



МЕТАН В ГОЛОЦЕНОВОМ ПОЛИГОНАЛЬНО-ЖИЛЬНОМ ЛЬДУ НИЖНЕГО ПРИОБЬЯ

✉ *Мартиросян М.О.¹, Кузякин Л.П.¹, Семёнов П.Б.², Киль А.О.²*

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

²ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

✉ *mo.martirosyan@mail.ru*

В 2024 и 2025 годах в районе города Лабытнанги были исследованы обнажения полигонально-жильных льдов, вскрытых в отложениях торфяника на II Каргинской террасе. Проведены полевые криолитологические описания залежей и отобраны пробы для лабораторных исследований. Проанализировано содержание метана в полигонально-жильном льду и вмещающих отложениях. Отмечено, что несмотря на положение вблизи южной границы распространения полигонально-жильных льдов, которые имеют признаки современного роста, наблюдаются элементарные жилки, вклинивающиеся в тело ПЖЛ. Однако, элементарные жилки формируются не каждый год и зависят от условий зимнего периода. Содержание метана во вмещающих торфах составляет до 1500 ppmv, в подстилающих высокольдистых суглинках – не превышает 50 ppmv. В самом ПЖЛ содержание метана варьирует от 250 до 20 ppmv и зависит от количества включений торфа непосредственно во льду: чем больше включений – тем выше содержание метана.

Ключевые слова: *многолетнемерзлые породы, подземные льды, Нижнее Приобье, метан, полигонально-жильные льды*

Введение. На данный момент образование полигонально-жильных льдов (ПЖЛ) исследовано достаточно хорошо (Втюрин, 1975; Романовский, 1977; Васильчук, 2006), однако некоторые моменты требуют уточнения. Темой для дискуссий является направление развития ПЖЛ – рост, стабилизация или деградация ПЖЛ, цикличность этого процесса. Также в рамках исследования глобального процесса климатических изменений вызывает интерес вклад ПЖЛ в эмиссию метана в атмосферу при их деградации. Широкое распространение ПЖЛ в криолитозоне, а также их близость к дневной поверхности позволяет использовать их как индикатор изменения климата в настоящем и в прошлом.

При морозобойном растрескивании грунта поверхностные воды образуют жильные структуры, замерзая в трещинах. Подобные структуры чаще всего возникают в тонкодисперсных, влагонасыщенных, органогенных грунтах: торфяных, иловатых, суглинистых, супесчаных. Песчаный грунт слабо подвержен морозобойному растрескиванию, как и галечниковые, щебнистые отложения [Баду, 2021].

Метан в полигонально-жильных льдах на севере Западной Сибири исследовался, как правило, совместно с иными объектами для оценки вклада ПЖЛ в эмиссию парниковых газов при деградации многолетнемерзлых пород [Чербунина и др., 2017; Стрелецкая и др., 2018; Облогов и др., 2025; Ko N. et al., 2025].

Цель исследования: определить состояние полигонально-жильных льдов на южном пределе их распространения в районе г. Лабытнанги и оценить содержание метана в самих льдах и вмещающих отложениях.

Методика исследования. В полевых условиях были описаны морфологические параметры обнажения: форма, размер ледяного тела, условия залегания, визуальные особенности льда, строение и состав вмещающих отложений.

При подробном рассмотрении льда описывалась ледяная структура и расположение пузырьков льда – с помощью поляризационного стекла (полароида). Особое внимание уделялось почвенному описанию вышележащих слоёв торфа – фиксировались цвет, плотность сложения и влажность, различные включения. Отбирались образцы на газовый

состав – содержание метана и его гомологов. Для выделения газовой компоненты использовался метод фазово-равновесной дегазации, он же «Headspace» [Alperin, 1985; Облогов, 2016].

В лабораторных условиях производилась обработка образцов, полученных из полигонально-жильного льда и вмещающих отложений. Анализ проб проводился на приборной базе ФГБУ «ВНИИОкеангеология» с использованием газового хроматографа Shimadzu GC 2014 с плазменно-ионизационным детектором (ПИД) и капиллярной колонкой Restek Rt-Alumina BOND/Na₂SO₄ (40 м). В качестве газа-носителя использовался гелий при скорости потока 25 мл/мин. Для калибровки приборов использовалась сертифицированная газовая смесь (ГЭТ 154-2001), включающая 11 углеводородных газов (метан, этан, этилен, пропан, пропилен, i-бутан, n-бутан, бутен-1+i-бутилен, i-пентан, n-пентан). Погрешность газохроматографических измерений не превышает ±2.5%.

