\circ}$	$t_{\text{совр.гр}}$
45–30 тыс. л. н.										
Устье р. Раучуа ¹	–30,5	–7500	–30	–46	–19	–22	–5436	–21	–32	–13
Р. Экитыки, приток р. Амгуэма ²	–25,9	–6500	–26	–38	–14	–19	–4990	–19	–29	–11
30–26 тыс. л. н.										
О. Айон	–31,2	–7750	–31	–46	–19	–20	–5047	–20	–29	–12
Плахинский Яр	–33,8	–8250	–33	–50	–23	–25	–5733	–23	–35	–13
О. Котельный	–29	–7750	–29	–43	–19	–18	–5408	–19	–29	–14
26–20 тыс. л. н.										
О. Айон	–31,6	–7800	–32	–47	–20	–20	–5047	–20	–29	–12
Плахинский Яр	–33,0	–8200	–33	–49	–22	–25	–5733	–23	–35	–13
Р. Амгуэма ³	–28,0	–7000	–28	–43	–16	–19	–4992	–19	–29	–11
20–15 тыс. л. н.										
О. Айон	–30,5	–7500	–30	–46	–19	–20	–5047	–20	–29	–12
Плахинский Яр	–32,6	–8000	–32	–48	–21	–25	–5733	–23	–35	–13
О. Котельный	–25	–6250	–25	–37	–16	–18	–5408	–19	–29	–14
15–12 тыс. л. н.										
О. Айон	–29,6	–7400	–30	–44	–18	–20	–5047	–20	–29	–12
Плахинский Яр	–31,1	–7750	–31	–46	–19	–25	–5733	–23	–35	–13
О. Врангеля ⁴	–28,5	–7000	–29	–43	–17	–20	–4272	–17	–25	–11
10–5 тыс. л. н.										
О. Айон	–21,6	–5500	–22	–31	–12	–20	–5047	–20	–29	–12
О. Врангеля ⁴	–21,5	–5400	–22	–30	–12	–20	–4272	–17	–25	–11
О. Котельный ⁶	–22,5	–5600	–22	–34	–15	–18	–5408	–19	–29	–14
Р. Амгуэма ³	–20,0	–5000	–20	–30	–11	–19	–4992	–19	–29	–11
Оз. Эльгыгытгын ⁵ (низ)	–23,5	–5800	–24	–35	–13	–20,4	–4598	–18	–27	–10
Оз. Эльгыгытгын ⁵ (верх)	–22,4	–5600	–22	–30	–12	–20,4	–4598	–18	–27	–10
Плахинский Яр	–27	–6750	–27	–40	–15	–25	–5733	–23	–35	–13

Примечания. $\Sigma t_{\text{з}}$ — сумма зимних температур, град.-сут.; $\delta^{18}\text{O}_{\text{ж}}$ — значения $\delta^{18}\text{O}$ в соответствующем фрагменте ледяных жил, ‰ к SMOW; $t_{\text{ср.з}}$ — среднезимняя температура, °С; $t_{\text{я}}^{\circ}$ — среднеянварская температура, °С; $t_{\text{палео.гр}}$ — среднегодовая палеотемпература грунта, °С; $t_{\text{совр.гр}}$ — современная среднегодовая температура грунта (со снятым снежным и растительным покровом), °С; ¹[Котов, 1998в], ²[Котов, 1999б], ³[Котов, 1997], ⁴[Котов, 1999а], ⁵[Schwamborn et al., 2006], ⁶[Васильчук и др., 2016].

района Плахинского Яра среднезимняя температура была ниже современной на 10 °С, а средняя температура января на 15 °С, те же показатели для этого периода на о. Котельный составляют 10 и 14 °С [Васильчук и др., 2016]. Очевидно, наиболее низкие значения среднезимней и среднеянварской температуры соответствуют периоду существенного снижения зимней температуры 29–28 тыс. л. н.

В период 26–20 тыс. л. н. среднеянварская температура на о. Айон отличалась от современной на 18 °С, среднезимняя — на 12 °С, а в районе

Плахинского Яра на 14 °С и 10 °С соответственно, в среднем течении р. Амгуэма эти показатели близки к разнице значений температуры в районе Плахинского Яра — 14 и 9 °С. Отметим, что на о. Айон 26–20 тыс. л. н., как и ранее, разница между реконструированной и современной температурой наибольшая. В период от 20 до 15 тыс. л. н. среднеянварская температура на о. Айон отличалась от современной на 17 °С, а среднезимняя — на 10 °С, для Плахинского Яра эти показатели составили 13 и 9 °С, а для едомы о. Котельный [Васильчук и др., 2016] — 8 и 6 °С. Для периода

15–12 тыс. л. н. разница значений среднеянварской и среднезимней температуры по сравнению с современной температурой на о. Айон составила 15 и 10 °С соответственно, для района Плахинского Яра — 11 и 8 °С соответственно, а на о. Врангеля отмечена весьма заметная разница по сравнению с современными температурами на острове — 18 и 12 °С.

Отмеченные заметные различия среднезимней и среднеянварской температуры по сравнению с их современными значениями дают основание предполагать, что о. Айон в течение позднего плейстоцена находился в гораздо более холодном климате (скорее всего, в отсутствие отепляющего воздействия моря), условия зимнего сезона на о. Айон были намного суровее. Реконструируемая по значениям $\delta^{18}\text{O}$ в жилах позднеплейстоценовая среднеянварская температура на о. Айон составляет от -50 до -44 °С (при современной среднеянварской температуре, равной $-28,7$ °С), а среднезимняя температура — от -34 до -29 °С (при современной среднезимней температуре, равной $-19,4$ °С).

