



МЕТАН В ПЛАСТОВЫХ ЛЬДАХ ЦЕНТРАЛЬНОГО И ЗАПАДНОГО ЯМАЛА КАК ИНДИКАТОР ИХ ГЕНЕЗИСА

✉ Дунаев А.В.¹, Кузякин Л.П.¹, Луначёв А.В.², Самохвалов Н.Д.^{1,2}, Николаева Е.С.¹,
Кажукало Г.А.¹, Прядилина А.В.¹, Наумов А.Д.³

¹МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН, Пущино, Россия

³АО «Институт экологического проектирования и изысканий», Москва, Россия

✉ dunaevav2004@gmail.com

В рамках полевых исследований при поддержке Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова, АО «ИЭПИ» и ГКУ ЯНАО «НЦИА» в летний полевой сезон 2025 года было исследовано 6 залежей пластовых льдов на территории Бованенковского, Круzenshternского и Харасавэйского месторождений Центрального и Западного Ямала. Проведено криолитологическое описание залежей, установлены особенности их строения. Также проведён отбор образцов газа (воздушных включений) из льдов методом равновесной дегазации в полевых условиях (Headspace). Высокие концентрации метана в пластовых льдах Центрального Ямала (Бованенково) – в среднем 7,8 мл/кг, а также их строение, более близкое к высокольдистому суглинку, чем ко льду, свидетельствуют об их внутригрунтовым происхождении, вероятно, сегрегационном, при первичном промерзании водонасыщенных отложений. Залежи, вскрывающиеся в береговых обрывах на побережье Ямала, также могут быть идентифицированы как внутригрунтовые, при высоких средних значениях содержания метана (0,65, 1,51 мл/кг), либо как погребённые, при низких значениях (0,13, 0,18 и 0,07 мл/кг).

Ключевые слова: *пластовые льды, метан, палеогеография, полуостров Ямал, криолитология*

Введение. Пластовые льды – широко распространённый в криолитозоне тип залежеобразующих льдов, выделяемый по морфологическому признаку: длина залежей (до 1 км) намного превышает их мощность (от 0,5 м до 30-50 м) [Втюрин, 1975]. Подобное определение позволяет относить к пластовым льдам залежи разного происхождения и строения. В связи с этим в научной среде существует дискуссия, связанная с определением генезиса пластовых льдов, установление которого необходимо для корректного восстановления истории формирования и промерзания отложений. Также понимание механизма формирования пластовых льдов в пределах ограниченного участка позволит предсказывать гипотетические места их залегания на данной территории и снизит стоимость инженерных изысканий при освоении.

Хотя большинство исследователей признаёт возможность существования нескольких механизмов формирования пластовых льдов, при установлении генезиса наиболее крупных залежей существует два подхода. Первый, гляциалистский, гласит, что пластовые льды являются реликтами плейстоценового оледенения – погребённым ледниковым или снежниковым льдом. Данная позиция рассмотрена в работах Ф.А. Каплянской, С.Ю. Королёва, Л.Н. Крицук, И.А. Некрасова, В.И. Соломатина, В.Д. Тарноградского, Н.В. Тумель и др. Маринисты, напротив, полагают возможным формирование крупных пластовых льдов во внутригрунтовых условиях, при промерзании водонасыщенных отложений. Данный подход развит в работах В.В. Баулина, Б.И. Втюрина, Ю.К. Васильчука, И.Д. Данилова, Г.И. Дубикова, М.М. Корейши, А.И. Попова, Н.А. Шполянской, М.А. Великоцкого и др.

Одним из перспективных методов, позволяющих предположить генезис пластовых льдов, является анализ газовой компоненты в составе льда, в частности – определение содержания метана в воздушных включениях. В ряде работ [Arkhangelov, Novgorodova, 1991; Kraev et al., 2017; Walz et al., 2018; Семенов и др., 2023] показано различие в

содержании метана во льдах различного генезиса, а также установлена возможность применения этого параметра для установления генезиса льда.

Цель работы: на основании криолитологического описания залежей пластовых льдов и содержания метана в их воздушных включениях предположить наиболее вероятный механизм их формирования.

Район исследований. Исследуемая территория расположена в центральной и западной частях полуострова Ямал (рис. 1). Четвертичные отложения в районе исследования достигают 250-300 м и представлены супесчано-суглинистыми и песчаными породами с мощностью до 12-15 м. В геоморфологическом плане территория исследования представляет из себя лестницу террас с абсолютными высотами от 2-7 м до 40-60м. Поверхность террас представлена слабоволнистым рельефом с характерным развитием овражно-балочной сети и мерзлотных процессов (в первую очередь, отмечаются полигональные и термокарстовые формы с образованием крупных хасыреев) [Полуостров Ямал, 1975].

Климат субарктический, среднегодовая температура отрицательная ($-3,8^{\circ}\text{C}$), самый холодный месяц – январь (среднесуточная температура $-18,5^{\circ}\text{C}$), самый теплый – июль (среднесуточная температура $11,1^{\circ}\text{C}$) [Природа Ямала, 1995]. Количество осадков составляет 250-300 мм. Снежный покров в районе исследования устанавливается в конце сентября-начале октября и сохраняется до середины июня.

