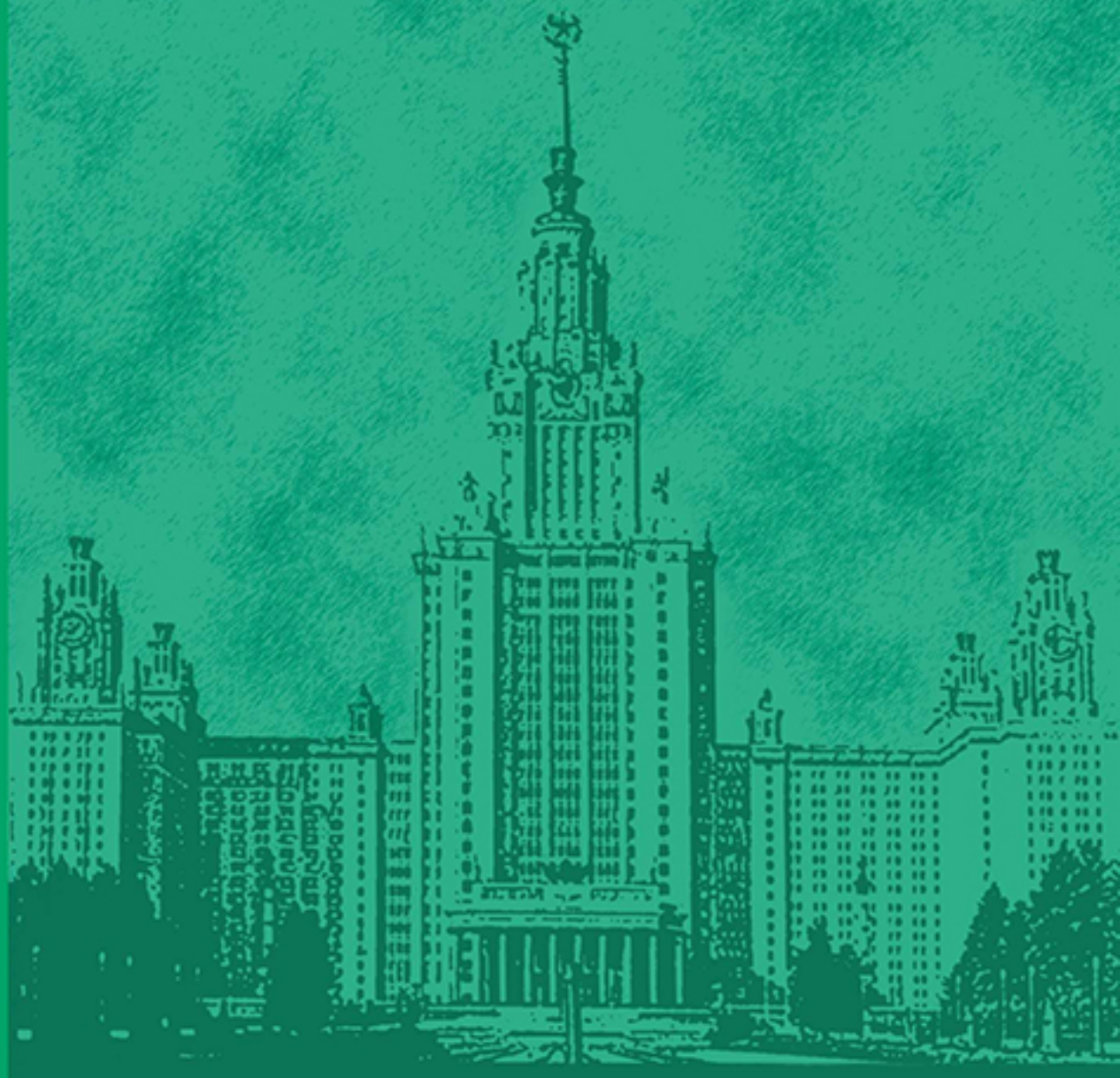
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА
Геологический факультет

СБОРНИК ДОКЛАДОВ ШЕСТОЙ конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне» с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов

14 – 17 июня 2022



Сборник докладов

Шестой конференции геокриологов России
«Мониторинг в криолитозоне»

с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов

МГУ имени М.В. Ломоносова
14 - 17 июня 2022

Пленарные доклады
Доклады по секциям:
Секция 1. *Газы и газогидраты в криолитозоне*
Секция 2. *Геокриологическая съемка и картирование*
Секция 3. *Геокриологический мониторинг*
Секция 4. *Геофизические исследования в криолитозоне*
Секция 5. *Динамическая геокриология*
Секция 6 *Изменения климата и реакция криолитозоны*
Секция 7. *Инженерная геокриология и инженерные изыскания в криолитозоне*
Секция 8. *История, методология и образование в геокри ологии*
Секция 9. *Литогенетическая геокриология*
Секция 10. *Основания и фундаменты зданий и инженерных сооружений в условиях изменения климата*
Секция 11. *Физико-химия, теплофизика и механика мерзлых грунтов*
Секция 12. *Региональная и историческая геокриология*
Секция 13.*Экологические и биологические проблемы криолитозоны*

Москва
КДУ
2022

УДК (551.34+551.345+556.12+528.9)
ББК 26.36
М34

М34 **Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне»** с участием российских и зарубежных ученых, инженеров и специалистов. МГУ имени М.В. Ломоносова, 14 - 17 июня 2022 г. : сборник статей, [электронное издание сетевого распространения]. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. – 1130 с. табл., ил. – URL: https://bookonlime.ru/node/44945 – doi: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130.