Территория исследования. Территория г. Лабытнанги характеризуется морским субарктическим и климатом с продолжительными (до 210 дней) суровыми зимами (средняя температура января может достигать до –27° С) и прохладным (средняя температура июля 8-13° С) коротким летом (до 68 дней). Устойчивый морозный период продолжается 200-210 дней в году. Годовое количество атмосферных осадков составляет 250–280 мм [Геокриология СССР, 1989]. Распространение многолетнемёрзлых пород – прерывистое. Вертикальное строение многолетнемёрзлых пород – двухслойное: выделяется нижний горизонт реликтовой мерзлоты и верхний горизонт современных мёрзлых пород. Среднегодовая температура пород: –1,5...–0,5°С (без учёта талых участков). Глубина протаивания варьирует от 2,0 м и более на незадернованных песках, до 0,4-0,5 м на торфяниках [Геокриология СССР, 1989].

Описываемый разрез находится в пределах полигонального торфяника II Каргинской террасы, в отвершке термоэрозионного оврага, который открывается в термокарстовое озеро Лев-то (рис. 1,2). Система полигонально-жильных льдов отмечается практически повсеместно, что связано как с особенностями органогенных отложений, благоприятствующих морозобойному растрескиванию, так и с возвышенным положением торфяника и незначительным снежным покровом на нём. Поверхность хорошо дренированная, здесь была отмечена растительность мохово-лишайникового, кустарничкового и кустарникового ярусов: ягель (*Cetraria islandica* (L.) Ach.), багульник (*Ledum palustre* L.), пушица влагалищная (*Eriophorum vaginatum* L.), морошка (*Rubus chamaemorus* L.), карликовая берёза (*Betula nana* L.).



Рис. 1. Термокарстовое озеро Лев-то.

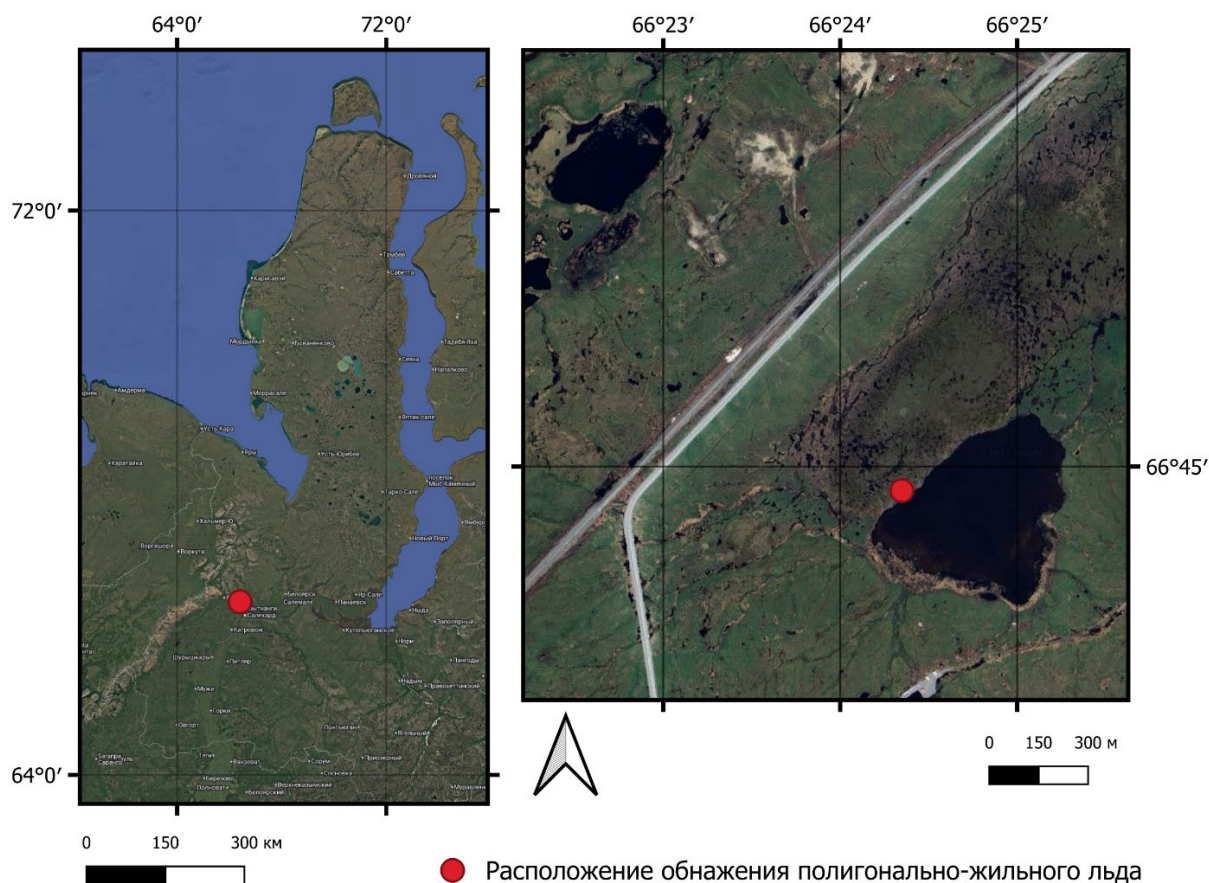


Рис. 2. Положение обнажения полигонально-жильного льда в 8 км к северу от г. Лабытнанги.

