

ИССЛЕДОВАНИЯ ЧЕТВЕРТИЧНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ И ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ ЦЕНТРАЛЬНОГО ЯМАЛА

^{1,2}Письменюк А.А., ²Семенов П.Б., ¹Тарасевич И.И., ^{3,4}Лейбман М.О., ³Бабкин Е.М.,
⁴Нестерова Н.Б., ²Мальшиев С.А., ¹Стрелецкая И.Д., ²Шатрова Е.В., ^{3,4}Хомутов А.В.

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия; apismeniuk@gmail.com

² ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

³ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, Тюмень, Россия

⁴ Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

В ходе экспедиционных работ на Центральном Ямале (НИС «Васькины Дачи») были исследованы обнажения подземных льдов и вмещающих отложений в стенках термоцирков. Верхняя часть разреза четвертичных отложений Центрального Ямала состоит из двух пачек: нижняя – морская, верхняя – континентальная. На границе пачек, на разных абсолютных отметках (от 19 до 23 м) находится кровля полосчатого пластового льда. Континентальная пачка включает ледяные жилы разного возраста.

Ключевые слова: *Западная Сибирь, пластовый лед, полигонально-жильный лед, метан, растворенное органическое вещество, изотопный состав метана*

Распространение подземных льдов определяет криолитологические условия развития рельефообразующих криогенных процессов. В отличие от полигонально-жильных льдов (ПЖЛ), пластовые льды непосредственно не выражены в рельефе и ландшафтах, то есть не дешифрируются на аэрофото- и космоснимках. Необходимо найти индикаторы, которые позволят с большей или меньшей точностью их картографировать. Такими индикаторами могут служить геоморфологические уровни, для которых необходимо установить закономерности залегания пластовых льдов в их геологических (криолитологических) разрезах. Верификация индикаторов осуществляется на хорошо описанных и датированных в поле обнажениях. При этом необходимы данные о возрасте различных горизонтов пород, времени формирования в них подземных льдов и механизмов формирования самих льдов.

Установление генезиса пластовых льдов имеет решающее значение для четвертичной геологии Западной Сибири, поскольку существуют взаимоисключающие точки зрения на их происхождение. Палеогеографические условия формирования подземных льдов и вмещающих пород реконструируются с использованием комплекса геохимических методов. Особое внимание в аналитических исследованиях уделяется органо-геохимическим параметрам и газовому составу подземных льдов, фиксирующих биогеохимическую обстановку промерзания, которая, в свою очередь, обусловлена палеогеографией региона в позднем плейстоцене.

Другое не менее важное направление наших исследований связано с актуальностью изучения цикла углерода и эмиссии парниковых газов в криолитозоне. Залежеобразующие подземные льды являются резервуаром захороненного органического вещества, которое при разрушении мерзлых пород попадает в атмосферу и гидросферу. В результате мобилизации «дополнительной» порции углерода в современный биогеохимический цикл возникает избыток концентрации в атмосфере парниковых газов, что может способствовать реализации принципа положительной обратной связи [Schuur et al., 2015]. Изучение пула лабильного углерода и парниковых газов в составе подземных льдов основано на детальном анализе состава растворенного органического вещества (РОВ), ключевых биогеохимических параметров цикла углерода и азота.

Полевые работы, включающие детальное описание и отбор монолитов подземного льда для биогеохимических исследований, проводилось в августе 2021 года на обнажениях термоцирков в районе научно-исследовательского стационара «Васькины Дачи» (Центральный Ямал), который расположен в 30 км к юго-востоку от Бованенковского НГКМ (Рис. 1). С

геоморфологической точки зрения участок представляет собой холмисто-увалистую равнину с узкими водораздельными поверхностями и длинными пологими склонами. К наибольшим высотам (до 58 м) приурочены вершины останцов салехардской равнины, наименьшие – к поверхностям пойм рек Мордыяха и Сеяха, а также к днищам термоцирков и озерных котловин. Разрезы разных уровней рельефа представлены морскими, озёрными и аллювиальными отложениями позднего плейстоцена каргинского (на высотах 10-20 м) и докаргинского (на высотах 20-35 м) времени, ниже залегают морские отложения казанцевского ($mQIII_1$) и салехардского ($mQII_{2-4}$) возраста на высотах 35-45 и 45-58 м соответственно.