ISBN 978-5-7913-1231-0

Настоящее расширенное заседание Научного Совета по криологии Земли РАН посвящено актуальным проблемам геокриологии. Его целями являются: обсуждение наиболее важных научных результатов, полученных в последнее время, по основным направлениям геокриологии; развитие новых идей и методов в теории и практике исследований; рассмотрение перспектив и формирование задач для дальнейшего развития геокриологической науки. Рассматриваются проблемы по следующим научным направлениям: региональная и историческая, динамическая и литогенетическая геокриология; инженерная геокриология; геокриологическое картирование; экологические и биологические проблемы криолитозоны; геофизические исследования в криолитозоне, физико-химия, теплофизика и механика мерзлых пород; газы и газогидраты в криолитозоне.

УДК (551.34+551.345+556.12+528.9)
ББК 26.36

Электронное издание сетевого распространения.
Главный редактор Мотенко Р.Г.
Технический редактор Лисицына О.М.
Компьютерная верстка Шевчик Ф.А., Зубкова А.В., Черняк Ю.В.
Опубликовано 08.06.2022.
Издательство «КДУ»: 8(495) 638-57-34. www.kdu.ru

ISBN 978-5-7913-1231-0

© Коллектив авторов, 2022
© Издательство «КДУ», 2022

ПРОГРАММНЫЙ ОРГКОМИТЕТ
Шестой конференции геокриологов России «Мониторинг в криолитозоне»

Сопредседатели

Мельников Владимир Павлович - академик РАН
Брушков Анатолий Викторович - заведующий кафедрой геокриологии геологического ф-та МГУ
Железняк Михаил Николаевич – директор Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
Садуртдинов Марат Ринатович – директор Института криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН
Мажаров Александр Викторович - заместитель Губернатора Ямало-Ненецкого автономного округа, директор департамента внешних связей
Сидорова Наталия Александровна - заместитель Губернатора Ненецкого автономного округа

Члены Программного оргкомитета:

Алексеев А.Г., Алексеева О. И., Ашпиз Е.С., Богданов М.И., Васильчук Ю.К., Власов А.Н , Гальченко В. Ф., Дроздов Д.С., Дубровин В.А., Жданеев О. В., Заболотник С. .И., Игнатов С.Г., Кекелев А. И., Комаров И.А., Котов П.И., Кроник Я.А., Кошурников А.В., Кузнецов М. Е., Маслаков А.А., Мотенко Р.Г., Оспенников Е.Н., Осипов В.И., Остарков Н.А., Попова А. А., Разбегин В.Н., Ривкин Ф. М., Рязанов А.А., Сергеев Д.О., Складнев Д.А., Соболев П.С., Стрелецкая И.Д.,Трофимов В.Т., Устинова Е.В., Федосеенков С. М., Фролов А.М., Чеверев В.Г., Хрусталев Л.Н.,Хилимонюк В.З.,Черкасов А.М., Чувилин Е.М., Якушев В.С.

- ОРГАНИЗАТОРЫ КОНФЕРЕНЦИИ

Кафедра геокриологии геологического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
Научный совет по криологии Земли РАН
Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН
Кафедра криолитологии и гляциологии географического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова
Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН
Правительство Ямало-Ненецкого автономного округа
Администрация Ненецкого автономного округа
ФАНУ «Востокгосплан» Минвостокразвития РФ
ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго РФ

Литература

1. Анисимова Н.П. Криогидрогеохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. – 152 с.

2. Булатов А.И., Макаренко П.П., Шеметов В.Ю. Справочник инженера-эколога нефтедобывающей промышленности по методам анализа загрязнителей окружающей среды: М.: ООО,, Недра-Бизнесцентр", 1999. Ч. 2: Почва. – 634 с.

3. Бутаков В.И., Слагода Е.А., Тихонравова Я.В., Опокина О. Л., Томберг И.В., Жученко Н.А. Гидрохимический состав и редкоземельные элементы в полигонально-жильных льдах ключевых районов криолитозоны Карского региона // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2020, т. 331, № 2. С. 78–91. doi: 10.18799/24131830/2020/2/2483.

4. Бутаков В.И., Слагода Е.А., Опокина О. Л., Томберг И.В., Жученко Н.А. Особенности формирования гидрохимического и микроэлементного состава разных типов подземных льдов мыса Марре-Сале // Криосфера Земли, 2020, т. XXIV, № 5. С. 29–44. doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-5(29-44).

5. Васильчук Ю.К. Парагенетические ансамбли повторно-жильных льдов со льдами различного генезиса // Арктика и Антарктика. – 2018. – № 2. – С. 71 - 112. doi.org/10.7256/2453-8922.2018.2.26673.

6. Геокриология СССР. Западная Сибирь / Под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. – 454 с.

7. Дубиков Г.И., Корейша М.М. Ископаемые инъекционные льды на полуострове Ямал // Известия АН СССР. Сер. геогр. 1964. № 5. С. 58–65.

