

МЕТАН В ПЛАСТОВЫХ ЛЬДАХ ВОСТОЧНОЙ ЧУКОТКИ КАК ИНДИКАТОР ИХ ГЕНЕЗИСА

© 2024 г. Л. П. Кузякин^{1*}, А. А. Маслаков¹, П. Б. Семёнов²,
Н. Г. Белова¹, Ю. К. Васильчук¹, А. О. Киль²

¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, Москва, Россия

²Всероссийский научно-исследовательский институт геологии и минеральных ресурсов Мирового океана
имени академика И. С. Грамберга, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: kuziakin@geogr.msu.ru

Поступила 16.04.2024 г.

После доработки 30.05.2024 г.

Принята к печати 08.07.2024 г.

Содержание метана в газовых включениях пластовых льдов Восточной Чукотки варьирует от 1 до 1582 ppmv. Подтверждены ранее выдвинутые предположения о погребённом (2 ppmv) и внутригрун-
товом (432 ppmv) генезисе для двух залежей. Вопрос о генезисе третьей залежи остался открытым, а в
четвёртой залежи полученные результаты (2 ppmv) поставили под сомнение ранее выдвинутую гипо-
тезу об её внутригрунтового происхождения.

Ключевые слова: пластовый лёд, метан, криостратиграфия, Восточная Чукотка, многолетнемёрзлые
породы

DOI: 10.31857/S2076673424030106, EDN: INGZDK

ВВЕДЕНИЕ

Пластовые льды — это выделенные по форме залегания (горизонтально или наклонно) ледяные скопления мощностью от 0.3–0.5 м до 30–50 м и протяжённостью от нескольких десятков метров до 1 км и более. Глубина залегания варьирует от 3–5 м до первых сотен метров (Втюрин, 1975).

Пластовые льды активно исследуются с 1960-х годов. Первые залежи были обнаружены в Западной Сибири и на Чукотке. Впоследствии география пластовых льдов расширилась и к настоящему времени они обнаружены в Большеземельской тундре, на Полярном Урале, Таймыре, Арктических островах, северо-западе Канады, Канадском Арктическом архипелаге и на Аляске. Актуальность их исследования связана с двумя основными проблемами. Первая относится к палеогеографии: понимание механизмов образования конкретных ледяных залежей, а также корректная интерпретация их структуры, химического и изотопного состава позволяют восстановить историю формирования и промерзания вмещающих отложений. Вторая проблема связана с рельефообразующей деятельностью приповерхностных ледяных залежей, которые при определённых условиях способствуют процессу криогенного оползания,

проявляющемуся в виде движения переувлажнённых оттаявших пород слоя сезонного оттаивания по кровле ледяной залежи с формированием особых форм рельефа — термокаров и термоцирков. При этом индикация пластовых льдов затруднена из-за их слабой связи с рельефом и растительностью. Дополнительные трудности вносит большое разнообразие генетических типов пластовых льдов, каждый из которых формируется благодаря сложному сочетанию локальных экзогенных, криогенных и, реже, эндогенных процессов (например, Васильчук, 2012).

Определение генезиса пластовых льдов остаётся ключевым вопросом при их исследовании. На сегодняшний день существует несколько десятков гипотез, объясняющих механизм формирования пластовых льдов, которые можно разделить на две группы. Первая подразумевает аллохтонное (погребённое) происхождение пластовых льдов. Погребённым может оказаться ледниковый, наледный, морской, речной, озёрный лёд, или даже снежник. Сторонниками гипотезы первично-поверхностного (синоним погребённого) происхождения является ряд крупных исследователей: Ф. А. Каплянская, С. Ю. Королёв, Л. Н. Крицук, И. А. Некрасов, В. И. Соломатин, В. Д. Тарноградский, Н. В. Тумель и др.

Вторая группа гипотез предполагает внутри-грунтовое (автохтонное) происхождение залежей. Выделяются несколько механизмов формирования: инъекционный, инъекционно-сегрегационный, сегрегационный, повторно-инъекционный, вакуумно-компрессионный. Разработкой механизмов внутригрунтового генезиса занимались: В.В. Баулин, Б.И. Втюрин, Ю.К. Васильчук, Ш.Ш. Гасанов, И.Д. Данилов, Г.И. Дубиков, Т.Н. Жесткова, М.М. Корейша, А.Н. Котов, Дж. Росс Маккай, А.И. Попов, А.Н. Хименков, Л.М. Шмелев, Н.А. Шполянская, Ю.Л. Шур и др. Стоит заметить, что большое количество выявленных механизмов формирования пластовых льдов позволяет говорить, что термин «пластовый лёд» отражает морфологию залежеобразующего ледяного тела, а не несёт какой-либо генетической нагрузки.

Очень важным вопросом является определение возраста пластовых льдов. Для Восточной Чукотки это особенно важно, поскольку различия в изотопных характеристиках позднеледниковых и голоценовых подземных льдов здесь не столь существенны, как в более западных районах Российской Арктики. Это приводит к ошибкам в определении возраста пластовых льдов. Эта проблема частично решена в работе Ю.К. Васильчука с коллегами, где с помощью прямого AMS датирования пластовых льдов Восточной Чукотки (включая те залежи, которые рассматриваются в данной статье) показано, что они формировались приблизительно 22–28 тыс. лет назад (Vasil'chuk et al., 2024).

В последние десятилетия всё большее внимание уделяется газовой компоненте многолетнемерзлых пород, в частности её химическому составу. Часть исследований газовых включений в залежеобразующих льдах посвящена изотопному составу углерода, кислорода и водорода (Стрелецкая и др., 2018; Semenov et al., 2020). Также предпринимаются попытки установить распределение и соотношение газов в различных видах подземных льдов (пластовых, повторно-жильных, текстурообразующих), причём наибольшее внимание уделяется метану (CH_4) (Kraev et al., 2017; Семенов и др., 2023).

Исследования А.А. Архангелова и Е.В. Новгородовой (1991) показали, что высокие концентрации метана (27.5%) характерны для инъекционных льдов, а в сегрегационных и ледниковых льдах состав газов близок к атмосферному. Предполагается, что высокие концентрации микробного метана, в таких объектах, как пластовые льды, можно использовать в качестве индикатора условий формирования ледяного тела и промерзания грунтовой толщи. Считается, что присутствие метана в отложениях обуславливается его формированием в процессе жизнедеятельности метаногенных бактерий при положительных температурах и последующей криоконсервацией. Однако по мнению

некоторых исследователей (Ривкина и др., 2006) метан может формироваться и в уже промерзших грунтах, в процессе эпикриогенного метаногенеза, за счёт адаптации бактерий к условиям отрицательных температур. Применение криолитологического, изотопного и геохимического подходов для исследования пластовых льдов позволяет делать обоснованные предположения об их механизме формирования.

Восточная Чукотка — один из регионов широкого распространения пластовых льдов. Они описывались в 1960-х годах Ш.Ш. Гасановым (1969), который использовал только криолитологический метод. Генезис большинства залежей был определён как повторно-инъекционный. В последнее десятилетие был опубликован ряд статей, посвящённых залежам пластовых льдов в районе села Лаврентия на Восточной Чукотке. В частности, были опубликованы сведения о криолитологическом строении и изотопном составе залежей и выдвинуты предположения об их генезисе (Васильчук, 2016; Васильчук и др., 2018, 2018a). Однако генезис некоторых залежей на данный момент остаётся дискуссионным (Маслаков и др., 2018; Белова и др., 2019; Vasil'chuk et al., 2021; Маслаков и др., 2021).

Цель исследования — анализ генезиса пластовых льдов на основе данных о концентрации метана в газовых включениях пластовых льдов и сопоставление полученных результатов с выводами о генезисе рассматриваемых залежей по независимым данным. В период с 2018 по 2022 г. авторами был собран полевой материал и получен химический состав газовых включений в четырёх залежах пластовых льдов.

РАЙОН ИССЛЕДОВАНИЙ

К территории Восточной Чукотки относится часть Чукотского полуострова, ограниченная с запада хребтом Искатень Чукотского нагорья, с севера она омывается Чукотским морем Северного Ледовитого океана, с востока — Беринговым проливом. С юго-востока, юга и юго-запада Чукотский полуостров окружён водами Берингова моря Тихого океана (рис. 1). На исследуемой территории расположено несколько поселений, наиболее крупные из которых — Уэлен, Лаврентия, Лорино и Провидения.

В структурном отношении данная территория — часть крупной Анюйско-Чукотской мезозойской складчатой системы, состоящей из антиклинальных и синклиналильных зон, а также горстовых поднятий (Колесников, Плахт, 1989). В районе проведения исследований складчатый рельеф проявляется в виде хребта Гэнканый (Тенианый), обрамлённого со стороны моря узкой полосой плоских поверхностей: ледниковой и водно-ледниковой плейстоценовой равниной, а