Вероятно, термокарстовое озеро вблизи найденной жилы образовалось вследствие протаивания подземных льдов. Полигонально-жильные льды на торфянике формируются в весенний период из талых снеговых вод, просачивающихся в почву [Чинова и др., 2025], так как среднегодовая высота снежного покрова в районе Лабытнанги составляет около 0,5 м, а превышение торфяника над уровнем озера на 2,5 м позволяет утверждать об отсутствии вклада озёрных вод в формирование ПЖЛ.

Результаты наблюдений. Обнажения полигонально-жильных льдов, исследованные в 2024 и 2025 годах достаточно похожи (рис. 3). Оба раза они были вскрыты в термоэрозионных оврагах, примыкающих к термокарстовому озеру. Днище термоэрозионного оврага, в тыловой части которого вскрывается ПЖЛ, заполнено водой из-за протаивания жилы. Высота зачищенной части разреза составляет 120 см (и в 2024 и в 2025 гг). Нижняя часть жилы находится под водой и, вероятно, протаяла. Строение зачищенного разреза можно представить следующим образом. Первые 3 см – тундровая подушка, представленная травянистыми и кустарничковыми растениями, ягелем. Первый горизонт: слаборазложившийся светло-бурый торф с корнями растений диаметром до 3 см, влажный. Ниже залегает среднеразложившийся торф цветом темнее предыдущего. Тёмно-бурый торф залегает на глубинах 30-45 см, мокрый, размер корней современных растений в диаметре уменьшается до 1 см. Граница между слоями неровная, подчеркивается структурными различиями и цветом. Граница сезонно-талого слоя на поверхности рассматриваемого разреза варьируется от 45 до 60 см.