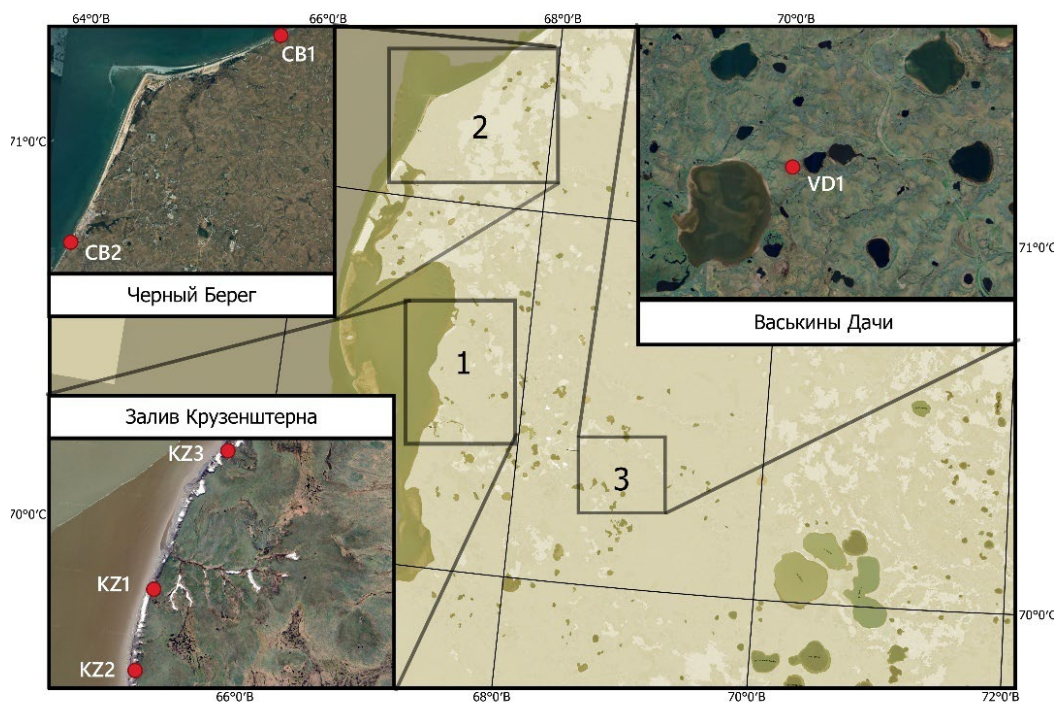


Рис. 1. Район работ – Западный и Центральный Ямал. Большая часть залежей вскрывалась в береговых уступах на побережье залива Шарапов Шар (залив Крузенштерна) и в районе мыса Харасавэй («Чёрный берег»). В районе Бованенковского месторождения (станция «Васькины дачи») пластовый лёд вскрыт в нижней части стенки заросшего термоцирка, открывающегося в термокарстовое озеро.

Мощность многолетнемерзлых пород в пределах участка исследования достигает 120-200 м, под мерзлыми породами залегает горизонт охлажденных водопроницаемых пород с высокоминерализованными водами и водонепроницаемых пород с минерализованными поровыми растворами. На Западном Ямале среднегодовая температура мерзлых пород на подошве зоны годовых колебаний может достигать от $-2,5^{\circ}\text{C}$ до -4°C [Баулин и др., 1967]. В районе Бованенковского НГКМ температуры многолетнемерзлых пород изменяются в диапазоне от $-7,0^{\circ}\text{C}$ до $-3,8^{\circ}\text{C}$ в зависимости от типа местности и характера растительного покрова [Геокриология СССР, 1989].

Всего было исследовано 6 залежей пластовых льдов. Залежь VD1 – на Центральном Ямале, в районе Бованенковского месторождения, в пределах геокриологического стационара «Васькины дачи». Две залежи (CB1 и CB2) обнаружены в береговых уступах в районе «Чёрного берега» вблизи Харасавэйского месторождения. Ещё три залежи (KZ1, KZ2, KZ3) вскрыты в береговых уступах на побережье залива Шарапов Шар, в районе Крузенштернского месторождения.

Методы. В полевых условиях проводилось криолитологическое описание залежей пластовых льдов в предварительно защищенных стенках естественных обнажений. Фиксировались форма ледяного тела, особенности его структуры и текстуры, характер границ с перекрывающими и, по возможности, подстилающими отложениями. Также описывались перекрывающие отложения: состав, криотекстура, цвет, наличие органики.

Из пластовых льдов и вмещающих мёрзлых отложений методом равновесной дегазации в полевых условиях (метод «Headspace») проводился отбор газовой составляющей [Alperin, 1985; Облогов, 2016]. Для предотвращения растворения газов при перекачивании воздуха из пробоотборника в стеклянный герметичный флакон в качестве «водной пробки» использовался высококонцентрированный раствор хлорида натрия.

В лаборатории карбомониторинга наземных экосистем ИФХПБП РАН проводился анализ состава газов, отобранных из пластовых льдов на приборе Хроматэк Кристалл 5000 с плазменно-ионизационным типом детектора. Впоследствии полученные данные о содержании метана в пробах были пересчитаны из ppm в ppmV и мл/кг.

Результаты. В 2025 году на берегу залива Шарапов Шар (Крузенштернское месторождение) было вскрыто три залежи пластового льда. Залежь 25KZ1 была обнаружена в стенке берегового уступа на глубине 5,5 м от бровки (рис. 2А). Пластовый лёд перекрыт пылеватыми суглинками с прослоями глин. Залежь имеет чашеобразную форму с уклоном до 30°. Ледовое тело осложнено грунтовым включением (темно-серый суглинок с массивной криотекстурой). Наблюдается горизонтальная слоистость, подчеркиваемая чередованием стекловидного льда (толщина прослоев 5-7 см) и ледогрунта, аналогичного тому, что вскрывается в нише. Цвет залежи серый, черный в боковых частях, имеется включение белого льда с большим количеством пузырьков (размер пузырьков менее 1,5 мм). Видимая мощность залежи – 1,0 м, под залежью лед переходит в ледогрунт. Перекрывающие отложения находятся в мерзлом состоянии с глубины 1,3 – 1,5 м. По результатам анализа (2 пробы) установлено очень низкое содержание метана: минимальное значение составляет 0,02 мл/кг (24 ppmV), максимальное – 0,12 мл/кг (135 ppmV).