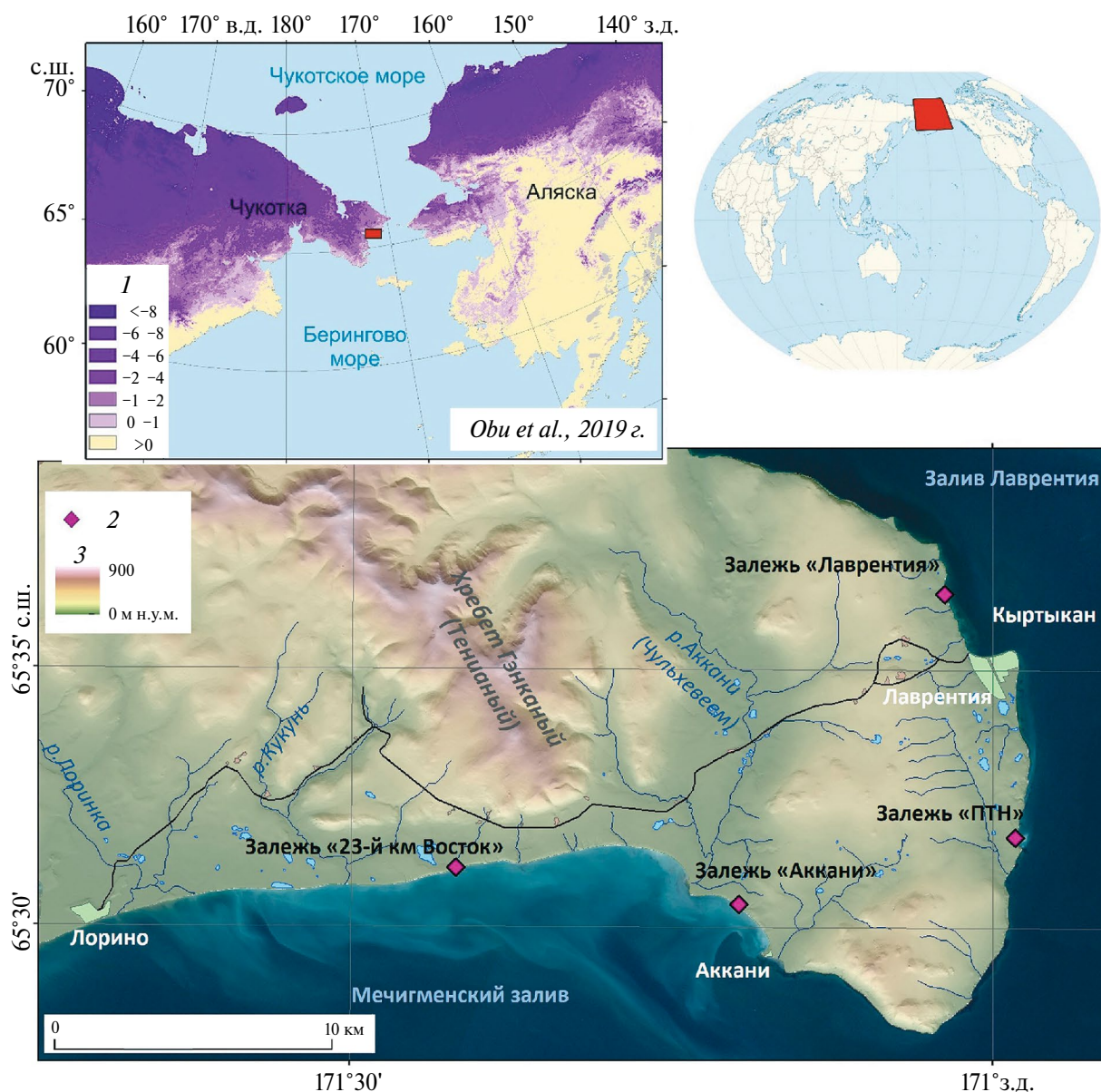


Рис. 1. Район исследований и изученные обнажения пластового льда: 1 — среднегодовая температура пород, °C; 2 — залежи пластовых льдов; 3 — высота над ур. моря

Fig. 1. Study area and studied massive ice outcrops: 1 — mean annual ground temperature, °C; 2 — bodies of massive ice; 3 — altitude above sea level

также серией морских и ледниково-морских террас (Maslakov et al., 2021). Поверхности голоценового возраста представляют собой морские галечниковые косы и поймы рек.

Климат побережья Чукотского полуострова арктический и субарктический морской (Kottek et al., 2006). Среднегодовая температура воздуха в пос. Уэлен, расположенном в 90 км к северу от района исследований, составила -5.9°C (<http://meteo.ru/data>) за 1992–2022 гг., средняя температура января составила -19.6°C ., а июля — $+7^{\circ}\text{C}$.

Метеорологические наблюдения (<http://meteo.ru/data>) фиксируют тренд к повышению среднегодовой температуры воздуха: по данным метеостанции Уэлен, с 1980 по 2022 г. рост составил $0.8^{\circ}\text{C}/10$ лет.

Участок исследований относится к зоне типичной тундры. Типичные тундры расположены на низких геоморфологических уровнях и подразделяются на кочкарно-пушицевые и мохово-лишайниковые, долины рек заняты кустарничко-травянистыми сообществами (Maslakov et al., 2021). Широко распространены примитивные

горно-тундровые и тундрово-болотные мерзлотные почвы.

Многолетнемёрзлые породы имеют сплошное распространение. Несквозные талики (мощностью до 40 м) встречаются только в нижнем течении крупных рек и под самыми крупными термокарстовыми озёрами. Температура мёрзлых пород составляет в среднем -8°C в осевых частях горных хребтов и $-2...-4^{\circ}\text{C}$ в долинах рек и на побережье, однако прямых наблюдений за температурой пород ниже уровня нулевых годовых колебаний здесь не производилось (Obu et al., 2019). Мощность мёрзлых толщ меняется от 500–700 м в самых высоких частях хребтов до 200–300 м в долинах внутренней, удалённой от моря части Чукотского полуострова и на побережье (Колесников, Плахт, 1989). Предполагается, что формирование мёрзлых пород Чукотки началось в горных районах в начале плейстоцена (Свиточ, 1980). Исследователи (Гасанов, 1969; Свиточ, 1980) отмечают сложность и многоярусность в строении мерзлоты, а также указывают на её полигенетическое происхождение. Ш.Ш. Гасанов (1969) на основании криолитологического строения утверждает, что мерзлота на морских равнинах и террасах Чукотки сформировалась при эпигенетическом промерзании пород в позднем неоплейстоцене. Признаком эпигенетического промерзания он считает наличие залежей пластовых льдов. Схожую гипотезу развития мерзлоты Чукотки предлагает и А.А. Свиточ (1980), принимая пластовые льды в отложениях морских и ледниково-морских равнин и террас за признак их эпигенетического промерзания в эпоху позднелоплейстоценового криохрона. При этом отмечается, что мёрзлые породы речных террас и пойм имеют синкриогенное происхождение, что подтверждается их криолитологическим строением и наличием повторно-жильных льдов.

По результатам инструментальных измерений в 2000–2019 гг. глубина сезонного оттаивания варьирует от 53.9 см в торфяниках до 67.4 см в суглинистых отложениях. Наблюдается устойчивый рост глубины сезонного оттаивания пород, что косвенно влияет на активизацию эрозионных процессов в криолитозоне, в том числе на активизацию термоденудационных процессов и рост термоцирков, в стенках которых вскрываются пластовые льды.

Залежи пластовых льдов на изучаемой территории вскрываются в береговых обрывах позднелоплейстоценовых равнин и террас в окрестностях села Лаврентия (см. рис. 1). Размеры залежей различны — от нескольких до первых десятков метров в ширину, видимая мощность варьирует от 1.5 до 6–7 м (Vasil'chuk et al., 2021). Наличие пластовых льдов способствует возникновению комплексной деструкции и формированию крупных термоцирков (Маслаков и др., 2021).

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Полевые исследования. В полевых условиях проводилось криолитологическое описание обнажений, включающих пластовые льды. Устанавливались форма ледяного тела, его размеры, элементы залегания (направления простирания, углы падения, видимые дислокации и др.), соотношение с породами и элементами рельефа. В ходе визуального описания ледяного тела отмечались форма, размеры и распределение воздушных и органико-минеральных включений, а также другие структурные особенности, видимые в обнажении. При необходимости производилась дополнительная расчистка обнажения. По результатам визуального изучения обнажения намечались места детальных исследований и опробования.

Проводился отбор образцов для проведения газового и изотопного анализа льда. В геохимическом анализе был сделан упор на определение состава и концентрации газов в газовых включениях внутри льда. Для выделения газовой компоненты применялся метод «headspace» (Alperin, 1985). Для начала из мёрзлой стенки обнажения отбирался достаточно крупный (около 5–10 см по большей оси) монолит льда или породы. При помощи почвенного ножа из него вырезали образец массой около 50 г, который помещали в шприц объёмом 150 мл, после чего шприц заполняли концентрированным раствором поваренной соли (суммарный объём раствора и образца равнялся 100 мл) и на 50 мл атмосферным воздухом. Все эти манипуляции проводились за короткое время (не более 30 секунд). Далее шприц плотно фиксировался скотчем, герметизировался и доставлялся в полевую лабораторию, где уже находились специально подготовленные стеклянные флаконы («медицинские пенициллиновые флаконы»), заполненные высококонцентрированным солевым раствором (без воздуха). После оттаивания образца в шприце проводились измерения массы шприца с грунтом и раствором, а также определение объёмов жидкости (взвеси) и воздуха. Наконец, проводилась закачка воздуха из шприца во флаконы с солевым раствором (NaCl) при помощи двух игл 0.8 мм в диаметре (по одной поступал воздух из шприца, по другой под давлением отводился солевой раствор). Для обеспечения гидрозатвора во флаконах сохранялась часть солевого раствора (около 1 мл), а в процессе хранения и транспортировки они содержались в перевёрнутом состоянии. Флаконы, заполненные воздухом, упаковывались и доставлялись в лабораторию. До измерений флаконы хранятся в холодильнике при достаточно низкой температуре $+3^{\circ}\text{C}$ для ингибирования деятельности бактерий, разложения органики и фотосинтеза (в случае случайного попадания в образец фотоавтотрофных организмов) и предотвращения загрязнения образца.

Определение концентраций метана. Газохроматографический (далее — ГХ) анализ углеводородных газов (далее — УГ) C1–C5 в газовой/паровой фазе талой воды льдов выполнен на газовом хроматографе Shimadzu GC 2014, оснащённом капиллярной колонкой Restek Rt-Alumina BOND/Na₂SO₄ (40 м) и пламенно-ионизационным детектором (ПИД). В качестве газа-носителя использовали гелий при скорости потока 25 мл/мин.

Для калибровки приборов использовалась сертифицированная газовая смесь (ГЭТ 154-2001) (ГОСТ 8.578-2002), включающая 11 углеводородных газов (метан, этан, этилен, пропан, пропилен, i-бутан, n-бутан, бутен-1+ i-бутилен, i-пентан, n-пентан). Погрешность измерений ГХ не превышала $\pm 2.5\%$.

Так как собранные образцы пластовых льдов имели разный объём, то для удобства их сравнения полученные на хроматографе концентрации метана были пересчитаны с учётом объёма образца (из ppm в ppmv). Величина ppm (parts per million / миллионные доли) является безразмерной и может быть применена к любой концентрации вещества (по массе или по объёму), в то время как величина

ppmv (parts per million by volume / объёмные миллионные доли) чётко указывает на концентрацию вещества в определённом объёме.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изученные залежи пластового льда. В результате отмеченного ранее роста приземной температуры воздуха на территории Восточной Чукотки отмечается активизация эрозионных процессов, в частности, образование криогенных оползней (англ. *retrogressive thaw slumps*), которые часто развиваются в отложениях, содержащих залежи пластового льда. Изучение пластовых льдов ведётся коллективом авторов с 2016 г. Всего было изучено шесть залежей льда на относительно локальном участке севера Мечигменского залива и южного побережья залива Лаврентия (Vasil'chuk et al., 2021). Однако в данной работе рассматриваются только те из них, для которых было выполнено исследование содержания метана в газовых включениях внутри льда.