8. Курчатова А.Н., Рогов В.В. Аутигенные карбонаты в отложениях ледового комплекса приморских равнин Восточной Арктики // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 3. С. 60-69.

9. Перельман А.И. Геохимия ландшафта. Изд. 2-е. М.: Высшая школа, 1975. – 342 с

10. Полынов Б. Б. Избранные труды / Б.Б. Полынов. М.: Наука, 1956. – 751 с.

11. Слагода Е.А., Ермак А.А. Дешифрирование экзогенных процессов типичных тундр полуострова Ямал на примере территории района среднего течения р. Юрибей // Вестн. Тюм. гос. ун-та. Сер. Науки о Земле, 2014, № 4. С. 28–38.

12. Слагода Е.А., Новосёлов А.А., Королева Е.С., Кузнецова А.О., Бутаков В.И., Тихонравова Я.В., Зазовская Э.П. Следы криогенных процессов в поздненеоплейстоценовых отложениях Пур-Назовского междуречья Западной Сибири // Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 1, С. 21–35. doi.org/10.15372/KZ20220103

13. Стрелецкая И.Д., Гусев Е.А., Васильев А.А., Рекант П.В., Арсланов Х.А. Подземные льды в четвертичных отложениях побережья Карского моря как отражение палеогеографических условий конца неоплейстоцена - голоцена // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. 2012. № 72. С. 28–59.

14. Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэгов и вмещающих их отложений Центрального Ямала // Криосфера Земли. 2002. т. VI. № 3. с. 15–24.

15. Тихонравова Я.В., Лупачёв А.В., Слагода Е.А., Рогов В.В., Кузнецова А.О., Бутаков В.И., Симонова Г.В., Таратунина Н.А., Муллануров Д.Р. Строение и формирование ледогрунтовых жил второй озёрно-аллювиальной террасы на севере Гыдана в позднем неоплейстоцене–голоцене // Лёд и Снег. 2019. т. 59. № 4, С. 557–570.

16. Тихонравова Я.В., Слагода Е.А., Рогов В.В., Бутаков В.И., Лупачёв А.В., Кузнецова А.О., Симонова Г.В. Гетерогенное строение полигональножильных льдов в торфяниках Пур-Тазовского междуречья // Лёд и Снег, 2020, т. 60, № 2. С. 225–238.

17. Трофимов В. Т., Васильчук Ю. К. Синкриогенные повторно–жильные и пластовые льды в плейстоценовых отложениях севера Западной Сибири // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический, 1983, т. 58, № 4, С. 113–121.

18. Трофимов В.Т., Баду Ю.Б, Васильчук Ю.К., Кашперюк П.И., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Геокриологическое районирование Западно-Сибирской плиты. М.: Наука, 1987. – 219 с.

19. Фотиев С.М. Криогенный метаморфизм пород и подземных вод (условия и результаты) / науч. ред. В. П. Мельников, Новосибирск: Гео, 2009, 277 с.

20. Фролов В.Т. Литология. Кн.1: Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ, 1992. 336 с.

ИЗОТОПНЫЕ И ПАЛЕОТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОРРЕЛЯЦИИ ПОЗДНЕПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ ЕДОМНЫХ ОПОРНЫХ РАЗРЕЗОВ КОЛЫМСКОЙ НИЗМЕННОСТИ

Васильчук А.К., Васильчук Ю.К.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;
alla-vasilch@yandex.ru

Выполнена корреляция результатов исследования радиоуглеродного возраста едомных толщ и повторно-жильных льдов, а также палеотемпературная интерпретация изотопного состава повторно-жильных льдов, для четырех наиболее информативных разрезов едомных толщ, расположенных в низовьях р.Колымы: Бизон, Зеленый Мыс, Плахинский Яр, Дуванный Яр.

ISOTOPE AND PALEOTEMPERATURE CORRELATIONS OF THE LATE PLEISTOCENE YEDOMA REFERENCE SECTIONS OF THE KOLYMA LOWLAND

Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Yu.K.
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Leninskie gory 1, Russia;
alla-vasilch@yandex.ru

The correlation of the radiocarbon ages of yedoma and ice wedges is made, as well as paleotemperature interpretation of the isotopic composition of ice wedges, for the four most informative sections of yedoma located in the lower reaches of the Kolyma River, as follows: Bison, Zelyony Mys, Plakhinskii Yar, Duvanny Yar.

Введение

Поздний плейстоцен – время активного роста сингенетических повторно-жильных льдов(ПЖЛ) в пределах Колымской низменности. Цель данной работы сопоставление результатов исследования радиоуглеродного возраста, изотопного состава ПЖЛ, а также палеотемпературная интерпретация данных, полученных для четырех наиболее информативных разрезов едомных толщ, расположенных в низовьях р.Колымы: Бизон, Зеленый Мыс, Плахинский Яр, Дуванный Яр. Все разрезы исследованы с применением методики, разработанной Ю.К. Васильчуком для исследований синкриогенных толщ с повторно-жильными льдами [1]. Радиоуглеродное датирование выполнялось в Геологическом институте РАН, AMS-датировки микровключений органики, непосредственно экстрагированной из ледяных жил, выполнялись в лаборатории ускорительной масс-спектрометрии Сеульского национального университета при содействии проф. Й.-Ч. Кима и в лаборатории ускорительной масс-спектрометрии университета Гронингена при содействии проф. Ван дер Плихта [8]. Все полученные датировки были калиброваны с использованием калибровочной кривой IntCal20 [7] и программы Oxcal version 4.4.4 [4], возрастной диапазон установлен с вероятностью 95.4%. Измерения изотопного состава льда проводились в изотопной лаборатории института Водных проблем РАН, в изотопной лаборатории «Арсенал» (Австрия), в лаборатории стабильных изотопов географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Возраст едомных толщ и ПЖЛ