Вторая залежь пластового льда (25KZ2) была обнаружена в 500 м к югу от первой залежи (рис. 2Б). Лед также вскрыт в береговом уступе на глубине 8,0 м от поверхности. Залежь 25KZ2 крупнее первой, нижняя граница льда опускается до 1-2 м над уровнем моря (видимая мощность превышает 4,0 м). Сверху вниз в перекрывающей толще вскрываются суглинки и глины, аналогичные тем, что вскрывались на точке 25KZ1. Один из бортов ледового тела перекрыт осыпным материалом (пылеватый песок средней зернистости), на контакте льда и перекрывающей пачки талых отложений вскрывается прослой мерзлых суглинков с массивной криотекстурой. Отмечается падение перекрывающих слоев и структурных частей ледовой залежи в сторону береговой линии. Залежь имеет темно-серый, черный цвет, во льду присутствуют пузырьки (диаметр менее 2 мм), наблюдается проявление слоистости, подчеркиваемое тонкими прослоями мерзлого ледогрунта (в полевых условиях механический состав отложений определен как пылеватый суглинок). Залежь также осложнена включением белого льда с большим количеством мелких (менее 1 мм в диаметре) пузырьков. Содержание метана в залежи относительно невысокое – среднее значение по результатам анализа 3 проб составило 0,65 мл/кг (821 ppmV), минимальное – 0,06 мл/кг (71,14 ppmV), максимальное – 1,66 мл/кг (2076 ppmV). Содержание метана в перекрывающих отложениях – 1,08 мл/кг (641 ppmV).

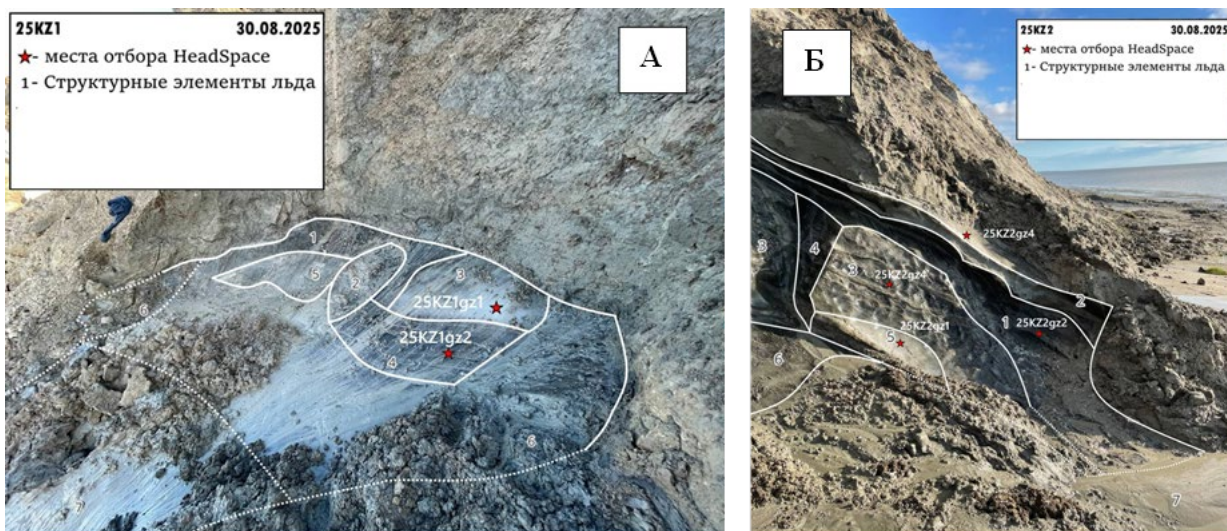


Рис. 2. Залежи пластового льда на побережье залива Шарапов Шар. А – 25KZ1. Б – 25KZ2.

Третья залежь (25KZ3) была обнаружена в 1 км к северу от залежи 25KZ1 (рис. 3). Выход приурочен к останцу между двумя крупными термоцирками более древней генерации. В отличие от 25KZ1 и 25KZ2, третья залежь экспонирована в верхней части берегового уступа (12-13 м над урезом). Максимальная высота перекрывающих отложений составляет около 9,0 м, минимальная – 1,5 м.

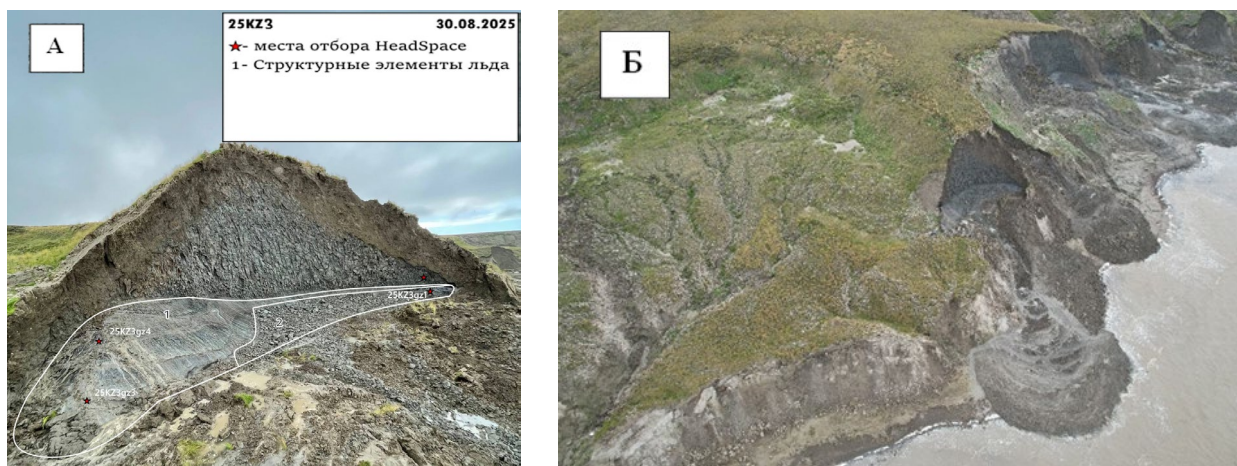


Рис. 3. Залежь пластового льда на побережье залива Шарапов Шар – 25KZ3. Ледяное тело перекрыто глинами с сетчатой криотекстурой.