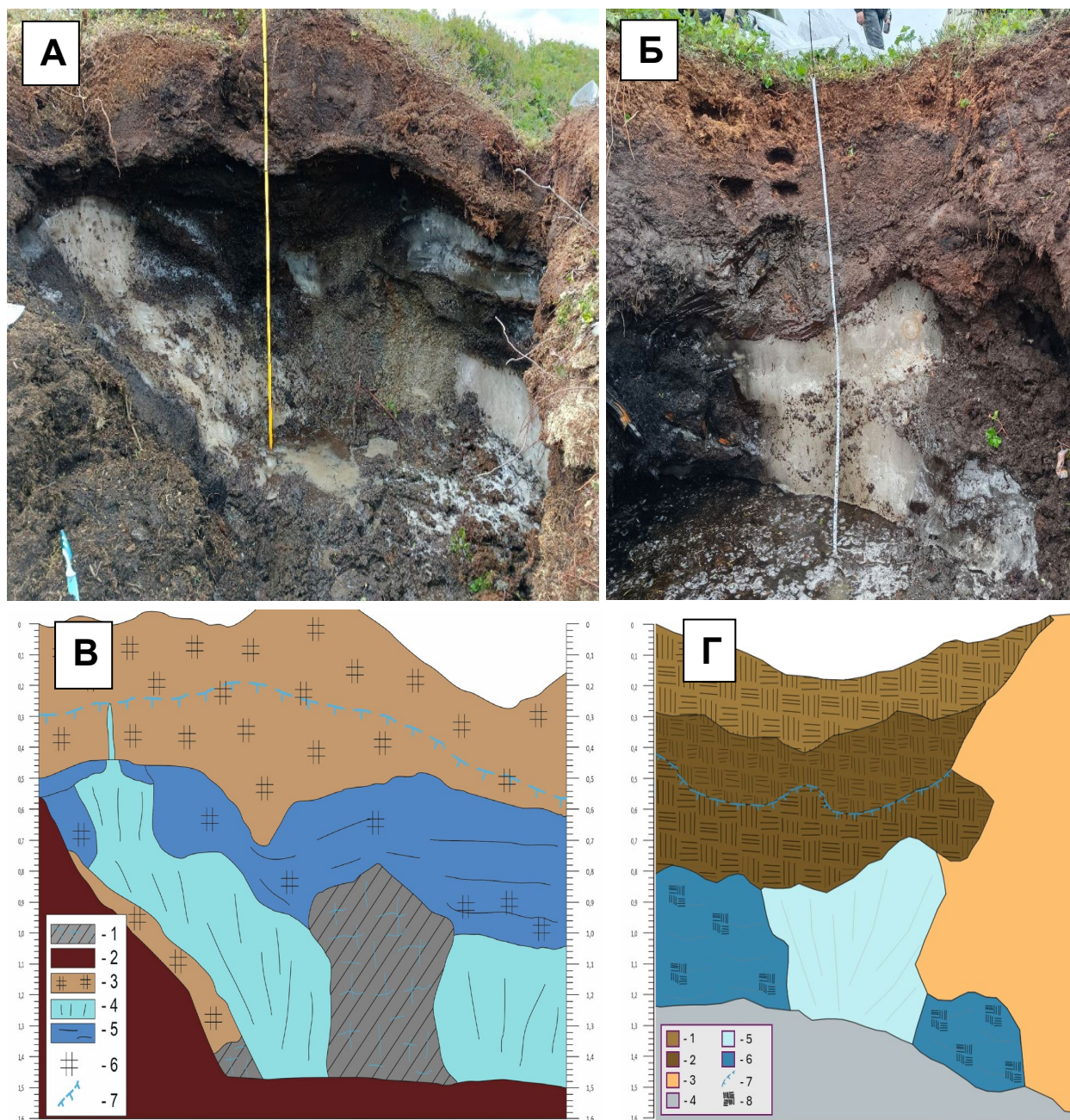


Рис. 3. Разрез полигонально-жильного льда: **А** – фото жили, опробованной в 2024 году, **Б** – фото жили, опробованной в 2025 году. **В** – геокриологический разрез жили, опробованной в 2024 году (Чижова и др, 2025). 1 – серые высокольдистые суглинки; 2 – оплывные и осыпные отложения; 3 – торф от слабой до средней степени разложения; 4 – повторно-жильный лёд; 5 – термокарстово-пещерный лёд; 6 – включения торфа; 7 – граница слоя протаивания (июль 2024). **Г** – геокриологический разрез жили, опробованной в 2025 году. 1 – слаборазложившийся торф, 2 – среднеразложившийся торф, 3 – осыпные отложения, 4 – затопленное днище оврага, 5 – повторно-жильный лёд, 6 – термокарстово-пещерный лёд, 7 – граница слоя протаивания (июль 2025), 8 – включения торфа.

Мёрзлый слой, вероятно нижняя часть сезонно-талого слоя, состоит из среднеразложившегося тёмно-бурого торфа с редкими включениями тонких корней растений, которыми отделяется неровная граница с ПЖЛ. Подошва слоя проходит на глубине 80 см. Кровля жили имеет чёткий контакт с перекрывающим торфом и неровную сглаженную форму. Лёд белого цвета, непрозрачный, мутноватый в связи с содержанием субвертикально ориентированных пузырьков воздуха и вкраплений торфа с массивной криотекстурой. Сбоку с обеих сторон находится термокарстово-пещерный лёд,

отличающийся серо-чёрным цветом, большим содержанием торфа, более крупным размером кристаллов льда, у которого слоистость слабо выражена.

По краям от повторно-жильного льда торф замещается термокарстово-пещерным льдом, который сформировался в периоды деградации полигонально-жильной системы. Термокарстово-пещерный лёд характеризуется более крупными кристаллами, темным цветом, горизонтальной слоистостью, включением большого количества торфа. На фотографиях он выглядит как мёрзлый торф, однако, при физическом воздействии заметно, что доля льда значительно больше доли торфяных частиц.

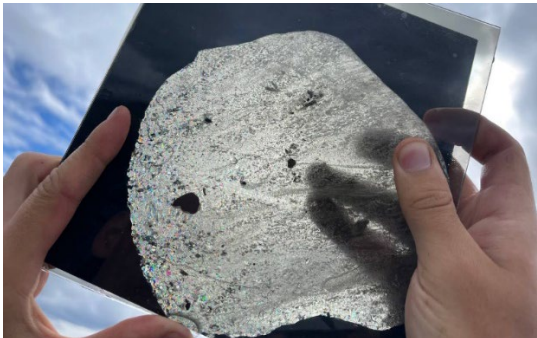

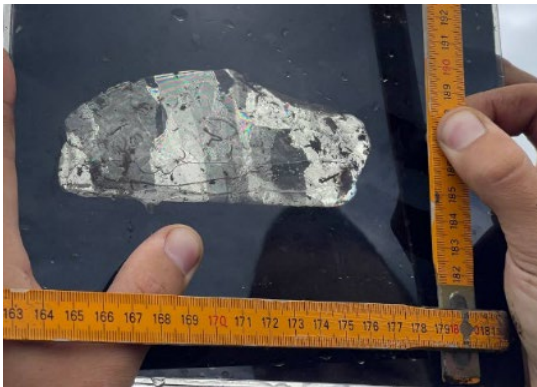
В 2024 году в обнажении с ПЖЛ, а также в целом в пределах рассматриваемого торфяника были обнаружены элементарные жилки (рис. 4), которые прослеживались даже в сезонно-талом слое (непосредственно под тальми грунтами в середине июля). Данный факт свидетельствует о продолжающемся современном росте ПЖЛ в районе Лабытнанги, даже несмотря на климатические изменения. Вероятно, это связано с благоприятным геоморфологическим положением торфяника на относительно возвышенной поверхности, с которой в зимний период сдувается снег, из-за чего возможен процесс морозобойного растрескивания даже в относительно мягкие зимы.