Залежь «23-й км-Запад». Пластовая ледяная залежь на побережье Мечигменского залива (рис. 2), в 8.3 км к западу от устья р. Аккани (Чульхевеи),



Рис. 2. Залежь пластового льда «23-й км-Запад», исследованная в 2018 г. (Vasil'chuk et al., 2021)

Fig. 2. Massive ice body “23 km-West”, studied in 2018 (Vasil'chuk et al., 2021)

напротив пикета «23 км» дороги «Лаврентия–Лорин». Лёд обнаружен в 2018 г. в термоцирке шириной около 30 м с абсолютными отметками дна около 6 м над ур. моря.

Обнажение вскрывается в позднечетвертичных отложениях (Свиточ, 1980), формирующих морскую террасу с отметками 30–50 м над ур. моря. Видимая мощность пласта льда изменяется от 1.5 до 2.5 м. Кровля ровная, несогласная с перекрывающимися отложениями, подошва уходит под оплывину. Мощность перекрывающих отложений в центральной части цирка составляет около 1 м, увеличиваясь к краям до 5–7 м. Это несортированные суглинки тёмно-бежевого цвета с включениями валунов и гнёзд торфа. Лёд чистый, пузырчатый, пузырьки не имеют строгой ориентировки и достигают 3–5 мм в поперечнике. Слоистость во льду прослеживается лишь в верхней части залежи; грунтовые прослой,

залегающие согласно кровле пласта, обнаружены по краям ледяного тела. Основная часть пластового льда — чистый пузырчатый лёд, практически лишённый грунтовых включений. В поляризованном свете лёд крупнокристаллический, размер кристаллов 1–2 (до 5) см в поперечнике. Для слоистого льда характерны более мелкие кристаллы (несколько мм). Данный термоцирк вложен в более старый, и вытаявший пластовый лёд составлял некогда нижнюю или среднюю часть более массивного ледяного тела, частично деградировавшего в результате образования предыдущего. Концентрация метана в газовых включениях в 7 исследованных пробах стабильна и составляет от 3 до 4 ppmv, что близко к концентрации метана в атмосфере (1.8 ppmv). Распределение метана по вертикальному профилю — равномерное.

Залежь «ПТН». Пластовая ледяная залежь располагается в термоцирке на берегу залива Лаврентия,

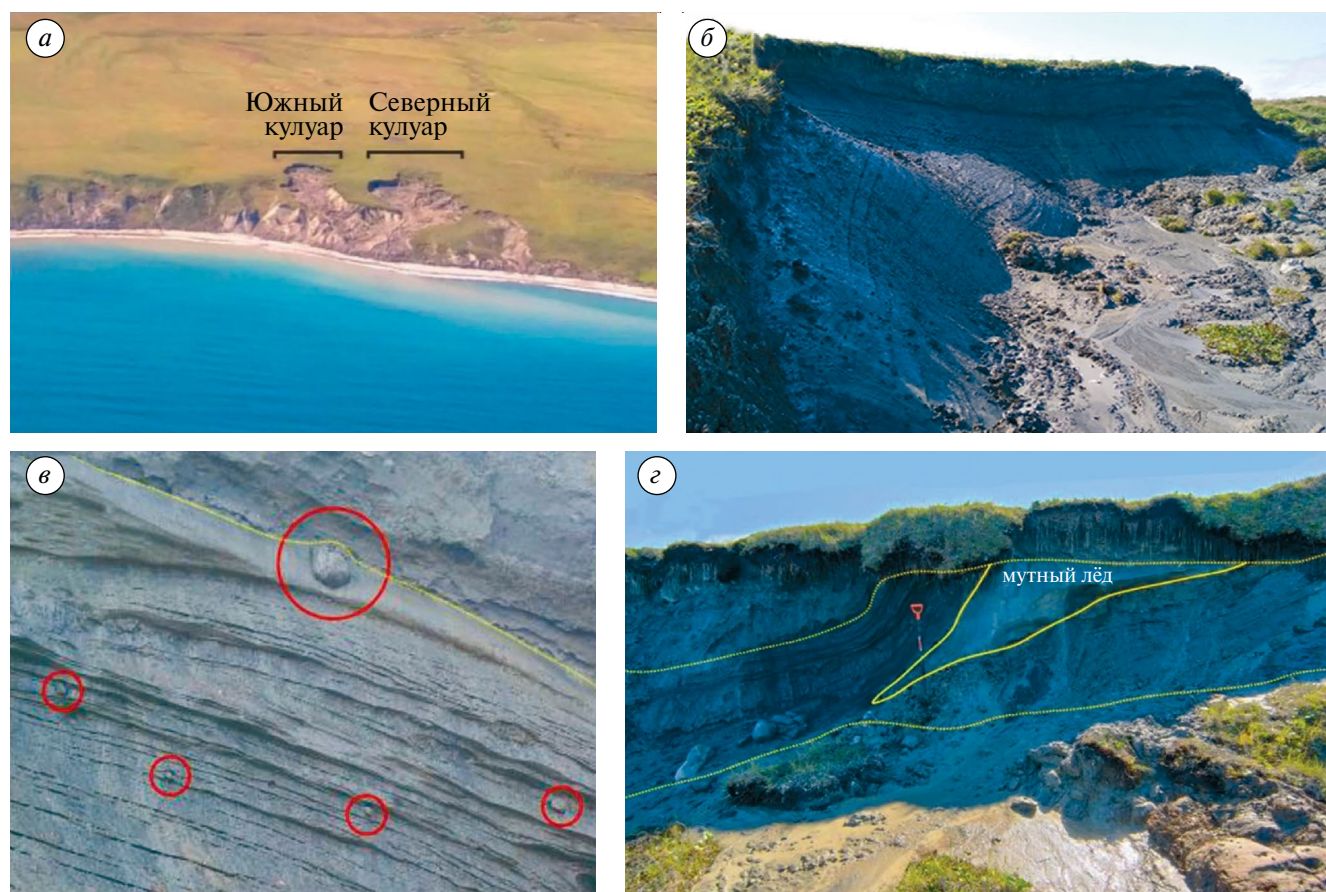


Рис. 3. Залежь пластового льда «ПТН», исследованная в 2018–2021 г.: а — фотография термоцирка, вмещающего залежь, 2020 г. (Маслаков и др., 2021); б — общий вид залежи в 2018 г., фотография Н.Г. Беловой; в — слоистая текстура льда и включения обломочного материала, фото Н.Г. Беловой, 2018 г.; з — обнажение южной (орографически правой) стенки южного термоцирка в 2021 г., включающее интрузию мутного льда. Фото А.А. Маслакова

Fig. 3. Massive ice body “PTN”, studied in 2018–2021: а — photo of the thermal cirque containing the deposit, 2020 (Maslakov et al., 2021); б — general view of the deposit in 2018, photograph by N.G. Belova; в — layered texture of ice and inclusions of debris, photo by N.G. Belova, 2018; з — exposure of the southern (orographically right) wall of the southern thermal cirque in 2021, including the intrusion of turbid ice. Photo by A.A. Maslakov

в 7 км к югу от села Лаврентия, недалеко от Пункта технического наблюдения за ледовой обстановкой (рис. 3). Исследовалась с 2018 по 2021 г. Вертикальная мощность залежи около 2.5 м, верхний контакт ровный, чёткий. В перекрывающем слое суглинки тёмно-серые, с включениями гравия, вертикальной и горизонтальной линзовидной криогенной текстурой (лёд заполняет трещины

между плитчатыми отдельностями суглинка), иногда корковой, если в породе большое скопление гравия. Пластовая залежь представлена чистым, дислоцированным слоистым льдом (см. рис. 3, б). Слои мощностью от 0.2–0.3 до 20 см, выдержаны по горизонтали. Слоистость подчёркивается прослоями серого суглинка с включениями щебня диаметром 0.2–3.0 см. Иногда слоистость нарушена