В обнажении последовательно вскрывается пылеватая супесь в талом состоянии, коричневый суглинок в талом состоянии (нижняя часть горизонта находится в мерзлом состоянии, криотекстура атакситовая, сетчатая), основные же перекрывающие отложения представлены темно-серой мерзлой глиной с сетчатой криотекстурой. Шлиры льда, образующие сетчатую криотекстуру, достигают 3 см в толщине (лед в прослоях прозрачный, с небольшим наличием округлых пузырьков). Сама залежь имеет вытянутую в профиле форму, сложена стекловидным льдом с практически полным отсутствием пузырьков. Видимая мощность льда достигает 2,5 м в левом борту и уменьшается до 1,0-1,5 м правом борту. По анализу 3 проб в залежи обнаружено низкое содержание метана: минимальное значение – 0,08 мл/кг (107 ppmV), максимальное – 0,25 мл/кг (321 ppmV). Среднее значение составило 0,13 мл/кг (161 ppmV).

В районе Харасавэйского месторождения пластовые льды встречаются в пределах I и III морских террас. В 2025 году было обнаружено и изучено 2 залежи пластового льда. Первая залежь (25CB1) обнаружена в небольшом термоцирке, вложенном в III морскую

террасу (к северо-востоку от мыса Бурунный) (рис. 4А). Лед вскрывается на глубине от 1,0 м от бровки уступа. Залежь перекрыта осыпными отложениями (коричневыми среднезернистыми песками коричневыми супесями), в правом борту залежи отмечено наличие мерзлых темно-серых суглинков. Из-за большого содержания минеральных включений залежь близка к ледогрунту, а не льду. Залежь имеет слоистое строение, включающее три ледовых (максимальная толщина составила 100-125 см, средняя – 75 см) и два ледогрунтовых слоя (толщина около 50 см). Лед и ледогрунт имеют серый цвет, в ледовых слоях отсутствуют пузырьки, лед стекловидный. Отмечается частое переслаивание льда и ледогрунта в боковых частях залежи. Нижний ледогрунтовый слой отличается большей толщиной и льдистостью, расширяется в правом борту. Видимая мощность залежи – 3,5 м. По результатам анализа 3 проб в залежи содержание метана относительно невысокое: среднее значение составило 0,18 мл/кг (201 ppmV), минимальное – 0,02 мл/кг (19,5 ppmV), максимальное – 0,33 мл/кг (371 ppmV). При этом во вмещающих отложениях содержание метана достаточно высокое – 1,09 мл/кг (542 ppmV).

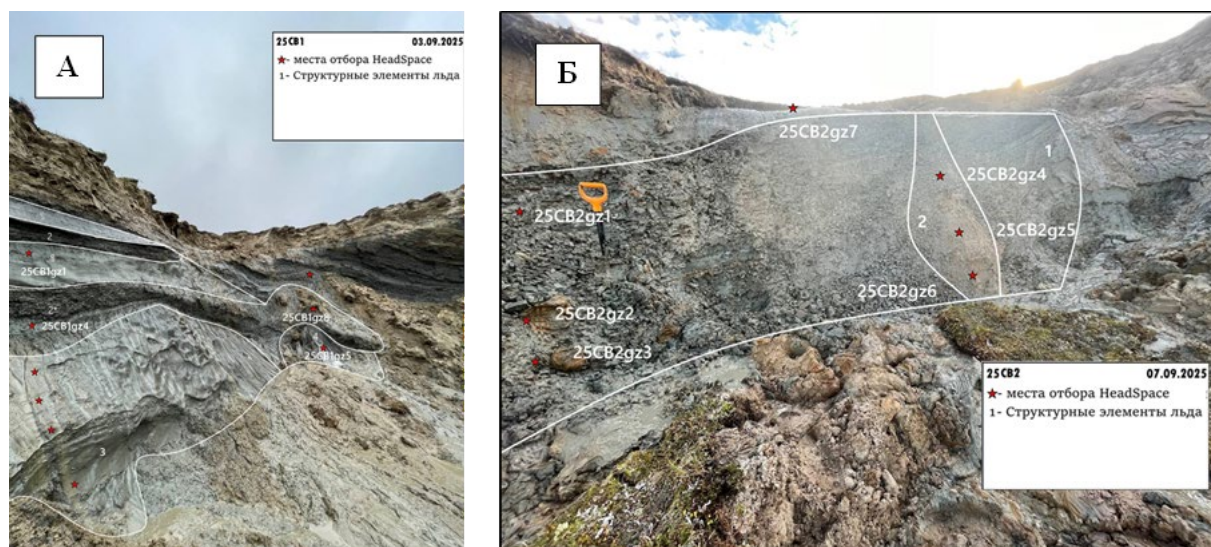


Рис. 4. Пластовые льды в районе Харасавэйского месторождения («Чёрный берег»). А – залежь 25CB1. Б – залежь 25CB2.