Рис. 4. Элементарная жилка над оголовком голоценового полигонально-жильного льда в районе г. Лабытнанги

Из жилы льда 2024 года были отобраны образцы для кристаллографического описания – было выделено четыре структурных типа (таблица 1).

Таблица 1. Кристаллографическое описание льда

№ образца	Глубина отбора, см	Описание	Фото
1	123-150	Мелкие кристаллы (1-3 мм), большое количество включений пузырьков воздуха, диаметром до 1 см. Включения органики диаметром до 1-2 мм. Субвертикальная слоистость. Повторно-жильный лед.	
2	52-70	Крупные кристаллы льда (5-6 см), практически весь образце – 1 кристалл льда. Пузырьки воздуха между кристаллами (округлые). Термокарстово-пещерный лед.	
3	80-110	Большие, вертикально вытянутые кристаллы льда (3-4 см). Кристаллы вытянуты по вертикальной оси. Включения пузырьков воздуха встречаются очень редко. Термокарстово-пещерный лёд.	
4	110-123	Мелкие кристаллы (1-3 мм), Большое количество включений пузырьков воздуха, диаметром до 1 см. Включения органики диаметром до 1-2 мм. Повторно-жильный лед	

На глубине около 1,0 м в термокарстово-пещерном льду были обнаружены крупные корни *Larix Sibirica*, диаметром до 5 см (рис. 5). Можно предположить, что данная растительность имеет возраст голоценового оптимума, в период которого происходила деградация ПЖЛ, увеличилась глубина протаивания и появился древесный ярус в растительном сообществе. Впоследствии, при похолодании, на месте частично растаявшего ПЖЛ сформировался термокарстово-пещерный лёд. Таким образом, можно предположить, что описанная часть жилы, зажата между термокарстово-пещерным льдом, начала формироваться не ранее 5-6 тыс. л.н., а нижняя часть ПЖЛ, раннеголоценовая, не вскрыта.

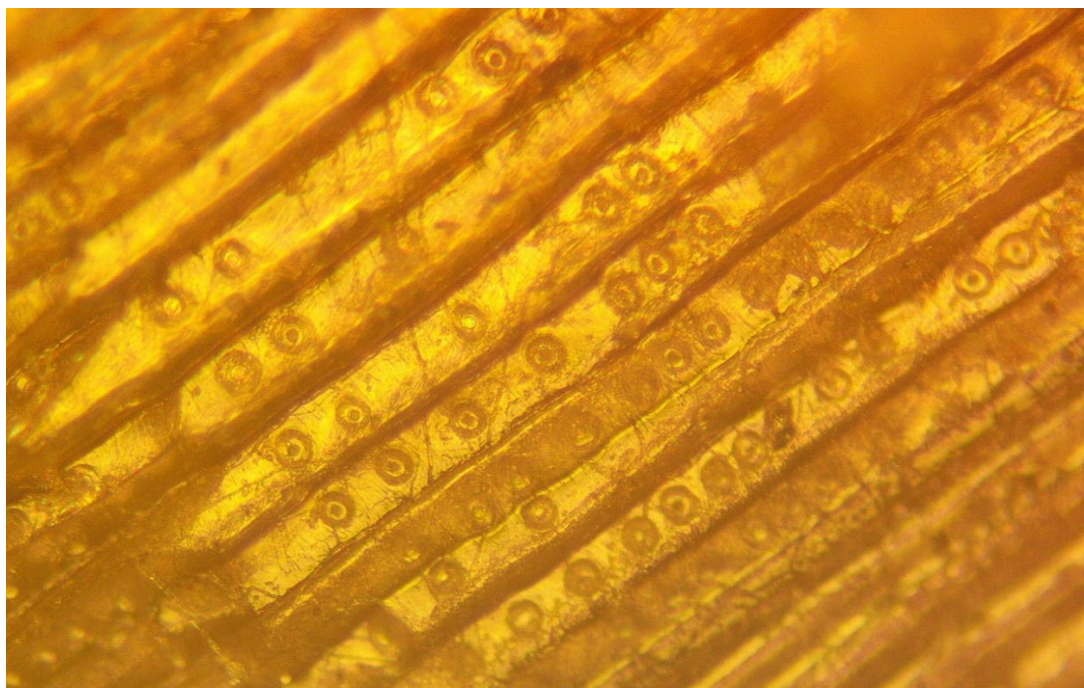


Рис. 5. Древесина рода *Larix*. Радиальный срез. Однорядные поры трахеид. Увеличение микроскопом 200х (снимок Куприянова Д.А.).