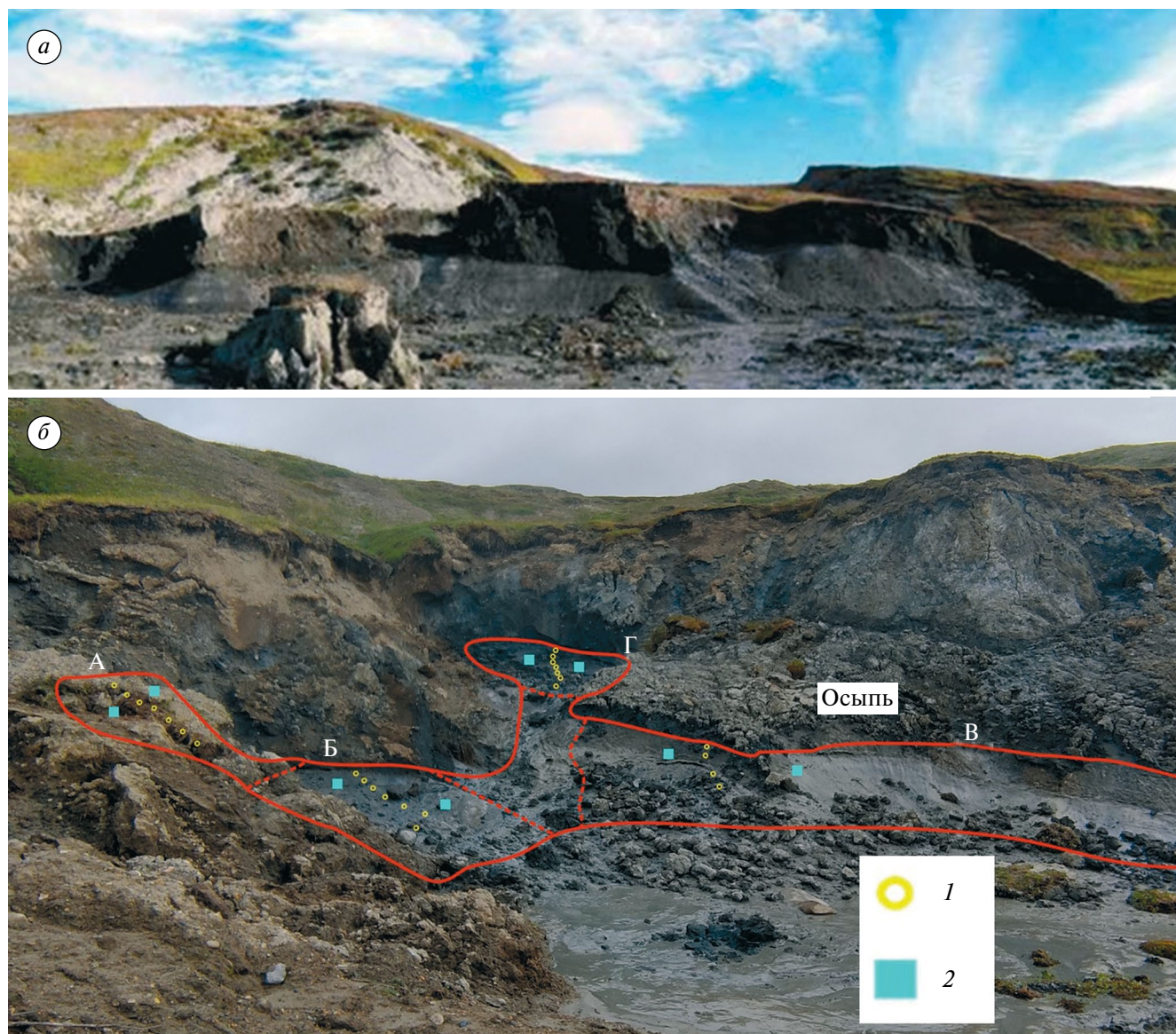


Рис. 4. *а* — ледяной пласт в устье р. Аккани вблизи пос. Лаврентия (Восточная Чукотка). Фото А.А. Маслакова, 2016 г. *б* — залежь «Аккани» в августе 2022 года. Буквами (А, Б, В, Г) показаны фрагменты ледяного тела, на которых проводилось более детальное описание залежи и отбор проб: 1 — точки отбора проб для определения изотопного состава льда; 2 — точки отбора проб для определения состава газов в воздушных включениях во льду. Фото Л.П. Кузякина

Fig. 4. *a* — Ice layer at the mouth of the Akkani River near the Lavrentia village (Eastern Chukotka). Photo by A.A. Maslakova, 2016. *b* — Akkani deposit in August 2022. Letters (A, B, V, Г) show fragments of the ice body on which a more detailed description of the deposit and sampling was carried out: 1 — sampling to determine the isotopic composition of ice; 2 — sampling to determine the composition of gases in air inclusions in ice. Photo by L.P. Kuzyakin

включением окатанных валунов диаметром 30 см. Граница с вышележащими отложениями чёткая, основание пласта перекрыто осыпью.

В 2020–2021 гг. в южной части термоцирка обнаружился клин матового, пузырчатого, неслоистого льда, вероятно, инъекционного происхождения. Предполагается, что рассматриваемая залежь является частью более крупного ледяного тела. Содержание метана по 13 пробам варьирует в достаточно широком диапазоне от 9 ppmv до 1582 ppmv, составляя в среднем 432 ppmv. Распределение метана по профилю не установлено.

Залежь «Аккани». Пластовая ледяная залежь, изученная в 2016 (рис. 4, а) и в 2022 (рис. 4, б) годах, располагается в 2 км к юго-востоку от устья р. Чульхевеем (Аккани) на побережье Берингова моря (Мечигменский залив), в 25 м от береговой линии.

Мощный и сравнительно протяжённый пласт льда шириной 45 м и толщиной до 2.7 м вскрывался в термоцирке шириной 50 м с высотой стенок до 4.5 м. Лёд во всём массиве чистый, пузырчатый. На контакте ледяного пласта с перекрывающими отложениями мощностью 1.7–3.0 м рыжеватый суглинок с включениями гальки переходит в сизый.

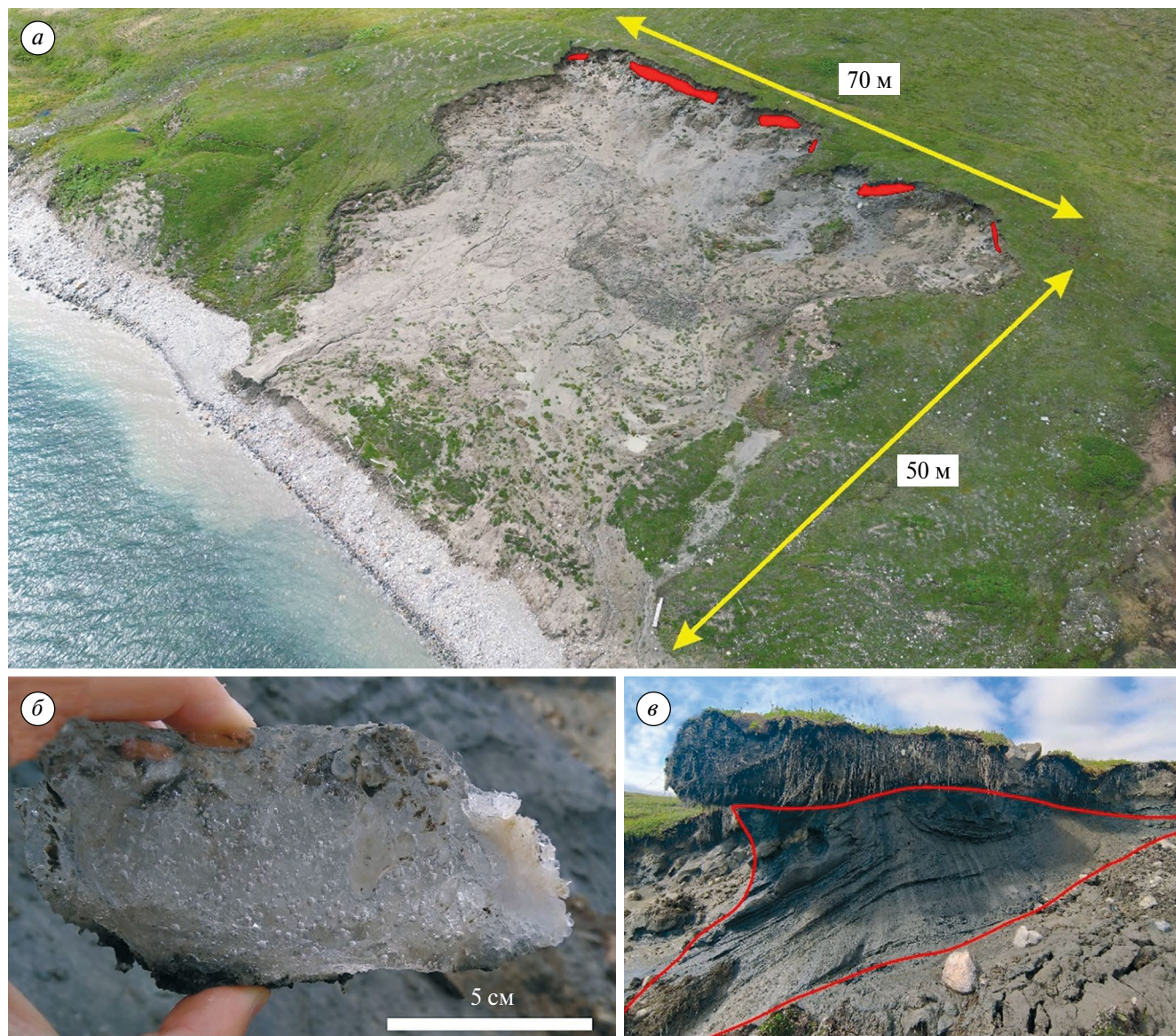


Рис. 5. Залежь «Лаврентия»: а — общий вид термоцирка и выходы пластового льда (выделен красным) в 2023 г.; б — крупный план льда из залежи; в — характерная слоистость льда на стенке вытаявания. Фото А.А. Маслакова

Fig. 5. Lavrentiya deposit: а — general view of the thermal cirque and outcrops of massive ice (highlighted in red) in 2023; б — close-up of ice from the deposit; в — characteristic layering of ice on the melting wall. Photo by A.A. Maslakov

Граница между льдом и перекрывающими его отложениями ровная, чёткая, несогласная. На контакте с перекрывающей породой сверху лёд чистый, прозрачный. Криогенная текстура вблизи контакта косая линзовидная, толщина шлиров — до 3 мм, длина — до 5 см. Концентрация метана в газовых включениях (8 проб) устойчиво низкая — от 2 до 3 ppmv. Распределение метана по залежи, ввиду близости значений концентрации, принято равномерным.

Залежь «Лаврентия». Вскрывается в крупном растущем термоцирке (рис. 5), прорезающем валунные суглинки, в 3 км к северу от села Лаврентия. Залежь исследована в 2019–2023 гг. Ширина термоцирка в 2023 г. составила около 70 м, глубина 50 м. Перекрывающие отложения представляют собой суглинок тёмно-бежевый с включением обломков диаметром до 1 м разной степени окатанности и гнёздами чёрного торфа. Вблизи кровли пласта (нижние 30 см) цвет суглинка меняется на серый и сизый. Мощность перекрывающих отложений составляет в среднем 1–2 м. Граница между кровлей пласта и отложениями несогласная. Сама залежь представляет собой переслаивание прозрачного чистого льда с редким включением пузырьков (рис. 5, б) и серого суглинка, включающего валуны и дресву. Пузырьки имеют размер 2–3 мм, без ориентировки в пространстве. Мощность прослоев льда от 2–3 до 20–30 см, прослоев грунта — от 0.5 до 10 см. Слои дислоцированы под углом 5–8 градусов по отношению к линии горизонта и иногда задраны вверх (рис. 5, в). Характерной особенностью льда, как и в залежи «ПТН», является замороженный обломочный материал различной степени окатанности и диаметром от 1 до 30 см.