Едома Бизон расположена на правом берегу в низовьях Колымы. Разрез сложен преимущественно супесчаными отложениями с прослоями органики в виде линз и прослоев мощностью от 0,01 до 0,5 м на высоте 18 м, 15,5 м, 13 м, 11 м. Сингенетические ледяные жилы в разрезе достигают 9 м в высоту, их ширина в верхней части составляет 2-2,5 м, расстояние между жилами около 2-4 м. Вмещающие отложения имеют редкослоистую, тонколинзовидную горизонтально шлировую текстуру, в основном, массивную.

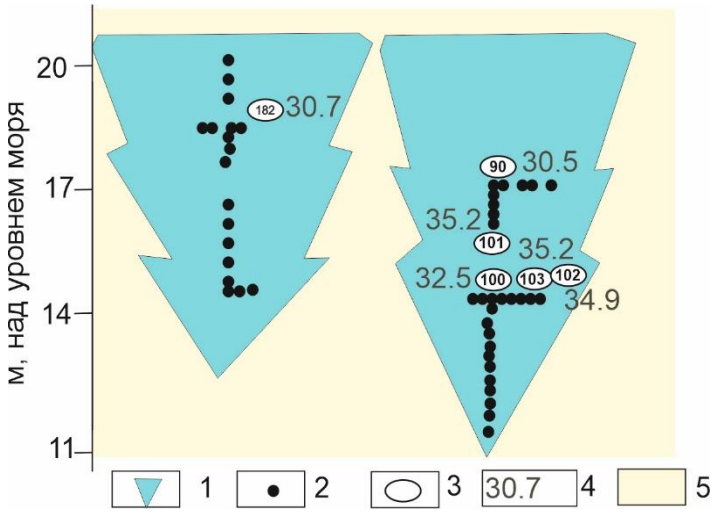


Рис. 1. Едомная толща в разрезе Бизон (по Vasil'chuk et al. [11]): 1– повторно-жильный лед; 2 – точки отбора образцов на изотопный анализ; 3 – точки отбора образцов на радиоуглеродный и палинологический анализы; 4 – медианный калиброванный ^{14}C возраст; 5 – супесь серая оторфованная, мерзлая.

Фрагмент ледяной жилы датирован методом AMS ^{14}C по щелочному экстракту, нерастворимому органическому углероду (частицы≥ 200 мкм), концентрату пыльцы и спор из одних и тех же образцов, (всего 20 датировок), что существенно повысило надежность датирования. Датировки органических включений из ледяных жил колеблются от 30,7 до 34,9. кал. тыс. лет, датировки, полученные по фракции щелочной вытяжки из тех же образцов несколько древнее: от 31,8 до 37,1 кал. тыс. лет. от 30,5 до 46,2 кал. тыс. лет. Наиболее молодые даты получены по микровключениям органики и спорово-пыльцевому концентрату. Детальный отбор проб ледяных жил (0,1 м и менее) позволил получить стабильные изотопные записи с точностью около 100 лет. Изотопный состав ПЖЛ, полученный по 167 образцам: вариации значений $\delta^{18}O$ по ледяным жилам в разрезе Бизон, составляют 3.15‰ - от –35.17‰ до –32.02‰ и вариации величин $\delta^{2}H$ составляют 18.2‰ - от – 266.2‰ до – 248.0‰ [11]. Возраст датированного фрагмента ледяных жил составил 42-30 кал. тыс. лет (табл. 1).

Едомная толща разреза Зеленый Мыс была вскрыта. в овраге в 2 км севернее пос. Зеленый Мыс на правом берегу р. Колымы (рис. 2). Обнажение высотой около 36 м состоит из двух частей: верхняя часть мощностью около 10 м, представленная серой супесью, практически без органического материала, и нижняя - коричневато серая, в которой переслаиваются оторфованные пачки с растительным детритом и супесчаные прослои без видимых органических включений. В распределении льдистости и криотекстур по разрезу, как и в литологическом строении, отмечается трехчленная мезоцикличность: повышение льдистости и уменьшение толщины шлиров льда и расстояния между ними от менее оторфованных вверх к подошве более оторфованных горизонтов.

По этому разрезу получены AMS датировки из повторно-жильного льда, а также из вмещающих отложений радиоуглеродные датировки костей, торфа, веток, гумуса и семян из норок, в общей сложности 21 радиуглеродная датировка, включая 3 AMS даты.