Вторая залежь (25CB2) обнаружена к югу от поселка Харасавэй в отложениях I морской террасы. Лед обнаружен на глубине 0,5 м от бровки уступа высотой 6-7 м и перекрыт тонким слоем торфа и коричневого суглинка в талом состоянии (рис. 4Б). Сама залежь представляет из себя переслаивание серого суглинка в мерзлом состоянии (криотекстура сетчатая, блоки ледогрунта имеют массивную криотекстуру, разделены крупными шпирями льда, толщина которых достигает 2-3см) и прозрачного льда без пузырьков. Максимальный размер линз льда достигает 7-10 см, ледогрунта – 12-15 см. В правой части обнажения пластовый лед осложнен вертикальной колонной (ширина до 75 см) из ледогрунта (коричневый суглинок с массивной криотекстурой). В колонне включений льда не обнаружено. Содержание метана в залежи (по результатам анализа 3 проб) относительно высокое: среднее значение достигает 1,51 мл/кг (1676 ppmV), максимальное – 3,22 мл/кг (3580 ppmV), минимальное – 0,6 мл/кг (663 ppmV). В грунтовых прослоях внутри залежи содержание метана также высокое – 2,27 мл/кг (1197 ppmV).

На Центральном Ямале, в районе Бованенковского месторождения и геофизиологического стационара «Васькины Дачи» залежь пластового льда была обнаружена в стабилизировавшемся термоцирке, вложенном в отложения III террасы (рис. 5).

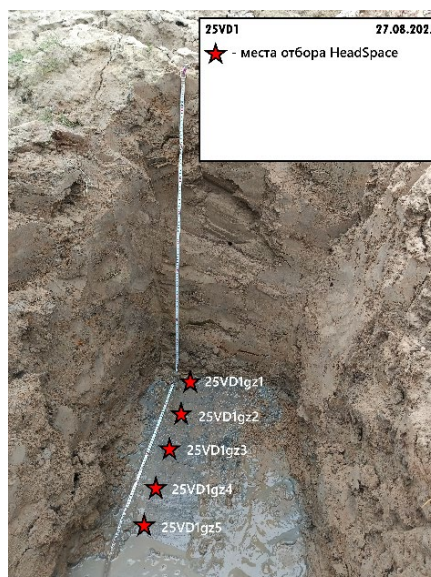


Рис. 5. Схема отбора образцов из залежи 25VD1 (Центральный Ямал, Бованенково, Васькины Дачи). Пластовый лёд (серого цвета) перекрыт обвальными отложениями песчаного и супесчаного состава. Перекрывающие отложения – пески и супеси слоистые, в стенке термоцирка уже протаявшие.

Лёд вскрыт на глубине 7 м от бровки термоцирка, перекрыт осыпными отложениями (пылеватые пески и супеси). По количеству минеральных включений залежь скорее ближе к ледогрунту, чем к чистому льду. Наблюдается горизонтальная слоистость, подчёркиваемая чередованием прослоев более чистого стекловидного льда, толщиной до 1-2 см и суглинка с атакситовой криотекстурой (ледогрунт). Механический состав минеральных включений во льду определён в полевых условиях как суглинистый с примесью песчаных частиц. Цвет залежи серый. Видимая мощность залежи – 1,0 м. Контакт с перекрывающими отложениями не установлен, так как залежь скрыта под осыпным шлейфом. Перекрывающие отложения – слоистые пески и супеси, в стенке термоцирка находились уже в талом состоянии. Содержание метана в залежи очень высокое (по результатам анализа 5 проб): минимальное значение составляет 4,1 мл/кг (4 550 ppmV), среднее – 7,84 мл/кг (8 713 ppmV), максимальное – 11,06 мл/кг (12 289 ppmV).

Обсуждение результатов. В основе интерпретации генезиса пластовых льдов по содержанию в них метана лежит несколько предположений [Васильев и др., 2015; Стрелецкая и др., 2018; Кузякин и др., 2024]. Метан консервируется в мёрзлых породах и природных льдах в форме газовых включений из-за закупоривания пор в процессе промерзания. Низкая биохимическая активность в мерзлоте и затруднённая миграция газов сквозь неё позволяет считать концентрацию метана достаточно стабильной во времени. Это предположение даёт возможность определять условия промерзания отложений на основе концентраций метана в них. Если до промерзания отложения находились в бескислородных условиях, где происходит активный метаногенез, то в процессе формирования мерзлоты содержащийся в осадках 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). При формировании льда ледников в его порах консервируется атмосферный воздух, концентрация метана в котором составляет 1,8 ppm [Raynaud, 2012]. Иными словами, чем ниже содержание метана в пластовом льду, тем более вероятно, что в его воздушных включениях содержится атмосферный воздух, а лёд имеет аллохтонное (погребённое) происхождение. Высокие же концентрации метана однозначно указывают на внутригрунтовое происхождение залежей.

Табл. 1. Сопоставление содержания метана в воздушных включениях пластовых льдов Западной Сибири и Восточной Чукотки и их генезиса (в т.ч. предполагаемого в данном исследовании).

Залежь пластового льда	Содержание метана, ppmV (мин/сред/макс (кол-во проб))	Содержанием метана, мл/кг (мин/сред/макс)	Генезис (в т.ч. предполагаемый)	Источник
25KZ1 (Крузенштерн)	24/80/135 (2)	0,02/0,07/0,12	Аллохтонный (погребённый)	эта публикация
25KZ2 (Крузенштерн)	71/821/2076 (3)	0,06/0,65/1,66	Внутригрунтовый	эта публикация
25KZ3 (Крузенштерн)	55/161/321 (3)	0,05/0,13/0,25	Внутригрунтовый инъекционный	эта публикация
25CB1 (Харасавэй)	19/201/371 (3)	0,02/0,18/0,33	Метод не позволяет однозначно предположить генезис	эта публикация
25CB2 (Харасавэй)	664/1676/3580 (3)	0,6/1,51/3,22	Внутригрунтовый	эта публикация
25VD1 (Бованенково)	4550/8713/12289 (5)	4,1/7,84/11,06	Внутригрунтовый (сегрегационный, при промерзании отложений)	эта публикация
Верхняя залежь пластового льда (Марре-Сале)	-	<0,01/0,93/23,29	Миграционный механизм образования при сингенетическом промерзании отложений	Облогов и др., 2025
Нижняя залежь пластового льда (Марре-Сале)	-	0,01/1,75/23,97	Инъекционный внутригрунтовый (при первичном промерзании отложений)	Облогов и др., 2025;
Нижняя залежь пластового льда (Сопочная Карга)	-	0,01/0,42/1,45	Метод не позволяет однозначно предположить генезис	Облогов и др., 2025
Пластовые льды (Васькины Дачи, Бованенково)	5308/15931/30719	-	Нет прямых указаний на генезис льда	Семёнов и др, 2024
ПЛ «23-й км» (Восточная Чукотка)	3/3/4	-	Погребённый ледник или снежник	Кузякин и др., 2024
ПЛ «ПТН» (Восточная Чукотка)	9/432/1582	-	Внутригрунтовый сегрегационный лёд, сформированный при эпигенетическом промерзании.	Кузякин и др., 2024
ПЛ «Аккани» (Восточная Чукотка)	2/2/3	-	Погребённый ледник или снежник	Кузякин и др., 2024
ПЛ «Лаврентия» (Восточная Чукотка)	2/18/70	-	Метод не позволяет однозначно предположить генезис	Кузякин и др., 2024