Оценка содержания метана в подземных льдах помогает сделать выводы о характере промерзания. Концентрация метана сохраняется в жилах и в порах слагающих пород из-за низкой способности к миграции газов в анаэробных условиях. Содержание органики в отложениях напрямую влияет на концентрацию CH_4 и его гомологов – в торфяниках потенциал для образования метана увеличивается. Это является наиболее вероятным объяснением для образца, отобранного в торфе: концентрация метана составляет 1401,26 ppmv.

Содержание метана в жилах льда имеет большую вариативность – это видно на представленном графике (рис. 6). Концентрация метана в полигонально-жильном льду колеблется от 20,89 до 247,26 ppmv. Отмечается скудное содержание метана в жилах голоценового времени, характеризующегося более суровым климатом – что может объяснять меньшее содержание газа в верхних слоях ледяных клиньев, вероятно образовавшихся после голоценового оптимума [Задорожная, 2023].

Термокарстово-пещерный лёд имеет более молодой возраст, в сравнении с основным ледяным телом ПЖЛ. В таком льду большое количество органических и грунтовых включений. Структура воздушных прослоек практически отсутствует, то есть воздушное пространство для сохранения концентрации метана меньше.

Строение залежи позволяет предположить, что полигонально-жильный лёд в районе рассматриваемого полигонального торфяника находится на стадии стабилизации. Опираясь на схему последовательного развития ПЖЛ [Kanevsky *et al.*, 2021] - её цикличной деградации и роста - можно сделать предположение, что жила, образовавшаяся в эпоху раннего голоцена, дошла до стадии прогрессирующей деградации.

При морозобойном растрескивании поверхности в эпоху голоценового оптимума образовались ложбины, заполнившиеся водой. Трещины дошли до самой жилы и в дальнейшем образовался термокарстово-пещерный лёд, в зоне контакта с ледяными клиньями, они же ПЖЛ. В дальнейшем при попадании торфа и органогенных, почвенных осадков, между слоями образовывается слой термокарстово-пещерного льда чёрного цвета, который можно видеть на представленной ранее фотографии на периферии белой ПЖЛ (см. рис. 3А). На стадии продвинутой стабилизации образуются новые ледяные клинья, а трещины заполняются торфом и илом. Таким образом, его вытаивание в настоящий момент скорее является исключением для торфяника, объясняемым близостью

разреза к отепляющим водам прилежащего термокарстового озера и нахождении в открытом растущем овраге. Поэтому сейчас жила находится на стадии стабилизации.