Таблица 1. Минимальные, максимальные и средние значения $\delta^{18}O$, $\delta^{2}H$ и d_{exc} в позднеплейстоценовых повторно-жильных (ПЖЛ) льдах, вскрытых в опорных разрезах Колымской низменности

Кол-во образ-цов	**$\delta^{18}O$, ‰**			**$\delta^{2}H$, ‰**			**d_{exc}, ‰**		
	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.	Мин.	Сред.	Макс.
				Бизон					
167	–35.17	–32.77	–32.02	–266.2	–256.50	–248.0	4.0	5.94	8.2
				Зелёный Мыс					
35	–34.1	–30.64	–27.0	–	–	–	–	–	–
				Плахинский Яр					
19	–34.7	–32.49	–29.9	–	–	–	–	–	–
				Дуванный Яр					
66	–33.11	–32.0	–30.8	–260.2	–248.64	–235.0	3.4	7.44	12.0

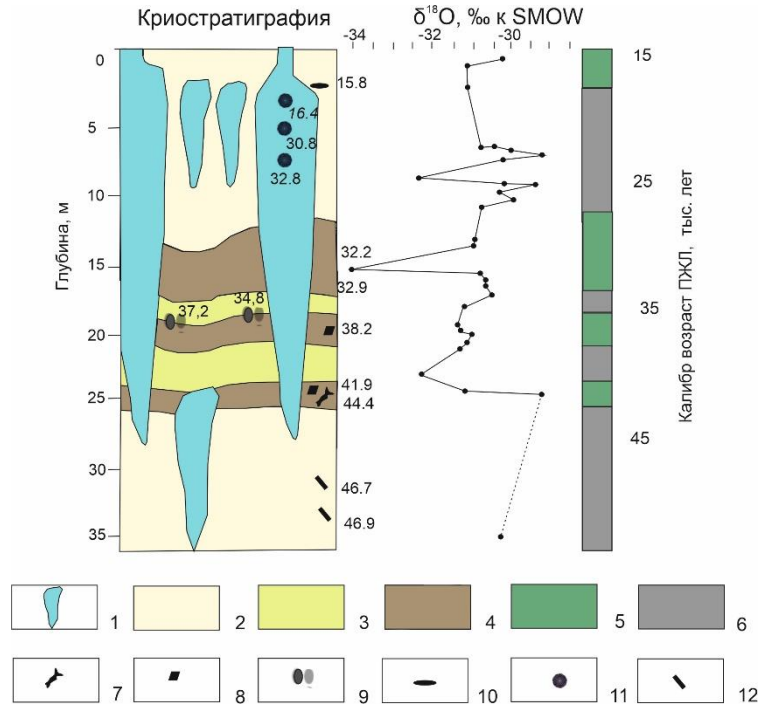


Рис. 2. Едомная толща в разрезе Зелёный Мыс. По Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A.C. [14]: 1 – лед повторно-жильный; 2 – супесь серая, мерзлая со среднеслоистой и сетчатой, средне- и тонкошлировой криотекстурой; 3 – супесь коричнево-серая, мерзлая со тонкослоистой, средне- и тонкошлировой криотекстурой; 4 – торф мерзлый с косослоистыми, решетчатыми криотекстурами; 5 – отложения субаэрального этапа накопления едомы; 6 – отложения субаквального этапа накопления едомы; медианный калиброванный ^{14}C возраст (кал. тыс. лет назад): 7 – костей; 8 – торфа; 9 – семян из норок, 10 – почв, 11 – ПЖЛ, 12 – веток; 13 – точки отбора ПЖЛ на изотопный анализ.

Нижний предел формирования едомной толщи зафиксирован тремя датировками по крупным веткам и костям мамонтовой фауны, а верхний предел определен ^{14}C датировкой из погребенной почвы, отобранной А.Пфеффер близ кровли ММП 15.7 кал

тыс. лет и AMS датировкой, полученной непосредственно из ПЖЛ - 16.4 кал тыс. лет (см. рис. 2).

Изотопный состав ПЖЛ по результатам 35 определений: вариации значений $\delta^{18}O$ по ледяным жилам в разрезе Зеленый Мыс, составляют 7.1‰ - от –34.1‰ до –27.0‰. На основании совокупности ^{14}C датировок по этому разрезу, установлено, что едомная толща накапливалась около 33 тыс. лет от 48 до 15 кал. тыс. лет [14] (Табл. 1).

Толща мощностью более 15 м, вскрытая в *обнажении Плахинского Яра* на левом берегу протоки Стадухинская, представлена серой тяжелой и средней льдистой (до 45%) супесью с редко- и неполно-сетчатой тонкошлировой криотекстурой с включениями растительных остатков (рис. 3).

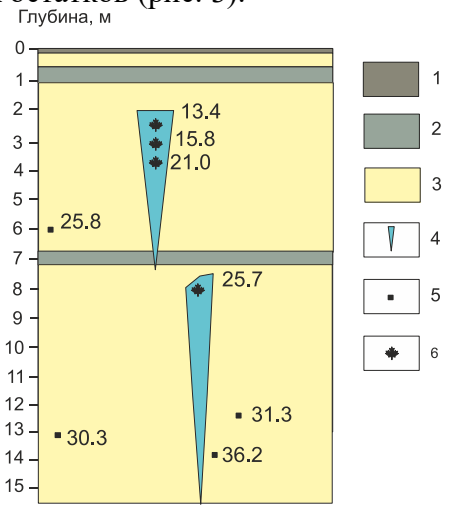


Рис. 3. Едомная толща в разрезе Плахинский Яр в обнажении14-18-метровой террасы на левобережье Стадухинской протоки р. Колымы, радиоуглеродные датировки вмещающих отложений и AMS-датировки льда (По Vasil'chuk Yu. K., Vasilchuk A.C. [13] а также AMS-датировки органики из вмещающих отложений. По M.Fukuda et al., [5]: 1 – торф; 2 – песок серый мерзлый; 3 – супесь серая с корешками и аллохтонными остатками торфа, мерзлая; 4 – сингенетические повторно-жильные льды; медианный калиброванный ^{14}C возраст (кал. тыс. лет назад): 5 – вмещающих жилы отложений; 6 – повторно-жильного льда