Несмотря на ряд недостатков, существующих при отборе проб методом «Headspace» [Бутаков и др., 2021; Woong Yang et al., 2020; Чербунина и др., 2018], он применяется для изучения пластовых льдов на севере Западной Сибири и Чукотки (табл. 1). Пластовые залежи Западной Сибири, сведения о которых имеются в литературе, как правило

характеризуются высоким содержанием метана (около 1-2 мл/кг в районе Марре-Сале и 15931 ppmV в районе Бованенково) и интерпретируются исследователями как залежи внутригрунтового происхождения [Облогов и др., 2025; Семёнов и др., 2024].

Для пластовых льдов Восточной Чукотки [Кузякин и др., 2024] характерны существенно меньшие значения содержания метана. Наиболее низкие значения (залежь «23-й км» и «Аккани») интерпретируются как подтверждение погребённого происхождения льдов, что в условиях низкогогорного рельефа Чукотки вполне вероятно. Для залежей с более высоким содержанием метана предполагается внутригрунтовый генезис.

Совместный анализ криолитологического строения залежей пластовых льдов и содержания метана в них позволяет уверенно говорить о внутригрунтовом генезисе пластового льда в районе Бованенково (Васькины Дачи). В качестве подтверждения этого тезиса можно привести слоистое строение залежи, высокое содержание грунтовых частиц, а также очень высокое, по сравнению с другими залежами, содержание метана (до 11,06 мл/кг). Подобные значения нехарактерны для ледникового льда (или льда из атмосферных осадков), а могут быть объяснены с позиции внутригрунтового генезиса. Слоистое строение залежи указывает на сегрегационный механизм её формирования при промерзании вмещающих отложений.

В районе «Чёрного берега» (Харасавэй) залежь 25CB2 может рассматриваться как внутригрунтовая из-за достаточно высокого содержания метана (до 3,22 мл/кг). На это также указывают схожие высокие значения содержания метана в перекрывающих отложениях (2,27 мл/кг). Эта же залежь была описана ранее Беловой Н.Г. В работе [Белова, 2014] образцы из залежи анализировались методом изотопного анализа расплава льда, по результатам анализа значения $\delta^{18}\text{O}$ составили от -18,6 до 26,3‰, значения $\delta^{18}\text{O}$ в залежи уменьшаются пропорционально росту d_{exc} , что свидетельствует о формировании пласта при эпигенетическом промерзании вмещающих отложений при промерзании сверху вниз. Изотопный состав залежи свидетельствует о внутригрунтовом происхождении залежи работе [Белова, 2014]. Такая интерпретация генезиса залежи на основе изотопного состава совпадает с результатами анализа метана методом равновесной дегазации.

Залежь 25CB1, напротив, характеризуется низким содержанием метана (до 0,33 мл/кг), при этом во вмещающих отложениях его содержание в 3 раза выше (1,09 мл/кг). Это можно интерпретировать как подтверждение аллохтонного генезиса. Однако стоит отметить, что при описании залежи указана стекловидная текстура льда и отсутствие пузырьков воздуха внутри льда. Поэтому низкое содержание метана во льду может быть объяснено как аллохтонным происхождением льда, так и просто отсутствием необходимого количества воздуха в залежи из-за особенностей её строения. Следовательно, для данной залежи преждевременно делать однозначный вывод о генезисе только на основе анализа содержания метана.

В районе Крузенштернского месторождения (побережье залива Шарапов Шар) только залежь 25KZ2 (см. рис. 2Б) может быть отнесена к внутригрунтовым из-за высокого содержания метана в ней (до 1,66 мл/кг). Во вмещающих отложениях содержание метана также достаточно высокое (1,08 мл/кг), что говорит о взаимосвязи отложений и пластового льда.

Залежь 25KZ3 характеризуется невысоким содержанием метана (до 0,25 мл/кг), однако, особенности её криолитологического строения (стекловидный лёд без пузырьков и сетчатая криотекстура перекрывающих глин) свидетельствуют о её внутригрунтовом инъекционном генезисе. Низкое содержание метана в данном случае может объясняться отсутствием воздушных включений во льду.

Залежь 25KZ1 имеет самые низкие значения концентрации метана (до 0,12 мл/кг). При этом отмечается, что во льду содержится достаточно большое количество пузырьков

воздуха. Следовательно, низкое содержание метана может быть связано с аллохтонным происхождением залежи.

Таким образом, внутригрунтовое происхождение пластового льда может подтверждаться только высоким содержанием метана. Низкое содержание может свидетельствовать либо о погребённом происхождении залежи, либо об отсутствии воздушных включений во льду. В данном случае необходимо дополнительно рассматривать криолитологическое строение залежей.