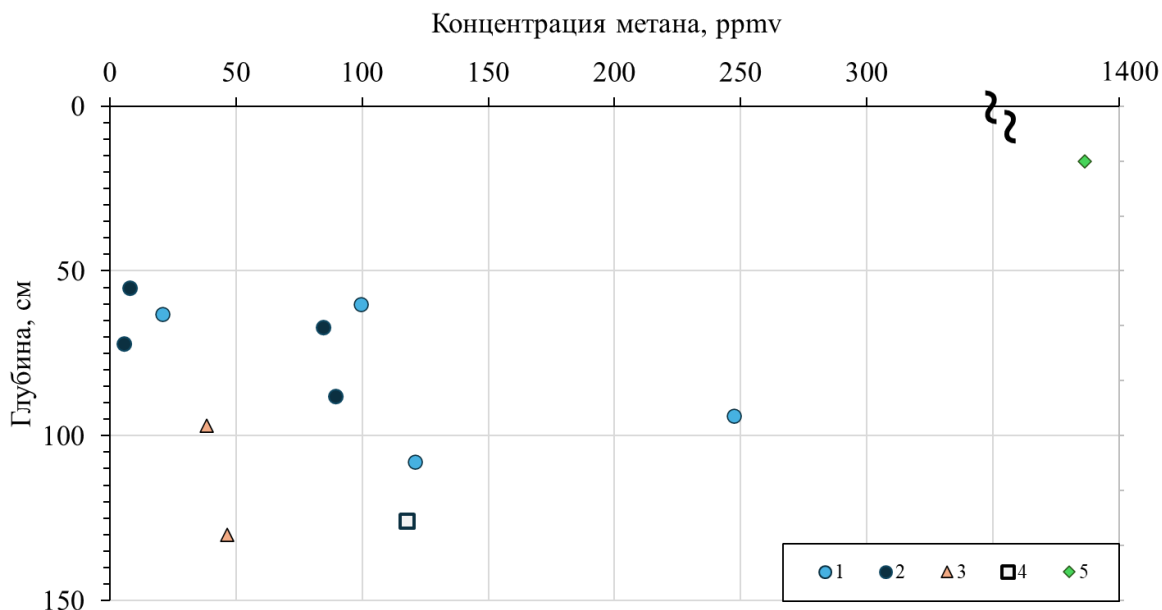


Рис. 6. Содержание метана в обнажении полигонально-жильного льда; образцы, отобранные: в 1 – полигонально-жильном льду, 2 – термокарстово-пещерном льду, 3 – высокольдистом суглинке, 4 – осыпных и оплывных отложениях, 5 – торфе.

Заключение. По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1) В районе города Лабытнанги в настоящее время в благоприятных геоморфологических условиях может продолжаться рост полигонально-жильных льдов, несмотря на общее изменение климатических условий и увеличение температуры зимнего периода.

2) Рассмотренные ПЖЛ являются сингенетическими по отношению к торфу и эпигенетическими по отношению к подстилающим суглинкам.

3) Криолитологическое строение ПЖЛ свидетельствует об их сложном развитии и нескольких стадиях деградации, последняя из которых произошла относительно недавно, в 21 веке.

4) Наибольшее содержание метана фиксируется в торфе (около 1500 ppmv). В ПЖЛ содержание метана варьирует от 250 до 20 ppmv и зависит от количества торфяных включений. Нижележащие суглинки обеднены метаном (менее 50 ppmv), что может быть связано с их субаэральным происхождением, либо с их протаиванием и эмиссией метана.

Отложения рассмотренного разреза были отобраны на последующее определение изотопного состава, результаты которого позволят подкрепить анализ газовой компоненты и сделать выводы о достоверном механизме и подтвердить время образования полигонально-жильного льда – верхняя часть ледяных клиньев в эпоху раннего голоцена, дальнейшее протаивание во время голоценового оптимума и образование верхней части после 6 тыс. лет.

Исследование проведено в рамках ГЗ «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» № 121051100164 и при поддержке РНФ (грант № 23-27-00123). Авторы благодарят А.В. Дунаева и З.М. Рогову за помощь в опробации и обработке материалов.

ЛИТЕРАТУРА

- Баду Ю.Б. Криолитогенез. Признаки и призраки криолитосферы. М: Изд-во Моск. Ун-та, 2021. 367 с.
- Васильчук Ю.К. Повторно-жильные льды: гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность. М.: Изд-во Моск. Ун-та., 2006. 404 с.
- Васильчук Ю.К. Парагенетические ансамбли повторно-жильных льдов со льдами различного генезиса // Арктика и Антарктика. 2018. № 2. С. 71-112. doi: 10.7256/2453-8922.2018.2.26673
- Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М.: «Наука», 1975. 215 с.
- Облогов Г.Е. Эволюция криолитозоны побережья и шельфа Карского моря в позднем неоплейстоцене-голоцене. Дисс. Канд. геол.-мин. наук. Тюмень: Ин-т криосферы Земли СО РАН, 2016. 197 с.
- Облогов Г.Е., Задорожная Н.А., Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Семёнов П.Б. Метан в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях севера Западной Сибири, Тюмень // Криосфера Земли. 2025. Т. 29. №. 3. с. 31-44. doi: 10.15372/KZ20250304
- Романовский Н.Н. Формирование полигонально-жильных структур, Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1977. 212 с.
- 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
- Чебурнина М.Ю., Шмелев Д.Г., Брушков А.В., Казанцев В.С., Аргунов Р.Н. Закономерности распределения метана в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород Центральной Якутии // Вестник Московского университета, Серия 4. Геология. 2017. №. 6. С. 105-112. doi: 10.33623/0579-9406-2017-6-105-112
- Чижова Ю.Н., Кузякин Л.П., Васильчук Ю.К., Рогова З.М., Дунаев А.В. Изотопные характеристики ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) повторно-жильных льдов у южной границы распространения вблизи города Лабытнанги // Лёд и снег. 2025. №3. (в печати).
- Alperin M.J., Reeburgh W.S. Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Applied Environmental Microbiology. 1985. Vol. 50. Is. 4. P. 940-945. doi: 10.1128/aem.50.4.940-945.1985
- Kanevskiy M., Shur Yu., Jorgenson T., Brown D.R.N., Moskalenko N., Browne J., Walker D.A., Reynolds M.K., Buchhorn M. Degradation and stabilization of ice wedges: Implications for assessing risk of thermokarst in northern Alaska // Geomorphology. 2017. Vol. 297. P. 20-42. doi: 10.1016/j.geomorph.2017.09.001
- Ko N., Park H., Kim J., Fedorov N., Iwahana G., Fedorov A. et al. Mechanism of Ice Wedge Formation and Mixed Origin of Trapped Greenhouse Gases in Zyryanka Permafrost, Northeastern Siberia // Permafrost and Periglacial Processes. 2025. doi: 10.1002/ppp.70012