В толще супеси встречаются линзы песка. В отличие от других разрезов ледового комплекса в обнажении Плахинский Яр отмечены два яруса узких ледяных жил. По данному разрезу получено 14 радиоуглеродных датировок из них 4 AMS ^{14}Cдаты из ПЖЛ. Несмотря на низкое содержание органических включений, встречающихся, главным образом, в основании разреза удалось определить время начала образования видимой части разреза – в интервале 30–27 кал. тыс. лет назад, а время завершения накопления толщи 13.4 кал. тыс. лет назад (см. рис. 3). Изотопный состав ПЖЛ по результатам 19 определений: вариации значений $\delta^{18}O$ по ледяным жилам в разрезе Плахинский Яр, составляют 4.8‰ - от –34.7‰ до –29.9‰[13].

Ледовый комплекс вскрытый обнажением Дуванный Яр, высотой 45-55 м изучался длительное время разными исследователями [2,3,6,12 и др.]. Количество датировок, полученных по этому разрезу превышает 100. Авторами получено 27 ^{14}C датировок непосредственно из ПЖЛ (рис. 4).

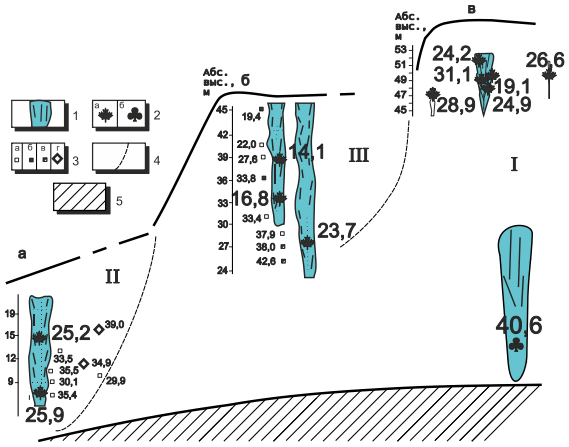


Рис. 4. Разновысотные гетерохронные и гетерогенные фрагменты разреза Дуванный Яр По Vasil'chuk Yu.K., 2005 [10]. Вертикальные срезы разных лет: а – нижняя часть нижнего по течению фрагмента, 1985 г.; б – верхняя часть среднего по течению фрагмента верхняя часть среднего по течению фрагмента, 1985 г.; в – верхняя часть среднего по течению фрагмента (расположенного выше по течению, чем фрагмент б), 1999 г.: 1 – сингенетические повторно-жильные льды; 2 – точки отбора льда жил для радиоуглеродного датирования методом AMS: а – датировки микровключений органики, б – датировки спорово-пыльцевого концентрата (дата, видимо несколько удревнена); 3 – точки отбора образцов для радиоуглеродного датирования и даты (заведомо удревненные даты изъяты, полный список датировок см. а – рассеянных корешков, б – костей, в – мелких веточек; г – наиболее молодые AMS датировки отдельных фракций макроостатков органики; 4 – ориентировочная граница более молодых террасовидных едомных фрагментов второго цикла; 5 – куполовидно залегающие синеватые суглинки в основании разреза

Тем не менее определение возраста отдельных частей этого разреза представляется довольно сложно решаемой задачей из-за формирования. Верхние 15-20 м разреза представлены супесью серой с редкими вкраплениями остатков растений. Здесь отмечены узкие жилы 1.0-1.5 м шириной расстояние между ними 4-6 м. В нижних 25-30 м встречается 3-4 оторфованных прослоя, ледяные жилы как правило широкие 2-3,5 м, расстояние между ними около 10 м. Широкие жилы как правило имеют выраженные плечики на уровне оторфованных горизонтов. На основании выбора наиболее молодых дат [12] едомный комплекс Дуванного Яра датируется от 50-45 до 13 кал. тыс. лет назад. Изотопный состав ПЖЛ по результатам 19 определений: вариации значений $\delta^{18}O$ по ледяным жилам в разрезе Дуванный Яр, составляют 2.3‰ - от –33.11‰ до –30.8‰. вариации величин $\delta^{2}H$ составляют 25.2‰ - от – 260.2‰ до – 248.64‰ [10] (см. табл. 1).

Реконструкция среднеянварской температуры в период формирования едомы Колымской низменности

Авторами ~~выполнены реконструкции среднеянварской температуры по разрезам низовий р.Колымы. Реконструкции среднеянварской ($t°_{я}$) температуры получены на основании сравнения изотопного состава современных жильных ростков ($\delta^{18}O_{р.ж.}$) и современной среднеянварской температуры для периода формирования жильных ростков, т.е. последних 60-100 лет [9].~~ В результате этого сравнения получено уравнение:

$$t°_{я} = 1{,}5\ \delta^{18}O_{р.ж.}\ (\pm 3\ °C)$$

Диапазон ±3 °С указывает на средний диапазон вариаций реконструируемой температуры в пределах анализируемого временного интервала. По приведенным уравнениям рассчитана среднеянварская температура воздуха позднего плейстоцена 48-15 кал. тыс. лет назад для отдельных периодов в опорных разрезах, изученных в низовьях р.Колымы (табл. 2).