Пластовый лёд, вскрывающийся в залежи «Лаврентия», имеют несколько отличную морфологию в различных частях обнажения. В южной части лёд залегает на глубине около 2 м и имеет мощность 1.5–2.0 м. Пласт имеет чёткую слоистость: чередование прослоев чистого льда и суглинка и хорошо выдержан по длине. Лёд прозрачный, почти без включений пузырьков воздуха. Во льду имеются включения обломочного материала, окатанные. Подстилается лёд серым валунным суглинком. По мере продвижения к центру термоцирка высота пласта льда увеличивается (пласт имеет слабый уклон в сторону моря): видимая мощность льда достигает 5.4 м, подошва скрыта под склоновыми отложениями. Лёд прозрачный с включениями редких круглых, неориентированных пузырьков воздуха. В самом льду, помимо обломочного материала, также присутствуют включения (линзы и конкреции) серой глины, размер включений от нескольких мм до первых см. Прослой относительно чистого льда разделены хаотичными линзами жёлто-коричневой супеси с включениями обломочного материала (1–3 мм).

Концентрация метана в газовых включениях внутри льда колеблется от 2 до 70 ppmv. Среднее значение составляет 18 ppmv (10 проб). Вертикальное распределение метана в пластовом льду представлено на рис. 6. Концентрация метана в залежи уменьшается сверху вниз. Максимальные концентрации (более 50 ppmv) зафиксированы в верхних двух метрах залежи. Ниже концентрация метана резко падает до 2–10 ppmv и остаётся стабильной до подошвы залежи (видимая часть).

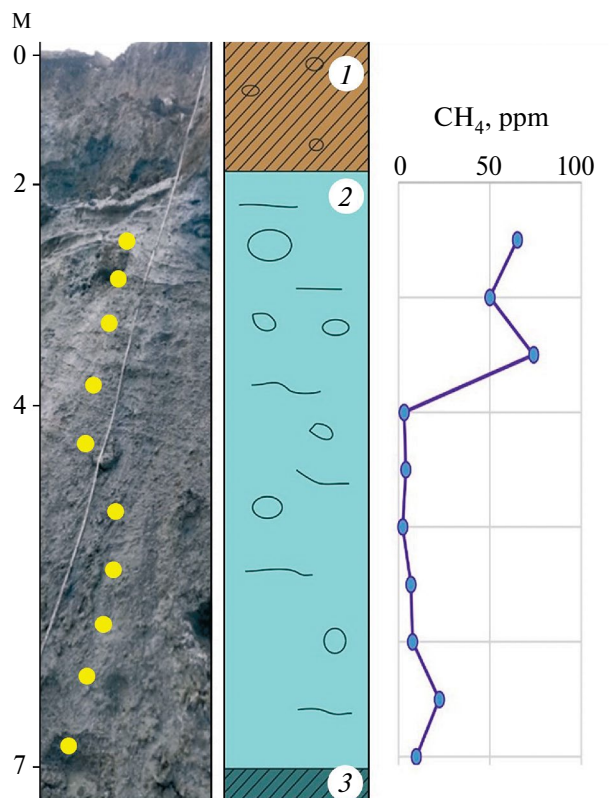


Рис. 6. Вертикальное распределение концентрации метана в газовых включениях в пластовой залежи «Лаврентия». Отбор образцов проводился в центральной части залежи. Жёлтые круги — точки отбора образцов. Описание разреза: 1 — средний суглинок тёмно-бежевый с включениями обломков диаметром до 1 м; 2 — лёд прозрачный с включениями круглых пузырьков воздуха, во льду — обломочный материал, включения серой глины, линзы супеси; 3 — суглинистая оплывина

Fig. 6. Vertical distribution of methane concentration in gas inclusions in the Lavrentiya massive ice. Sampling was carried out in the central part of the deposit. Yellow circles are sampling points. Description of the section: 1 — medium dark beige loam with inclusions of fragments up to 1 m in diameter; 2 — transparent ice with inclusions of round air bubbles, in the ice there is fragmentary material, inclusions of gray clay, lenses of sandy loam; 3 — loamy mudslide

ОБСУЖДЕНИЕ

Содержание метана в подземных льдах криолитозоны. Использование методов определения состава газов в мерзлоте в целом и в газовых включениях пластовых льдов в частности началось относительно недавно. В последнее десятилетие особое внимание уделялось такому газу как метан (CH_4), из-за его существенного вклада в «парниковый эффект».

Метан (и другие газы) консервируются в мерзлоте и в иных природных льдах в форме газовых включений, вследствие закупоривания пор в процессе промерзания. Из-за низкой биохимической активности внутри мерзлоты, а также затруднённой миграции газов сквозь неё, концентрация метана в порах со временем сохраняется. Это даёт возможность определить условия промерзания отложений на основе концентраций метана. Например, если до промерзания отложения находились в бескислородных условиях (дно моря), где происходит активный метаногенез, то в процессе формирования мерзлоты (эпигенетическое промерзание) содержащийся в породах метан консервируется в порах и сохраняется там, пока не произойдёт оттаивание отложений (Стрелецкая и др., 2018). Если же в отложениях наблюдаются низкие концентрации метана, то можно предполагать, что до промерзания они находились в окислительной среде (либо в иной среде, где метаногенез отсутствует). В частности, при формировании льда ледников (рекристаллизационный тип льдообразования) в его порах консервируется атмосферный воздух. Следовательно, концентрация метана в данных включениях будет соответствовать его концентрации в атмосферном воздухе (1.8 ppmv). Стоит отметить, что по данным из антарктических кернов концентрация метана в атмосфере варьировала от 0.3 до 0.7 ppmv за последние 400 тыс. лет и только в конце голоцена возросла до 1.8 ppmv (Raynaud, 2012).

Наибольшие значения концентрации метана в газовых включениях пластовых льдов характерны для Ямала (Васильев и др., 2015; Стрелецкая и др., 2018). В других районах они существенно меньше, например для Амдермы и Новосибирских островов значение концентрации метана в пластовых льдах не превышает первые десятки ppmv (Semenov et al., 2024), а в районе Сопочной Карги — первые сотни ppmv (Стрелецкая и др., 2018). Хотя даже на достаточно локальных участках исследования (например, Марре-Сале) для разных типов пластовых льдов, и даже для разных залежей одного типа льда, характерен существенный разброс значений, составляющий до 50%.

Относительно высокие концентрации метана в пластовых льдах авторы объясняют их внутригрунтовым происхождением: происходило промерзание морских отложений в районе Марре-Сале

непосредственно после регрессии моря, когда они ещё не успели пройти стадию диагенеза в наземно-воздушных окислительных условиях. Высоким водонасыщением промерзающих отложений также объясняется и формирование крупных залежей пластовых льдов. Значения концентраций метана в газовых включениях пластовых льдов различных регионов представлены в табл. 1.

Значения концентрации метана в газовых включениях пластовых льдов Восточной Чукотки варьируют от 2 до 1582 ppmv и наиболее близки к значениям, зафиксированным в Амдерме и на Новосибирских островах. Однако, отдельные залежи («ПТН» — 432 ppmv) могут быть сопоставлены со льдами, обнаруженными в районе Сопочной Карги. В пластовых льдах Ямала концентрация метана в десятки и сотни раз выше, чем в пластовых льдах Восточной Чукотки, что может свидетельствовать о различном генезисе и механизме формирования этих залежей.

Генезис пластовых льдов Восточной Чукотки на основании концентрации метана в газовых включениях. На ранних этапах исследований залежеобразующих льдов Восточной Чукотки Ш.Ш. Гасанов (1969) и Б.И. Втюрин (1975) относили пластовые льды к внутригрунтовым телам, формирующимся под действием повторно-инъекционного механизма. Причём предполагалось, что происходило это при эпигенетическом промерзании отложений.

Отмечается (Гасанов, 1969; Свиточ, 1980), что современная мерзлота на приморских равнинах Чукотки формировалась в позднем плейстоцене. Следовательно, можно предполагать, что до этого отложения могли пройти стадию диагенеза в континентальных условиях, что могло найти отражение и в составе газов в газовых включениях пластовых льдов.

В газовых включениях пластовых льдов Восточной Чукотки значения концентрации метана варьируют от 2 до 1582 ppmv. Максимальные концентрации метана (432 ppmv) характерны для залежи «ПТН», минимальные — для залежи «Аккани» (2 ppmv). В двух залежах («23-й км запад» и «Аккани») концентрации во всех 15 пробах близки к концентрации метана в атмосферном воздухе (1.8 ppmv) и составляют от 3 до 4 ppmv для залежи «23-й км запад» и от 2 до 3 ppmv для залежи «Аккани». Данный факт позволяет предполагать, что в газовых включениях этих пластовых залежей заключён преимущественно атмосферный воздух. Вполне вероятно, залежи «23-й км запад» и «Аккани» являются ледяными телами, сформированными в атмосферных условиях, которые впоследствии были погребены. Об общности происхождения этих залежей также можно судить и по особенностям их геоморфологического положения: обе залежи вскрываются в береговом уступе

Таблица 1. Сопоставление значений концентрации метана в газовых включениях пластовых льдов различных районов Арктики. CH₄, ppmv – концентрация метана, выраженная в миллионных долях по объёму. Прочерки в последнем столбце означают отсутствие данных в литературном источнике о максимальном и минимальном значениях концентрации метана.

Район (источник)	Характеристика залежи пластового льда	Содержание CH ₄ , ppmv мин/ср/макс
Югорский полуостров, Амдерма (Semenov et al., 2024)	Чистый лёд, без примесей с глубины 6–7 м от поверхности.	– / 4.55 / –
Васькины дачи, Центральный Ямал (Semenov et al., 2024)	Загрязнённый лёд, вскрывающийся в термоцирке, на глубине 3 м от поверхности. Перекрыт континентальными позднеплейстоцен-голоценовыми отложениями с повторно-жильными льдами.	– / 5075 / –
Марре-Сале, Западный Ямал (Васильев и др., 2015)	Пластовый лёд I типа на контакте морских и континентальных отложений, сильно загрязнён, осложнён дислокациями.	7877 / 10084 / 12292
Марре-Сале, Западный Ямал (Стрелецкая и др., 2018)	Пластовый лёд I типа на контакте морских и континентальных отложений, сильно загрязнён, осложнён дислокациями.	26 / 5854 / 17113
Марре-Сале, Западный Ямал (Стрелецкая и др., 2018)	Пластовый лёд II типа в морских глинах и суглинках, чистый, с включениями частиц чёрного цвета.	2 / 2459 / 23352
Сопочная Карга (Стрелецкая и др., 2018)	Лёд на контакте морских и континентальных отложений. Прослой чистого льда и ледогрунта.	7 / 474 / 1588
Новосибирские острова, п-ов Фаддеевский (Semenov et al., 2024)	Чистый лёд, с небольшими грунтовыми включениями. Залегаёт на высоте 9 м от уровня моря.	– / 1.79 / –

IV ледниково-морской террасы. Анализ значений $\delta^{18}\text{O}$ в данных залежах приводится несколькими авторами. Для залежи «Аккани» значения $\delta^{18}\text{O}$ варьируют от -17.9 до -16.2‰ , что позволяет Васильчуку с соавторами (2021) утверждать о вероятном погребённом генезисе данной залежи (табл. 2). Подобный вывод согласуется с данными о концентрации метана в залежи «Аккани». Результаты датировки органического материала из льда (Vasil'chuk et al., 2024) показывают возраст от 22611 до 22147 cal BP.