Интерполяция данных радиоуглеродного датирования едомной толщи о. Айон показала, что наиболее низкие значения температуры приходятся на период 21–18 и 29–28 тыс. л. н., что соответствует периодам, приходящимся на глобальные периоды похолоданий (события Хайнриха № 3 и № 2 [Васильчук, 2003]). При переходе от позднего плейстоцена к голоцену разница в среднезимней температуре на о. Айон составила 9–10 °С, а среднеянварской — 13–15 °С, в то время как эти же величины для Плахинского Яра составили 6 и

9 °С соответственно. Вероятно, это следствие изменения конфигурации береговой линии и перехода территории о. Айон из континентального положения в островное благодаря повышению уровня моря. Таким образом, о. Айон стал островом только в конце плейстоцена–начале голоцена. Об этом свидетельствует изменение условий зимнего сезона. Значения среднезимней и среднеянварской температуры в первой половине голоцена (10–5 тыс. л. н.) на о. Айон обычно были на 2 °С ниже современных. Наиболее существенно по сравнению с указанным периодом к настоящему времени увеличилась среднезимняя температура в районе оз. Эльгыгытгын, Плахинского Яра и о. Врангеля (табл. 7).

Закключение. К особенностям изотопных характеристик и палеотемпературных условий о. Айон и прилегающих районов Северной Чукотки в течение последних 45 тыс. лет относятся:

- практически полное совпадение трендов распределения изотопных характеристик позднеплейстоценовых повторно-жильных льдов на о. Айон и в низовьях р. Колыма;

- наиболее низких значений зимняя температура воздуха, согласно изотопной характеристике повторно-жильных льдов, достигала 21–18 и 29–28 тыс. л. н.

- отмечен более резкий сдвиг в сторону менее отрицательных значений зимней температуры воздуха при переходе от позднего плейстоцена к голоцену по сравнению с Нижнеколымскими районами, что связано с влиянием изменения уровня моря и переходом территории о. Айон из континентального состояния в островное.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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 Ю.К. Условия формирования позднеплейстоценовых и голоценовых повторно-жильных льдов Чукотки (изотопно-криолитохронологический анализ) // Докл. АН СССР. 1989. Т. 309, № 4. С. 920–924.

Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав повторно-жильных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций): В 2 т. М.: Изд. Отдел теоретических проблем РАН, МГУ, ПНИИИС, 1992. Т. 1, 420 с.; Т. 2, 264 с.

Васильчук Ю.К., Макеев В.М., Маслаков А.А. и др. Палеогеокриологические условия формирования позднеплейстоценовых и голоценовых повторно-жильных льдов острова Котельный // Мат-лы 5-й конф. геокриологов России. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2016 г. М.: Университетская книга, 2016. Т. 2. С. 284–291.

Гудина В.И., Лаштабег В.А., Левчук Л.К. и др. Граница плиоцена–плейстоцена на севере Чукотки (по фораминиферам). Новосибирск: Институт геологии и геофизики, 1984. 104 с.

Каревская И.А., Сурков А.В., Воскресенский С.С. и др. Палеогеографические обстановки осадконакопления на шельфе Восточно-Сибирского моря // Возраст и генезис переуглублений на шельфах и история речных долин. М.: Наука, 1984. С. 43–50.

Котов А.Н. Особенности криолитогеоза в зоне абляции позднеплейстоценовых ледников // История фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Новосибирск: Наука, 1997. С. 249–259.

Котов А.Н. Аласный и ледовый комплексы отложений северо-западной Чукотки // Криосфера Земли. 1998. Т. II, № 1. С. 11–18.

Котов А.Н. Позднеплейстоценовые криолитогенные отложения и глетчерные льды в долине р. Экитыки (северная Чукотка) // Комплексное исследование Чукотки (проблемы геологии и биогеографии) Магадан: Кн. изд-во, 1999а. С. 93–102.

Котов А.Н. Криолитогенные отложения о. Врангеля // Комплексное исследование Чукотки (проблемы геологии и биогеографии). Магадан: Кн. изд-во, 1999б. С. 129–140.

Новейшие отложения и палеогеография плейстоцена Чукотки. М.: Наука, 1980. 295 с.

Свиточ А.А., Базилевская Л.И., Боярская Т.Д. Новейшие отложения и палеогеография о. Айон (Чанунская губа) // Докл. АН СССР. 1978. Т. 245, № 6. С. 1200–1204.

Степанова Г.В. Находка морских неогеновых диатомей на острове Айон (Восточно-Сибирское море) // Ежегодник Всесоюз. палеонт. об-ва АН СССР. 1989. Т. 32. С. 200–217.

Тараканов Л.В., Каплин П.А., Курсалова В.И. Структура и абсолютный возраст новейших отложений Валькарайской низменности (Северная Чукотка) // Докл. АН СССР. 1974. Т. 216, № 5. С. 1128–1130.

Kurita N., Yoshida N., Inoue G., Chayanova E.A. Modern isotope climatology of Russia: A first assessment // J. Geophys. Res. Atmosphere. 2004. Vol. 109. D03102.

Murton Ju.B., Goslar T., Edwards M.E. et al. Palaeoenvironmental interpretation of yedomasilt (ice complex) deposition as cold-climate loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia // Permafrost and Periglacial Processes. 2015. Vol. 26, Iss. 3. P. 208–288.

Schwamborn G., Meyer H., Fedorov G., et al. Ground ice and slope sediments archiving late Quaternary paleoenvironment and paleoclimate signals at the margins of El'gygytgyn Impact Crater, NE Siberia // Quaternary Res. 2006. N 66. P. 259–272.

Vasil'chuk Yu.K., Kim J.-C., Vasil'chuk A.C. AMS ^{14}C dating and stable isotope plots of Late Pleistocene ice-wedge ice // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2004. Vol. 223–224. P. 650–654.

Поступила в редакцию
12.05.2016