Таблица 2. Среднеянварские ($t_я$) палеотемпературы на территории Колымской низменности, во временном интервале 47-12 кал. тыс. лет назад, реконструированные по изотопно-кислородному составу ($\delta^{18}O_{ПЖЛ}$) повторно-жильных льдов

Пункт, координаты	$\delta^{18}O_{ПЖЛ}$, ‰		$t_я$°С		Источник
	Палео.	Совр.	Палео.	Совр.	
47-42 тыс. кал. лет назад					
Зеленый Мыс	–30.2	–25.5	–45	–35	[14]
Дуванный Яр	–31.9	–25,1	–48	–35	[10]
37- 32 тыс. кал. лет назад					
Зеленый Мыс	–33.0	–25.5	–49	–35	[14]
Дуванный Яр	–32.0	–25.1	–48	–35	[10]
Бизон	–32.8	–26	–49	–35	[11]
30-25 тыс. кал. лет назад					
Зеленый Мыс	–30.2	–25.5	–45	–36	[14]
Дуванный Яр	–31.9	–25.1	–48	–35	[10]
Бизон	–33	–26	–49	–35	[11]
Плахинский Яр	–34.8	–25.8	–51	–35	[13]
24-22 тыс. кал. лет назад					
Зеленый Мыс	–30.4	–25.5	–45	–36	[14]
Дуванный Яр	–32.2	–25.1	–48	–35	[10]
Плахинский Яр	–31.6	–25.8	–47	–35	[13]
20-18 тыс. кал. лет назад					
Зеленый Мыс	–31.6	–25.5	–47	–36	[14]
Дуванный Яр	–30.5	–25.1	–46	–35	[10]
Плахинский Яр	–32	–25.8	–48	–35	[13]
16-12 тыс. кал. лет назад					
Зеленый Мыс	–30.7	–25.5	–45	–35	[14]
Дуванный Яр	–31	–25.1	–46	–35	[10]
Плахинский Яр	–31	–25.8	–46	–35	[13]

Для периода 47-42 кал. тыс. лет назад, наиболее низкая температура января отмечается для района Дуванного Яра –48°С. Как следует из результатов опробования ПЖЛ в едоме Зеленого Мыса на этом участке долины Колымы среднеянварская температура не поднималась выше –45°С. Позже в интервале 37-32 кал. тыс. лет назад в районе Зеленого Мыса среднеянварская температура снизилась до –49°С. В интервале

30-25 кал. тыс. лет назад среднеянварская температура в районе Зеленого Мыса составляла –45°С, а в районе Плахинского Яра снижалась до –51°С. В период 24-22 кал. тыс. лет назад среднеянварская температура в долине Колымы по сравнению с предыдущим интервалом не изменилась: в районе Зеленого Мыса –45°С и в районе Дуванного Яра –48°С (см. табл. 2). 20-18 тыс. кал. лет назад в долине Колымы наиболее низкие среднеянварские температуры отмечены для района Плахинского Яра –48°С, в районе Дуванного Яра чуть выше –46°С, а в районе Зеленого Мыса –47°С, т.е. это не самые низкие температуры. В период 16-12 тыс. кал. лет назад среднеянварская температура в долине Колымы оставалась низкой в районе Зеленого Мыса (–45°С) и в районе Дуванного Яра и Плахинского Яра (–46°С).

Изотопные данные показывают, что среднеянварские температуры в наиболее холодные эпохи были на 12-15°С ниже современных и колебались от –48 до –51°С, а в более умеренные отрезки времени от –40 до –45°С.

Благодарности

Работа выполнена в рамках фундаментальной госбюджетной темы "Эволюция, современное состояние и прогноз развития береговой зоны Российской Арктики (ГЗ)", номер ЦИТИС: 121051100167-1, при поддержке Российского Научного Фонда (проект №19-17-00126).

Список литературы

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

2. Каплина Т.Н. Древние аласные комплексы Северной Якутии (Сообщение 1) // Криосфера Земли. 2011. Т.15. №2. С. 3–13.

3. Каплина Т.Н. Древние аласные комплексы Северной Якутии (Сообщение 2) // Криосфера Земли. 2011. Т.15. №3. С. 20–30

4. Bronk Ramsey C. 2021. OxCal version 4.4.4. Available at: https://c14.arch.ox.ac.uk (accessed 12 August 2021).

5. Fukuda, M., Nagaoka, D., Saijyo, K. et al. Radiocarbon dating results of organic materials obtained from Siberian permafrost areas // Rep. Inst. Low Temperature Sci Sapporo, Hokkaido Univ. 1997. P. 17–28.

6. Murton Ju.B., Goslar T., Edwards M.E., Bateman M.D., Danilov P.P., Savvinov G.N., Gubin S.V., Ghaleb B., Haile J., Kanevskiy M., Lozhkin A.V., Lupachev A.V., Murton D.K., Shur Yu., Tikhonov A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk Yu.K., Wolfe S.A. Palaeoenvironmental Interpretation of Yedoma Silt (Ice Complex) Deposition as Cold-Climate Loess, Duvanny Yar, Northeast Siberia // Permafrost and Periglacial Processes. 2015. Vol. 26. Iss. 3. P. 208–288. doi: 10.1002/ppp.1843.