Иная ситуация наблюдается для залежи «23-й км запад», в которой зафиксировано колебание значений $\delta^{18}\text{O}$ от -20.1 до -13.8‰ . На основе криостратиграфии и большого размаха значений $\delta^{18}\text{O}$ Маслаков с соавторами (2018) делает вывод о сегрегационно-инъекционном внутригрунтовым генезисе залежи. Васильчук с соавторами (2021) также на основе изотопных данных предполагает внутригрунтовый генезис залежи, но не уточняет механизм её формирования. Предположения о внутригрунтовым генезисе не согласуются с показателями концентрации метана в газовых включениях в залежи «23-й км запад», которые соответствуют значениям, характерным для атмосферного воздуха.

Залежи «ПТН» и «Лаврентия» вскрываются в береговом уступе позднеплейстоценовой равнины. Средняя концентрация метана в газовых включениях в залежи «ПТН» составляет около 432 ppmv, что является наибольшим значением для изученных пластовых льдов Восточной Чукотки. Широкий разброс величин (от 9 до 1582 ppmv) может свидетельствовать о гетерогенном происхождении залежи. Морфология залежи (слоистость, наличие складок, разрывные нарушения, несогласия и интрузии льда) также свидетельствует в пользу этой версии. Высокие концентрации метана указывают на процессы метаногенеза при примерзании отложений и формировании залежи. Возможно, в её формировании принимали участие поверхностные (болотные, озёрные) и внутригрунтовые воды. В пользу сегрегационного (или инфильтрационного) механизма формирования залежи говорит наличие ритмичной слоистости в текстуре льда, выраженной в чередовании прослоев стекловидного льда и прослоев с включениями дисперсного материала (толщина прослоев около 2 см). Для данной залежи значения $\delta^{18}\text{O}$ получены независимо двумя авторами и варьируют от -24.5 до -17‰ (Vasil'chuk et al., 2021) или от -19.5 до -15.3‰ (Белова и др., 2019). В обеих работах на основании

Таблица 2. Концентрация метана в газовой фазе пластовых льдов в районе села Лаврентия, а также изотопная характеристика этих льдов и их предполагаемый генезис. CH₄, ppmv – концентрация метана, выраженная в миллионных долях по объёму

Залежь	Содержание CH ₄ , ppmv мин/среднее/макс (количество проб)	Значение δ ¹⁸ O, ‰ мин/ср/макс (источник)	Ранее определённый ге- незис	Генезис на основании содержания метана
23-й км – Запад	3/3/4(7)	–20.1/–18.5/–13.8 (Белова и др., 2019)	Сегрегационно-инъекци- онный (внутригрунтовой) (Маслаков и др., 2018) Внутригрунтовой (Vasil'chuk et al., 2021)	Погребённый ледник или снежник
ПТН	9/432/1582(13)	–24.5/–17.5/–17 (Vasil'chuk et al., 2021) –15.3/–18.2/–19.5 (Белова и др., 2019)	Внутригрунтовой (Vasil'chuk et al., 2021) Гетерогенный внутри- грунтовой сегрегацион- ный (Маслаков и др., 2018) Внутригрунтовой (Белова и др., 2019)	Внутригрунтовой сегре- гационный лёд, сформи- рованный при эпигене- тическом промерзании.
Аккани	2/2/3(8)	–17.9/–17.1/–16.2 (Vasil'chuk et al., 2021)	Погребённый голоцено- вый снежник (Vasil'chuk et al., 2021; Маслаков и др, 2018)	Погребённый ледник или снежник
Лаврентия	2/18/70(10)	–21.8/–18.8/–16.6 (Vasil'chuk et al., 2021)	Внутригрунтовой (Vasil'chuk et al., 2021)	А) Внутригрунтовой лёд, сформированный при эпигенетическом про- мерзании отложений. Б) Погребённый ледник или снежник.

криостратиграфических и изотопных данных генезис залежи «ПТН» определяется как внутригрунтовой. В работе Маслакова с соавторами (2018) уточняется механизм формирования – сегрегационный. Выводы о внутригрунтовом генезисе залежи, сделанные на основании изотопных исследований льда, согласуются с высокими концентрациями метана в газовых включениях. Результаты датировки органического материала из льда (Vasil'chuk et al., 2024) показывают возраст 22 192 cal BP.

Залежь «Лаврентия» также характеризуется значениями концентрации метана, отличными от атмосферного воздуха. Однако среднее значение составляет 18 ppmv, что не может достоверно свидетельствовать о внутригрунтовом происхождении залежи. Столь низкие значения содержания метана в залежи «Лаврентия» можно объяснить двумя причинами. Первая предполагает погребённое (аллохтонное) происхождение залежи. Следовательно, газовые включения во льду являются атмосферным воздухом, который подвергся незначительным изменениям в процессе существования залежи. В частности, в мёрзлом состоянии могли

проходить процессы метаногенеза внутри льда, что привело к различиям в концентрациях.

Для разрешения вопроса о протекании процессов метаногенеза внутри льда необходим изотопный анализ углерода в метане. Однако проведение подобного анализа требует достаточно большого количества углерода (из метана), сбор которого из данной залежи затруднён из-за его низкой концентрации. Согласно второму предположению, метан мог содержаться во внутригрунтовых водах (когда отложения находились в талом состоянии), а в процессе промерзания грунтового массива сконцентрировался в газовых включениях. Подобные залежи могут возникнуть при эпигенетическом промерзании талых отложений, из которых весь метан (если он в них содержался) улетучился, так как он не консервируется в талых отложениях и в континентальных условиях либо окисляется, либо эмитирует в атмосферу. Вторая гипотеза не отрицает возможность формирования автохтонных залежей пластового льда с низким содержанием метана. В пользу этого механизма формирования залежи «Лаврентия» могут свидетельствовать данные о концентрации метана в перекрывающих

отложениях (40 ppmv) и в грунтовых включениях (от 8 до 20 ppmv). Таким образом, сопоставимые концентрации метана в отложениях и в ледяной залежи могут говорить о синхронности их промерзания/формирования.

Оба высказанных варианта не противоречат и другим наблюдениям. На аллохтонное происхождение залежи может указывать её залегание в отложениях позднелейстоценовой равнины и включения грубообломочного материала во льду. Однако на эпигенетическое промерзание отложений Чукотки указывали многие исследователи (в том числе Ш.Ш. Гасанов), которые предполагали формирование пластовых льдов при повторном промерзании ранее- и среднеплейстоценовых отложений в позднем плейстоцене в Искатеньский криохрон (MIS-2) (Свиточ, 1980). Значения $\delta^{18}\text{O}$, характерные для залежи «Лаврентия», варьируют от -21.8 до -16.6‰ (Vasil'chuk et al., 2021), из-за чего генезис залежи предполагается как внутригрунтовый. Предположение Васильчука с соавторами (2021) о внутригрунтовом генезисе залежи не противоречит выводам, сделанным на основе анализа концентрации метана в воздушных включениях.

Таким образом, сведения о концентрации метана в газовых включениях пластовых льдов побережья Восточной Чукотки могут и подтверждать, и опровергать ранее выдвинутые гипотезы их происхождения. Содержание метана, а также изотопная характеристика этих льдов и их предполагаемый генезис отображены в табл. 2.

Ограничения и возможности метода. Несмотря на относительную простоту отбора газа из мёрзлых образцов почвы и льда, определение концентраций метана в газовых включениях в пластовых льдах методом «headspace» имеет ряд недостатков. При сравнении метода «headspace» с методом термовакuumной дегазации (Бутакон и др., 2021) было установлено, что значения концентрации метана в пробах, полученных при помощи метода «headspace», оказывались завышены в 3–70 раз. Авторы связывают это с более высокой растворимостью других газов (углекислый газ, кислород) в воде при экстракции газовой фазы из льда. Метан при этом сравнительно обогащает газовую фазу, что и создаёт завышенные значения. На основании этого можно говорить о том, что измерение концентрации газов с методом «headspace» может дать результаты, отличные от таковых с использованием других методов. Также из-за завышенных значений следует с осторожностью сравнивать данные о концентрациях метана в мёрзлых отложениях, полученных различными методами, в частности методами «headspace» и термовакuumной дегазации. С осторожностью об использовании метода дегазации льда в растворе NaCl («headspace») высказываются и Ji-Woong Yang с соавторами (2020). Они предполагают, что часть метана при экстракции адсорбируется

грунтовыми частицами и не учитывается при измерении. Впрочем, подобная проблема существует и для других методов дегазации льда: термовакuumной дегазации и сухой экстракции.

О завышенных значениях концентрации метана из образцов, отобранных методом «headspace», свидетельствуют и результаты, полученные М. Чербуниной с соавторами (2018). По их выводам, метод «headspace» подразумевает более точечный отбор образцов, по сравнению с методами «больших образцов» (Чербунина и др., 2018), что вызывает больший разброс значений концентрации CH_4 из-за крайне неравномерного распределения газов в мёрзлых отложениях, вследствие чего получаются завышенные значения (до 20 раз). Впрочем, при любом методе с увеличением размеров образца происходит уменьшение разброса данных. При этом авторы отмечают, что при низких концентрациях метана во льду оба метода дают схожие результаты. То-есть завышенные концентрации метана, извлечённого методом «headspace», можно ожидать только из тех залежей льда, где его концентрация достаточно высока (более 100 мкг/кг).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период с 2016 по 2022 г. в районе села Лаврентия исследованы четыре залежи пластовых льдов, залегающие в рыхлых отложениях приморских равнин Восточной Чукотки. Особое внимание уделялось анализу содержания метана в газовых включениях пластовых льдов. Отбор проб для определения состава газовых включений внутри льда проводился методом «headspace». Несмотря на имеющиеся недостатки метода, он является удобным способом определения концентрации метана в подземных льдах и мёрзлых породах в полевых условиях при невозможности транспортировки мёрзлых образцов.