METHANE IN THE HOLOCENE POLYGONAL ICE WEDGES OF THE LOWER OB REGION

Martirosyan M.O.¹, Kuzyakin L.P.¹, Semenov P.B.², Kil A.O.²

¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

²VNIIOkeangeologia, St. Petersburg, Russia

In 2024 and 2025, exposures of ice wedges exposed in the sediments of the peat on the II Karginsky terrace were investigated in the area of the city of Labytnangi. Field cryolithological descriptions of the deposits were carried out and samples were selected for laboratory studies. The methane content in ice wedges and host sediments is analyzed. It is noted that despite the position near the southern boundary of the distribution of ice wedges, which have signs of modern growth: elementary veins are observed wedging into the body of the ice wedges. However, elementary veins do not form every year and depend on the conditions of the winter period. The methane content in the

host peats is up to 1,500 ppmv, and in the underlying high-clay loams it does not exceed 50 ppmv. In the IW itself, the methane content varies from 250 to 20 ppmv and depends on the number of peat inclusions directly in the ice: the more inclusions, the higher the methane content.

Keywords: *permafrost rocks, ground ice, Lower Ob region, methane, ice wedges*

REFERENCES:

- Badu Yu.B.* Cryolithogenesis. Signs and Ghosts of the Cryolithosphere. Moscow: Moscow University Press. 2021. 367 p. (in Russian).
- Vasilchuk Yu.K.* Polygonal ice: heterocyclicity, heterochronicity, heterogeneity. Moscow: Moscow University Press. 2006. 404 p. (in Russian).
- Vasilchuk Yu.K.* Paragenetic ensembles of polygonal ice with ice of various genesis // Arctic and Antarctic. 2018. № 2. P. 71-112. doi: 10.7256/2453-8922.2018.2.26673
- Vtyurin B.I.* Underground ice of the USSR, Moscow: Nauka Publ., 1975, 215 p. (in Russian).
- Oblogov G.E.* Evolution of the permafrost zone of the coast and shelf of the Kara Sea in the late Neopleistocene-Holocene. Diss. Cand. of Geological and Mineral Sciences. Tyumen: Institute of Earth Cryosphere SB RAS, 2016. 197 p. (in Russian).
- Oblogov G.E., Zadorozhnaya N.A., Vasiliev A.A., Streletskaya I.D., Semenov P.B.* Methane in underground ice and frozen quaternary sediments of the north of Western Siberia, Tyumen // Cryosphere of the Earth. 2025. Vol. 29. No. 3. P. 31-44. doi: 10.15372/KZ20250304
- Romanovsky N.N.* Formation of polygonal vein structures, Novosibirsk: Nauka, Siberian Branch, 1977. 212 p. (in Russian).
- Streletskaya I.D., Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Semenov P.B., Vanstein 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. No. 1. P. 65-77. doi: 10.15356/2076-6734-2018-1-65-77
- Cheburnina M.Yu., Shmelev D.G., Brushkov A.V., Kazantsev V.S., Argunov R.N.* Patterns of methane distribution in the upper horizons of permafrost rocks of Central Yakutia // Bulletin of the Moscow University, Series 4. Geology. 2017. No. 6. P. 105-112. doi: 10.33623/0579-9406-2017-6-105-112
- Chizhova Yu.N., Kuzyakin L.P., Vasilchuk Yu.K., Rogova Z.M., Dunaev A.V.* Isotopic characteristics ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) of polygonal ice near the southern distribution boundary near the city of Labytnangi // Ice and snow. 2025. №3. (predprint)
- Alperin M.J., Reeburgh W.S.* Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Applied Environmental Microbiology. 1985. Vol. 50. Is. 4. P. 940-945. doi: 10.1128/aem.50.4.940-945.1985
- Kanevskiy M., Shur Yu., Jorgenson T., Brown D.R.N., Moskalenko N., Browne J., Walker D.A., Reynolds M.K., Buchhorn M.* Degradation and stabilization of ice wedges: Implications for assessing risk of thermokarst in northern Alaska // Geomorphology. 2017. Vol. 297. P. 20-42. doi: 10.1016/j.geomorph.2017.09.001
- Ko N., Park H., Kim J., Fedorov N., Iwahana G., Fedorov A. et al.* Mechanism of Ice Wedge Formation and Mixed Origin of Trapped Greenhouse Gases in Zyryanka Permafrost, Northeastern Siberia // Permafrost and Periglacial Processes. 2025. doi: 10.1002/ppp.70012