7. Reimer P.J., Austin, W.E.N., Bard E., Bayliss A., et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal kBP) // Radiocarbon. 2020. Vol. 62(4). P. 725–757. doi:10.1017/RDC.2020.41.

8. van der Plicht J., Aerts A., Wijma S. Zonder A. First results from the Groningen AMS facility // Radicarbon. 1995. Vol. 37(2). P. 657–661.

9. Vasil'chuk Yu.K. Reconstruction of the paleoclimate 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 (6). P. 640–647

10. Vasil'chuk Yu.K. Heterochroneity and Heterogeneity of the Duvanny Yar yedoma // Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Section. 2005. Vol. 402(4). P. 568–573.

11. 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 Sciences. 2001. Vol. 379. N5. P. 589–593.

12.Vasil'chuk YK, Vasil'chuk AC. Validity of radiocarbon ages of Siberian yedoma // GeoResJ.Vol. 2017. 13. P. 83–95. doi:10.1016/j.grj.2017.02.004.

13. Vasil’chuk Yu.K., Vasil’chuk A.C. Winter Air Paleotemperatures at 30–12 Kyr BP in the Lower Kolyma River, Plakhinskii Yar yedoma: Evidence from Stable Isotopes // Earth's Cryosphere. 2018. Vol. XXII. No. 5. P. 3–16. doi: 10.21782/EC2541-9994-2018-5(3-16)

14. Vasil’chuk Yu. K., Vasil’chuk A.C. Air January paleotemperature reconstruction 48-15 calibrated ka BP using oxygen isotope ratios from Zelyony Mys yedoma // Earth's Cryosphere. 2021. Vol. XXV. N2, P. 44–55. doi: 10.15372/KZ20210205.

МИКРО- И МАКРОЭЛЕМЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ И ВМЕЩАЮЩИХ ИХ ОТЛОЖЕНИЙ БАТАГАЙСКОЙ ЕДОМЫ

Васильчук Дж.Ю., Васильчук Ю.К., Гинзбург А.П.
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия;
jessica.vasilchuk@gmail.com

Рассмотрен ионный состав льда, макро- и микроэлементый состав грунтовых включений в повторно-жильных льдах и вмещающих их отложений Батагайской едоме. Минерализация позднеплейстоценового жильного льда составила от 66.56 до 424,8 мг/л, от ультрапресной до опресненной, по ионному составу лёд гидрокарбонатно-кальциевый и соответствуют снегу, сформированному под воздействием континентальных солей. В дневных почвах в повышено содержание As, Bi, Zn, Cu, Sn, U, Cs, W относительно вмещающих лёд отложений. Микроэлементы во льду в основном содержатся во взвешенной форме. Большой разброс концентраций элементов в грунтовых включениях в жилах говорит о возможной смене геохимической обстановки в период формирования льда.

TRACE AND MAJOR ELEMENTS IN ICE WEDGES AND SURROUNDING SEDIMENTS OF BATAGAY YEDOMA

Vasil’chuk J.Yu., Vasil’chuk Yu.K., Ginzburg A.P.
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Leninskie gory 1, Russia;
jessica.vasilchuk@gmail.com

The ionic composition of ice, and concentration of major- and trace elements in soil inclusions in ice wedges and host sediments of the Batagay Yedoma are studied. The mineralization of Late Pleistocene ice wedges ranged from 66.56 to 424.8 mg/L, from ultra-fresh to desalinated; the ice is bicarbonate-calcium and it corresponds to snow formed under the influence of continental conditions. In soils, the content of As, Bi, Zn, Cu, Sn, U, Cs, and W is increased in relation to the sediments of Batagay Yedoma. Trace elements in ice are mainly contained in suspended form. A large spread of element concentrations in ground inclusions in ice wedges indicates a possible change in the geochemical conditions during the period of ice formation.

Введение

Макроэлементный состав подземных льдов формируется при совокупном влиянии ионного состава вод, сформировавших эти льды, и макрокомпонентного состава вмещающих льды отложений. Макроэлементный состав может быть использован в качестве индикатора смены геохимических условий миграции-аккумуляции химических элементов, происходящей в результате смены ландшафтных условий льдообразования. Так, хлоридно-натриевый состав сообщает о влиянии морских аэрозолей на засоление повторно-жильных льдов, уменьшение Cl-Na засоления подземных льдов говорит о почти полной потере связи этих льдов с морем в голоцене [6]. Ионы Ca^{2+} и SO_4^{2-} могут свидетельствовать о воздействии вмещающих льды грунтов [9]. В континентальных условиях макроэлементы в составе повторно-жильных льдов также индицируют смену условий льдообразования со слабощелочных глеевых на кислые глеевые в голоцене. Общая минерализация северо-якутских льдов крайне невысока (до 90 мг/л), однако встречаются аномалии солёности (от менее чем 30 мг/л до 400-430 мг/л) [1]. Макроэлементы в почвах в основном являются производными от минералов, входящих в состав почвообразующих пород..