В результате проведённых исследований получены следующие выводы.

1. С учётом значений концентраций метана в пластовых льдах подтверждён как внутригрунтовый (залежь ПТН, 432 ppmv), так и погребённый (залежь Аккани, 2 ppmv) генезис определённых залежей.

2. Значения концентрации метана в газовых включениях залежи «Лаврентия» (18 ppmv) не позволяют однозначно интерпретировать её генезис. В пользу погребённого генезиса говорят характер вмещающих отложений, наличие грубообломочных включений и невысокая концентрация метана, вероятно, связанная с грунтовыми водами, либо обусловленная эпикриогенным метаногенезом. В то же время, сопоставимая концентрация метана (20–40 ppmv) во вмещающих отложениях и в газовых включениях залежи может говорить об

одновременном промерзании пород и формирования залежи.

3. Содержание метана в газовых включениях в залежи «23-км запад» (3 ppmv) ставит под сомнение ранее выдвинутую гипотезу о внутригрунтового генезиса льда: во всех семи образцах зафиксирована концентрация метана, близкая к атмосферной. Ранее в пользу внутригрунтового генезиса залежи говорил изотопный состав льда (значение $\delta^{18}\text{O} = -18.5\text{‰}$).

Генезис пластовых льдов Арктики до сих пор остаётся одной из наиболее дискуссионных проблем современной геохронологии. В данной работе были продемонстрированы возможности учёта концентрации метана для определения происхождения пластовых льдов.

Учитывая имеющиеся ограничения метода «headsapce», перспективным направлением данного исследования может служить одновременный отбор проб пластовых залежей и вмещающих мёрзлых пород для определения содержания метана в газовых включениях различными методами (термовакuumная дегазация, холодное дробление в вакууме и др.).

Благодарности. Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды». Лабораторные анализы в работе выполнены при поддержке гранта РНФ № 23-27-00123. Работа Н.Г. Беловой выполнена в рамках темы Государственного задания № 121051100167-1.

Acknowledgments. This work was supported by the Development program of the Interdisciplinary Scientific and Educational School of M.V. Lomonosov Moscow State University “Future Planet and Global Environmental Change”. Laboratory analyses in this work were conducted with the support of RSF Grant No. 23-27-00123. N.G. Belova’s work was done within the framework of State Assignment Topic No. 121051100167-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Белова Н.Г., Маслаков А.А., Баранская А.В., Романенко Ф.А. Метан в пластовых льдах Восточной Чукотки // Взаимодействие элементов природной среды в высокоширотных условиях. 2019. С. 50–50.
- Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Трофименко Л.Т., Швеи Н.В. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621485. <http://meteo.ru/data/156-temperature#описание-массива-данных>
- Бутаков В.И., Слагода Е.А., Тихонравова Я.В. Содержание и состав атмосферных и парниковых газов в подземных льдах разного генезиса // Изв. Томского политехнич. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 11. С. 22–36.
- Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Мельников В.П., Облогов Г.Е. Метан в подземных льдах и мёрзлых четвертичных отложениях Западного Ямала // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465. № 5. С. 604–607. <https://doi.org/10.7868/S0869565215350236>
- Васильчук Ю.К. Геохимический состав подземных льдов севера Российской Арктики // Арктика и Антарктика. 2016. № 2. С. 99–115. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2016.2.21378>
- Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А., Васильчук А.К., Маслаков А.А., Чижова Ю.Н. Изотопно-кислородный состав голоценовых подземных льдов Восточной Чукотки // Доклады Академии наук. 2018. Т. 480. № 4. С. 474–479. <https://doi.org/10.7868/S0869565218160193>
- Васильчук Ю.К., Чижова Ю.Н., Маслаков А.А., Буданцева Н.А., Васильчук А.К. Вариации изотопов кислорода и водорода в современной пластовой ледяной залежи в устье р. Аккани, Восточная Чукотка // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 78–93. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-78-93>
- Васильчук Ю.К. Изотопные методы в географии. Часть 2: Геохимия стабильных изотопов пластовых льдов. В 2-х томах. М.: Изд-во МГУ, 2012. Т. I. 472 с.
- Вятурин Б.И. Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 214 с.
- Гасанов Ш.Ш. Строение и история формирования мёрзлых пород Восточной Чукотки. М.: «Наука», 1969. 169 с.
- Колесников С.Ф., Плахт И.Р. Чукотский район / Региональная криолитология. Под ред. А.И. Попова. М.: Изд-во МГУ, 1989. С. 201–217.
- Маслаков А.А., Белова Н.Г., Баранская А.В., Романенко Ф.А. Пластовые льды на восточном побережье Чукотского полуострова при потеплении климата: некоторые итоги экспедиций 2014–2018 гг. // Арктика и Антарктика. 2018. № 4. С. 30–43. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.4.28528>
- Маслаков А.А., Кузякин Л.П., Комова Н.Н. Динамика развития термоцирка, вмещающего залежь пластового льда, вблизи села Лаврентия (Чукотский АО) за 2018–2021 гг. // Арктика и Антарктика. 2021. № 4. С. 32–46. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2021.4.37225>
- Свиточ А.А. Новейшие отложения и палеогеография плейстоцена Чукотки. М.: Наука, 1980. 205 с.
- Ривкина Е.М., Краев Г.Н., Кривушин К.В., Лауринавичюс К.С., Федоров-Давыдов Д.Г., Холодов А.Л., Щербакова В.А., Гиличинский Д.А. Метан в вечно-мёрзлых отложениях Северо-Восточного сектора Арктики // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 3. С. 23–41.

- Семенов П.Б., Малышев С.В., Киль А.О., Шатрова Е.В., Лодоchnikova A.C., Белова Н.Г., Лейбман М.О., Стрелецкая И.Д. Геохимия подземных льдов Российской Арктики с фокусом на цикл углерода: результаты исследовательской статистики // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. Материалы ежегодной конференции по результатам экспедиционных исследований. Вып. 10. Отв. ред. Е.А. Гусев. Санкт-Петербург. 2023. С. 245–254. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2023-10-245-254>
- Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Оболюев Г.Е., Семенов П.Б., Ваништейн Б.Г., Ривкина Е.М. Метан в подземных льдах и мерзлых отложениях на побережье и шельфе Карского моря // Лёд и Снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 65–77.
- Чербунина М.Ю., Шмелев Д.Г., Кривенко Л.А. Влияние способов дегазации мерзлых образцов на результаты определения концентрации метана // Инженерная геология. 2018. Т. 13. № 3. С. 62–73.
- Arkhangelov, A.A., Novgorodova, E.V. Genesis of massive ice at “Ice Mountains”, Yenesei River, Western Siberia, according to results of gas analyses // Permafrost Periglac. Proc. 1991. № 2. P. 167–170. <https://doi.org/10.1002/ppp.3430020210>
- Alperin M.J., Reeburgh W.S. Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Applied Environmental Microbiology. 1985. V. 50. P. 940–945.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated // Meteorol. Zeitschrift. 2006. № 15. P. 259–263.
- Kraev G., Schulze E.-D., Yurova A., Kholodov A., Chuvin E., Rivkina E. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils // Atmosphere. 2017. T. 8. № 6. P. 105. <https://doi.org/10.3390/atmos8060105>
- Maslakov A., Zotova L., Komova N., Grishchenko M., Zamolodchikov D., Zelensky G. Vulnerability of the permafrost landscapes in the Eastern Chukotka coastal plains to human impact and climate change // Land. 2021. V. 10. № 5. P. 445.
- Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H.H., Dashtseren A., Khomutov A. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // Earth-Science Reviews. 2019. V. 193. P. 299–316.
- Raynaud D. The integrity of the ice record of greenhouse gases with a special focus on atmospheric // *Led i Sneg*. 2012. № 2 (118). P. 5–14.
- Semenov P., Pismeniuk A., Kil A., Shatrova E., Belova N., Gromov P., Malyshev S., He W., Lodochnikova A., Tarasevich I., Streletskaya I., Leibman M. Characterizing Dissolved Organic Matter and Water-Soluble Compounds in Ground Ice of the Russian Arctic: A Focus on Sample Classification within the Carbon Cycle Context // Geosciences. 2024. V. 14. № 3. P. 77. <https://doi.org/10.3390/geosciences1403007>
- Semenov P.B., Pismeniuk A.A., Malyshev S.A., Leibman M.O., Streletskaya I.D., Shatrova E.V., Kizyakov A.I., Vanshtein B.G. Methane and dissolved organic matter in the ground ice samples from Central Yamal: Implications to biogeochemical cycling and greenhouse gas emission // Geosciences. 2020. № 10. P. 450. <https://doi.org/10.3390/geosciences10110450>
- Vasil'chuk Yu.K., Maslakov A.A., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Komova N.N. Isotope Signature of the Massive Ice Bodies on the Northeast Coast of Chukotka Peninsula // Geography, Environment, Sustainability. 2012. V. 14. № 4. P. 9–19. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-020>
- Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Maslakov A.A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk J.Yu. First direct radiocarbon dating (22–27 cal Ka BP) of massive ice at the Mechigmen and Lavrentia Bay coast, Eastern Chukotka // Radiocarbon. 2024. V. 66, 2. P. 410–420. <https://doi.org/10.1017/RDC.2024.21>
- Yang J.-W., Ahn J., Iwahana G., Han S., Kim K., Fedorov A. Brief Communication: The reliability of gas extraction techniques for analysing CH₄ and N₂O compositions in gas trapped in permafrost ice wedges // The Cryosphere. 2020. № 14. P. 1311–1324. <https://doi.org/10.5194/tc-14-1311-2020>

Citation: Kuziakin L.P., Maslakov A.A., Semenov P.B., Belova N.G., Vasil'chuk Yu.K., Kil A.O. Methane in massive ice beds in Eastern Chukotka as an indicator of their origin. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2024, 64 (3): 447–463. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673424030106

Methane in massive ice beds in Eastern Chukotka as an indicator of their origin

L. P. Kuziakin^{a*}, A. A. Maslakov^a, P. B. Semenov^b,
N. G. Belova^a, Yu. K. Vasil'chuk^a, A. O. Kil^b

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^bAll-Russian Research Institute of Geology and Mineral Resources of the World Ocean
(FSUE "VNIIOkeangeologia named after academician I.S. Gramberg"), Saint-Petersburg, Russia

*e-mail: kuziakin@geogr.msu.ru

Received April 16, 2024 / Revised May 30, 2024 / Accepted July 8, 2024

The study of massive ices is of interest both for the purposes of paleogeographic reconstructions, and for solving engineering and geocryological problems. Despite the widespread distribution of massive ice beds in the cryolithozone, the problem of spatial identification of them and mapping has not yet been resolved, which is mainly due to the difficulty of determining and understanding the processes of their formation. The paper presents the results of studying the methane content as a genetic trait in massive ice beds along the coast of Eastern Chukotka. In 2016–2022, our team studied variations in the methane content in 4 massive ice beds and host deposits using the “headspace” method. The CH₄ concentration in ice and air bubbles ranged from 1 to 1582 ppmv, which made it possible to suggest the genesis of each bed and compare it with previously proposed hypotheses of their formation based on the earlier made cryolithological and oxygen isotope analyses. The study has confirmed the intra-ground (median methane concentration of 432 ppmv) and buried (2 ppmv) genesis for two beds. For the third one, the issue of its genesis remained debatable, and in the fourth bed, the obtained results have thrown doubt on the previous hypothesis about the intra-ground genesis of ice, since the recorded methane concentration was found to be close to the atmospheric one. Despite the limitations of the “headspace” method shown in the paper, it was manifested as the adequate way for the field studies when transportation of frozen samples to the laboratory is impossible.