Выводы. Несмотря на недостатки, из-за удобства и простоты метод «Headspace» достаточно активно применяется для исследования воздушных включений в многолетнемёрзлых породах и пластовых льдах. По результатам анализа содержания метана в воздушных включениях пластовых льдов на Центральном и Западном Ямале можно сделать следующие выводы:

1) Наибольшее содержание метана характерно для залежи пластового льда в районе Бованенково (до 11,06 мл/кг), что однозначно указывает на её внутригрунтовое происхождение, вероятно, по сегрегационному механизму.

2) По содержанию метана пластовые льды на побережье (районы Круzensхтернского и Харасавэйского месторождений) можно разделить на три группы. Первая группа – пластовые льды с высоким содержанием метана (25KZ2 – до 1,66 мл/кг и 25CB2 – до 3,22 мл/кг), которые с определённой степенью уверенности можно называть внутригрунтовыми. Вторая группа – пластовые льды с низким содержанием метана (25KZ3 – до 0,25 мл/кг и 25CB1 – до 0,33 мл/кг) и с незначительным количеством воздушных включений (стекловидная текстура залежи). В данном случае низкое содержание метана вызвано отсутствием пузырьков воздуха, поэтому данный критерий не подходит для установления генезиса льдов этого типа. Третья группа – пластовые льды с низким содержанием метана (25KZ1 – до 0,12 мл/кг) и значительным количеством воздушных включений. В этом случае можно предполагать погребённый (аллохтонный) генезис пластового льда.

3) Определение количества метана в воздушных включениях пластовых льдов позволяет с определённой степенью достоверности выделить залежи внутригрунтового происхождения, для которых характерны высокие концентрации метана. Однако, использования только одного этого критерия недостаточно для установления генезиса пластовых льдов. Вероятно, данный геохимический анализ может успешно работать совместно с криолитологическим и изотопным анализами.

Благодарности. Полевые исследования выполнены при поддержке АО «Институт экологического проектирования и изысканий» и Географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (проект «Мониторинг состояния окружающей среды на лицензионных участках Карского и Баренцева морей, Байдарацкой губы в 2024-2026 гг.»). Лабораторные исследования выполнены в лаборатории карбомониторинга наземных экосистем ИФХПБП РАН по проекту РНФ №25-17-00010.

ЛИТЕРАТУРА

Баулин В.В., Белопухова Е.Б., Дубиков Г.И., Шмелев Л.М. Геокриологические условия Западно-Сибирской низменности. М.: Наука, 1967. 214 с.

Белова Н. Г. Пластовые льды юго-западного побережья Карского моря. МАКС Пресс Москва, 2014. 180 с

Бутаков В.И., Слагода Е.А., Тихонравова Я.В. Содержание и состав атмосферных и парниковых газов в подземных льдах разного генезиса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. №. 11. С. 22–36. doi: 10.18799/24131830/2021/11/3082

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. 604–604. doi: 10.7868/S0869565215350236

- Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 214 с.
- Геокриология СССР. Западная Сибирь / под ред. Э.Д. Ершова. М.: Недра, 1989. 454 с.
- Кузякин Л.П., Маслаков А.А., Семёнов П.Б. Белова Н.Г., Васильчук Ю.К., Киль А.О. Метан в пластовых льдах Восточной Чукотки как индикатор их генезиса // Лёд и снег. 2024. Т. 64. №3. С. 447-463. doi: 10.31857/S2076673424030106
- Облогов Г.Е. Эволюция криолитозоны побережья и шельфа Карского моря в позднем неоплейстоцене-голоцене. Тюмень: Ин-т криосферы Земли СО РАН. 2016.
- Облогов Г.Е., Задорожная Н.А., Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Семенов П.Б. Метан в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях севера Западной Сибири // Криосфера Земли. 2025. Т. XXIX. № 3. С. 31–44. doi: 10.15372/KZ20250304
- Полуостров Ямал (инженерно-геологический очерк) / Под ред. В.Т. Трофимова. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. 280 с.
- Природа Ямала / В. Н. Большаков, В. С. Балахонов, В. Д. Громик [и др.]. – Екатеринбург : Уральская издательская фирма "Наука", 1995. 435 с.
- Семенов П.Б., Малышев С.В., Киль А.О., Шатрова Е.В., Лодочникова А.С., 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. 2023. Выпуск 10, с. 245-254. doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-245-254
- Семенов П.Б., Киль А.О., Шатрова Е.В., Белова Н.Г., Левочкина О.В., Лейбман М.О., Облогов Г.Е., Хомутов А.В., Стрелецкая И.Д. Молекулярные характеристики состава углеводородных газов и изотопный состав метана в образцах подземных льдов как ключ к пониманию состояния метанового цикла // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. Выпуск 11, с. 581-587. doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-581-587
- Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов 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. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-65-77
- 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. doi: 10.25296/1993-5056-2018-13-3-62-73
- Alperin M.J., Reeburgh W.S. Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Applied and Environmental Microbiology. 1985. Vol. 50. P. 940–945. doi: 10.1128/aem.50.4.940-945.1985
- 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. doi: 10.1002/ppp.3430020210
- 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. Vol. 8. №. 6. P. 105. doi: 10.3390/atmos8060105.
- Raynaud D. The integrity of the ice record of green-house gases with a special focus on atmospheric // Ice and Snow. 2012. Vol. Is. 2. P. 5-14. doi:10.15356/2076-6734-2012-2-5-14
- Walz J., Knoblauch C., Tigges R., Opel T., Schirrmeister L., Pfeiffer E. M. Greenhouse gas production in degrading ice-rich permafrost deposits in northeastern Siberia // Biogeosciences. 2018. Vol. 15. №. 17. P. 5423–5436. doi: 10.5194/bg-15-5423-2018
- 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. doi: 10.5194/tc-14-1311-2020