Keywords: massive ice, methane, cryostratigraphy, Eastern Chukotka, permafrost

REFERENCES

- Belova N.G., Maslakov A.A., Baranskaya A.V., Romanenko F.A. Methan in the massive ice on the East Chukotka. *Vzaimodeistvie elementov prirodnoi sredy v vysokoshirotnykh usloviyakh*. Interaction of elements of the natural environment in high latitude conditions. 2019: 50–50. [In Russian].
- Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Trofimenko L.T., Shvets N.V. Description of the data array of mean monthly air temperature at stations in Russia. Certificate of state registration of the database No. 201462. Retrieved from: <http://meteo.ru/data/156-temperature> (Last access: 25 November 2023). [In Russian].
- Butakov V.I., Slogoda E.A., Tikhonravova Y.V. Content and composition of atmospheric and greenhouse gases in underground ice of different origins. *Izvestiya Tomskogo polytechnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2021, 332: 22–36. [In Russian].
- Vasiliev A.A., Streletskaya I.D., Mel'nikov V.P., Oblogov G.E. Methane in ground ice and frozen Quaternary deposits of Western Yamal. *Doklady Akademii nauk*. Doklady Earth Sciences. 2015, 465 (5): 604–607. <https://doi.org/10.7868/S0869565215350236>. [In Russian].
- Vasil'chuk, Y.K. Geochemical composition of ground ice in the Russian Arctic. *Arctica i Antarctica*. Arctic and Antarctic. 2016, 2: 99–115. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2016.2.21378>. [In Russian].
- Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Maslakov A.A., Chizhova Ju.N. Oxygen isotope composition of Holocene ice wedges of Eastern Chukotka. *Doklady Akademii nauk*. Doklady Earth Sciences. 2018, 480 (2): 759–763. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18060107> [In Russian].
- Vasil'chuk Yu.K., Chizhova Ju.N., Maslakov A.A., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C. Oxygen and hydrogen isotope variations in a recently formed massive ice at the mouth of the Akkani River, Eastern Chukotka. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018, 58 (1): 78–93. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-78-93> [In Russian].
- Vasil'chuk Yu.K. *Izotopnye metody v geografii. Chast' 2. Geokhimiya stabil'nykh izotopov plastovykh l'dov. Tom 1. Isotope Ratios in the Environment. Part 2: Stable isotope geochemistry of massive ice. Vol. 1. Moscow: Moscow University Press, 2012: 472 p. [In Russian].*
- Vturin B.I. *Podzemnye l'dy SSSR*. Underground ice of the USSR. Moscow: Nauka, 1975: 214 p. [In Russian].

- Gasarov S.S. *Stroenie i istoria formirovaniya m'orzlykh porod Vostochnoy Chukotki*. The structure and history of the formation of frozen rocks in Eastern Chukotka. Moscow: Nauka, 1969: 169 p. [In Russian].
- Kolesnikov S.F., Plakht I.R. Chukotka Area. *Regional'naya Kriolitologiya*. Regional Cryolithology. Ed. A.I. Popov. Moscow: MSU, 1989: 201–217. [In Russian].
- Maslakov A.A., Belova N.G., Baranskaya A.V., Romanenko F.A. The embedded ice of the eastern Chukotka Peninsula coast in conditions of climate warming: some results of expeditions in 2014–2018. *Arktika i Antarktika*. Arctic and Antarctic. 2018, 74: 30–43. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2018.4.28528> [In Russian].
- Maslakov A.A., Kuziakin L.P., Komova N.N. Dynamics of development of a thermal cirque containing a massive ice near the village of Lavrentiya (Chukotka Autonomous Okrug) for 2018–2021. *Arktika i Antarktika*. Arctic and Antarctic. 2021, 4: 32–46. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2021.4.37225> [In Russian].
- Svitoch A.A. *Noveyshie otlozheniya i paleogeografia pleistotsena Chukotki*. Recent deposits and Pleistocene paleogeography of Chukotka. Moscow: Nauka, 1980: 205 p. [In Russian].
- Rivkina Ye.M., Krayev G.N., Krivushin K.V., Laurinavichyus K.S., Fedorov-Davydov D.G., Kholodov A.L., Shcherbakova V.A., Gilichinskiy D.A. Methane in the permafrost deposits of the northeastern sector of the Arctic. *Kriosfera Zemli*. Cryosphere of the Earth. 2006, 10 (3): 23–41. [In Russian].
- Semenov P.B., Malyshev S.V., Kil A.O., Shatrova E.V., Lodochnikova A.S., Belova N.G., Leibman M.O., Streletskaya I.D. Geochemistry of ground ice in the Russian Arctic with a focus on the carbon cycle explorative statistics results. *Relief i chetvertichnye obrazovaniya Arktiki, Subarkтики i Severo-Zapada Rossii. Materialy ezhegodnoy konferentsii po rezultatam ekspeditsionnykh issledovaniy. Vypusk 10. Otv. red. E.A. Gusev. Sankt-Peterburg*. Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. Proceedings of the annual conference on the results of expedition research. Issue 10. Gusev E.A. St. Petersburg. 2023: 245–254. <https://doi.org/10.24412/2687-1092-2023-10-245-254> [In Russian].
- Streletskaya I.D., Vasil'ev A.A., Oblogov G.E., Semenov P.B., Vanshtein B.G., Rivkina E.M. Methane in underground ice and frozen sediments on the coast and shelf of the Kara Sea. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2018, 58 (1): 65–77. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-65-77> [In Russian].
- Cherbunina M.Y., Shmelev D.G., Krivenok L.A. The effect of degassing method of frozen soils on the test results of methane concentration. *Inzhenernaya geologia*. Engineering Geology. 2018, 13 (3): 62–73. [In Russian].
- Arkhangelov, A.A., Novgorodova, E.V. Genesis of massive ice at "Ice Mountains", Yenesei River, Western Siberia, according to results of gas analyses. *Permafrost and Periglacial Processes*. 1991, 2: 167–170. <https://doi.org/10.1002/ppp.3430020210>
- Alperin M.J., Reeburgh W.S. Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation. *Applied Environmental Microbiology*. 1985, 50: 940–945.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F. World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift*. 2006, 15: 259–263.
- Kraev G., Schulze E.D., Yurova A., Kholodov A., Chuvilin E., Rivkina E. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils. *Atmosphere*. 2017, 8 (6): 105.
- Maslakov A., Zotova L., Komova N., Grishchenko M., Zamolodchikov D., Zelensky G. Vulnerability of the permafrost landscapes in the Eastern Chukotka coastal plains to human impact and climate change. *Land*. 2012, 10 (5): 445. <https://doi.org/10.3390/land10050445>
- Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H. H., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Etzelmüller B., Kholodov A., Khomutov A. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews*. 2019, 193: 299–316.
- Raynaud D. The integrity of the ice record of greenhouse gases with a special focus on atmospheric. *Ice and snow*. 2012, 2 (118): 5–14.
- Semenov P., Pismeniuk A., Kil A., Shatrova E., Belova N., Gromov P., Malyshev S., He W., Lodochnikova A., Tarasevich I., Streletskaya I., Leibman M. Characterizing Dissolved Organic Matter and Water-Soluble Compounds in Ground Ice of the Russian Arctic: A Focus on Sample Classification within the Carbon Cycle Context. *Geosciences* 2024, 14: 77. <https://doi.org/10.3390/geosciences1403007>
- Semenov P.B., Pismeniuk A.A., Malyshev S.A., Leibman M.O., Streletskaya I.D., Shatrova E.V., Kizyakov A.I., Vanshtein B.G. Methane and dissolved organic matter in the ground ice samples from Central Yamal: Implications to biogeochemical cycling and greenhouse gas emission. *Geosciences* 2020, 10: 450. <https://doi.org/10.3390/geosciences10110450>
- Vasil'chuk Yu.K., Maslakov A.A., Budantseva N.A., Vasil'chuk A.C., Komova N.N. Isotope Signature of the Massive Ice Bodies on the Northeast Coast Of Chukotka Peninsula. *Geography, Environment, Sustainability*. 2021, 14 (4): 9–19. <https://doi.org/10.24057/2071-9388-2021-020>
- Vasil'chuk Yu.K., Budantseva N.A., Maslakov A.A., Vasil'chuk A.C., Vasil'chuk J.Yu. First direct radiocarbon dating (22–27 cal Ka BP) of massive ice at the Mechigmen and Lavrentia Bay coast, Eastern Chukotka. *Radiocarbon*. 2024, 66, 2: 410–420. <https://doi.org/10.1017/RDC.2024.21>
- Yang J.-W., Ahn J., Iwahana G., Han S., Kim K., Fedorov A. Brief Communication: The reliability of gas extraction techniques for analysing CH₄ and N₂O compositions in gas trapped in permafrost ice wedges. *The Cryosphere*. 2020, 14: 1311–1324. <https://doi.org/10.5194/tc-14-1311-2020>