METHANE IN MASSIVE ICE ON THE CENTRAL AND WESTERN YAMAL AS INDICATOR OF THEIR ORIGIN

Dunaev A.V.¹, Kuziakin L.P.¹, Lupachev A.V.², Samokhvalov N.D.^{1,2}, Nikolaeva E.S.¹, Kazhukalo G.A.¹, Pryadilina A.V.¹, Naumov A.D.³

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science RAS, Pushchino, Russia

³JSC "Institute of Environmental Survey, Planning & Assessment", Moscow, Russia

As part of the field research, with the support of the Faculty of Geography at Lomonosov Moscow State University, JSC "IESPA", and the Arctic Research Center of the Yamal-Nenets autonomous district, six reservoirs of layered ice were studied during the summer field season of 2025 in the Bovanenkovskoye, Kruzenshternskoye, and Kharasaveyskoye gas fields of Central and Western Yamal. A cryolithological description of the reservoirs was conducted, and their structural features were established. Gas samples (air inclusions) were also collected from the ice using the equilibrium degassing method in the field (Headspace). The high concentrations of methane in the layer ice of Central Yamal (Bovanenkovo), with an average of 7.8 ml/kg, as well as their structure, which is closer to high-ice loam than to ice, indicate their in-situ origin, likely due to segregation during the initial freezing of water-saturated sediments. Ice deposits that open up in coastal cliffs on the Yamal coast can also be identified as subsurface deposits with high average methane content (0.65, 1.51 ml/kg), or as buried, at low values (0.13, 0.18, and 0.07 ml/kg).

Keywords: *massive ice beds, methane, paleogeography, Yamal peninsula, cryolithology*

REFERENCES:

- Baulin V.V., Belopukhova E.B., Dubikov G.I., Shmelev L.M. Geokriologicheskie usloviya Zapadno-Sibirskoi nuzmennosti [Geocryological Conditions of the West Siberian Lowland]. Moscow, Nauka, 1967, 214 p. (in Russian).
- Belova N. G. Stratified ice of the southwestern coast of the Kara Sea. MAKS Press, Moscow, 2014. 180 s. (in Russian).
- Butakov V.I., Slagoda 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). doi: 10.18799/24131830/2021/11/3082
- Vasiliev A.A., Melnikov V.P., Oblogov G.E., Streletskaya I.D. Methane in ground ice and frozen quaternary deposits of Western Yamal // Doklady Earth Sciences. 2015. Vol. 465. № 2. P. 1289-1292. doi: 10.1134/S1028334X15120168
- Vturin B.I. Podzemnye l'dy SSSR. Underground ice of the USSR. Moscow: Nauka, 1975: 214 p. (in Russian).
- Geocryology of the USSR. Western Siberia / edited by E.D. Ershov. Moscow: Nedra, 1989. 454 p. (in Russian).
- Kuziakin L.P., Maslakova A.A., Semenov P.B., Belova N.G., Vasil'chuk Y.K., Kil A.O. Methane in massive ice beds in Eastern Chukotka as an indicator of their origin // Ice and Snow. 2024. Vol. 64. Is. 3. P. 447-463. doi: 10.31857/S2076673424030106
- Oblogov G.E. Evolution of the Coastal and Shelf Cryolithozone of the Kara Sea in the Late Neogene-Holocene. Tyumen: Institute of the Earth's Cryosphere of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 2016. (in Russian).
- Oblogov G.E., Zadorozhnaya N.A., Vasilyev A.A., Streletskaya I.D., and Semenov P.B. Methane in Underground Ice and Frozen Quaternary Sediments in Northern Western Siberia // Cryosphere of the Earth. 2025. Vol. XXIX. No. 3. P. 31–44. doi: 10.15372/KZ20250304
- Yamal Peninsula (Engineering and Geological Essay) / Edited by V.T. Trofimov. Moscow: Moscow University Press, 1975. 280 p. (in Russian).
- The Nature of Yamal / V.N. Bolshakov, V.S. Balakhonov, V.D. Gromik et al. Yekaterinburg: Ural Publishing House Nauka, 1995. 435 p. (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 and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2023. Issue 10. P. 245-254. doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-245-254

Semenov P.B., Kil A.O., Shatrova E.V., Belova N.G., Levochkina O.V., Leibman M.O., Oblogov G.E., Khomutov A.V., Streletskaya I.D. Molecular characteristics of hydrocarbon gases and isotopic composition of methane in ground ice samples as a key to understanding the state of the methane cycle // Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2024. Issue 11. P. 581-587. doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-581-587

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 // Ice and snow. 2018. Vol. 58. Is. 1. P. 65-77. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-65-77

Cherbunina M.Y., Shmelev D.G., Krivenok L.A. The effect of degassing method of frozen soils on the test results of methane concentration // Engineering Geology. 2018. Vol. 13. Is. 3. P. 62-73. doi: 10.25296/1993-5056-2018-13-3-62-73

Alperin M.J., Reeburgh W.S. Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Applied and Environmental Microbiology. 1985. Vol. 50. P. 940-945. doi: 10.1128/aem.50.4.940-945.1985

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. doi: 10.1002/ppp.3430020210

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. Vol. 8. №. 6. P. 105. doi: 10.3390/atmos8060105.

Raynaud D. The integrity of the ice record of green-house gases with a special focus on atmospheric // Ice and Snow. 2012. Vol. Is. 2. P. 5-14. doi:10.15356/2076-6734-2012-2-5-14

Walz J., Knoblauch C., Tigges R., Opel T., Schirrmeister L., Pfeiffer E. M. Greenhouse gas production in degrading ice-rich permafrost deposits in northeastern Siberia // Biogeosciences. 2018. Vol. 15. №. 17. P. 5423-5436. doi: 10.5194/bg-15-5423-2018

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. doi: 10.5194/tc-14-1311-2020