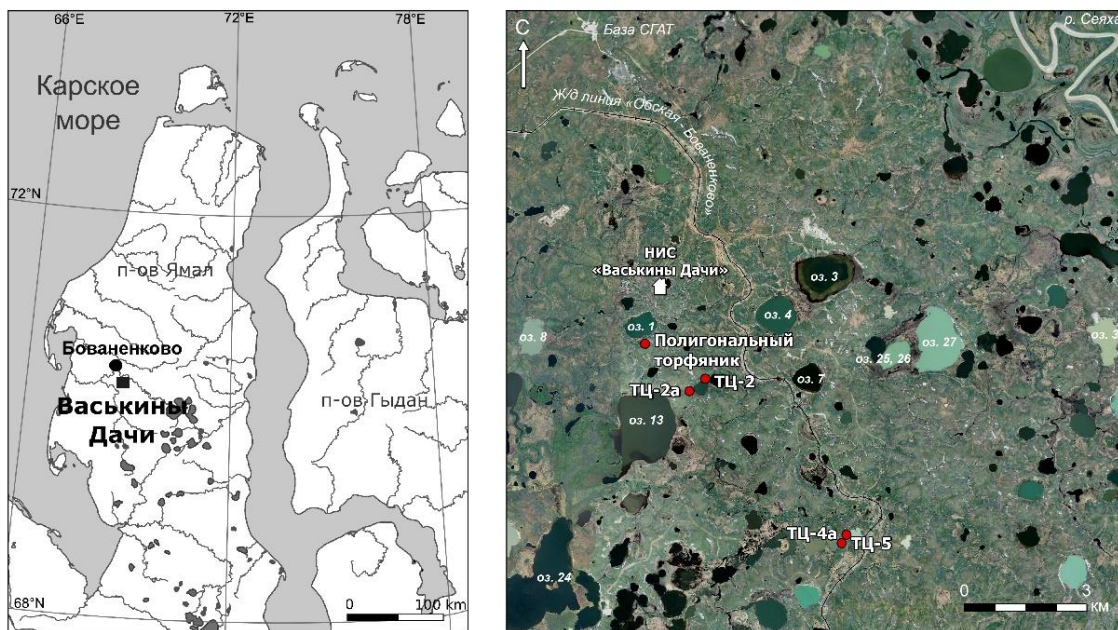


Рис. 1. Район исследования.

В полевой сезон 2021 года были исследованы три обнажения в стенках термоцирков, а также пройден шурф на полигональном торфянике. В стенке термоцирка ТЦ-2а (рис. 1) (Н абс. бровки 21 м, Н абс. озера 13,7 м) была вскрыта залежь пластового льда на глубине 1,9 м от бровки (Н абс. 19,1м). Пластовый лед – полосчатый, представлен переслаиванием прозрачного льда с песчано-супесчаной льдонасыщенной терригенной фракцией темно-серого цвета. Сверху лед перекрыт светло-серыми мелкозернистыми песками, переслаивающимися с темно-серыми супесями, присутствуют прослой суглинков.

Термоцирк ТЦ-4а (рис. 1) имеет абсолютные высоты – 24,5 - 26 м у бровки и 12,5 м у озера. В стенке ТЦ-4а на глубине 1,8 м (Н абс. 23,2 м) от бровки обнажается пластовый лед. Лед прозрачный, с включениями воздуха, гнездами и прослоями песка, сверху перекрыт песчано-супесчаной толщей с отдельными гнездами торфа на глубинах 0,85-1,15 м. В восточной части, на верхнем контакте пластовой залежи, в стенке обнажается галечный горизонт с размером гальки до 1 см.

Для термоцирка ТЦ-5 (рис. 1) характерны наибольшие перепады высот – от 22-25 м у бровки до 3 м у озера. Относительная высота стенки изменяется в широких пределах от 3 до 7 м. Полосчатый пластовый лед вскрывается на глубине 3,0 м (Н абс. 22 м) от бровки. Сверху перекрыт сильнольдистыми серыми суглинками. Толщу пластового льда рассекает ПЖЛ видимой высотой 3,5 м, шириной в верхней части 0,7 м. Толща над пластовым льдом песчано-супесчаная, западнее основной расчистки над льдом обнажается толща переслаивающихся суглинков и торфяных прослоев, которая выклинивается к ПЖЛ.

Верхняя часть четвертичного разреза стенок термоцирков Центрального Ямала состоит из двух пачек: нижняя – морская, верхняя континентальная. На границе находится полосчатый

пластовый лед. Верхний контакт пластового льда местами маркируется присутствием галек или галечного горизонта. Толща континентальных отложений включает дельтовые, русловые, озерные и склоновые фации. ПЖЛ, рассекающая залежь пластового льда, учитывая положение в разрезе и ее размеры, имеет позднеплейстоценовый возраст.

Планируя геохимические исследования, мы сконцентрировались на параметрах наиболее информативных для определения генезиса пластового льда и характеристики обстановки промерзания. В частности, на содержании и изотопном составе метана, молекулярном составе газовой составляющей, ионном и изотопном составе талой воды, а также фракционном составе растворенного органического вещества. Эти же методы и подходы задействованы для изучения цикла углерода с точки зрения эмиссии парниковых газов при разрушении мерзлых пород, в том числе подземных льдов.

В настоящий момент данные по газовому составу подземных льдов фрагментарны и требуют существенной детализации. Подземные льды п-ова Ямал характеризуются существенными вариациями содержания газов и изотопного состава метана [Streletskaya et al., 2018; Dvornikov et al., 2017]. В частности, недавние исследования [Semenov et al., 2020] показали в отдельных образцах пластового льда (термоцирка ТЦ 2 (Рис. 1), Центральный Ямал) локальное обогащение метаном с пониженными значениями изотопных сигнатур как углерода ($\delta^{13}\text{C}$), так и водорода (δD) ($\delta^{13}\text{C} < -80\text{‰}$, $\delta\text{D} < -390\text{‰}$). Это может свидетельствовать о вкладе метаногенеза, сформировавшегося в криогенных условиях в микрониахах несвязанной влаги [Rivkina et al., 2007]. В целом, существенное разнообразие значений стабильных изотопов углерода и водорода в метане указывает на многообразие обстановок метаногенеза, отражающих различные локальные биогеохимические условия на время промерзания, а также вторичные процессы, обусловленные транспортом метана и криогенным метаногенезом.

Состав РОВ отражает обстановку промерзания или специфику процессов, которые происходят в различных объектах криосферы, в том числе в подземных льдах (палеофлора, гидрологические условия и палеоклимат). Например, наши недавние исследования образцов подземных льдов п-ова Ямал показали в составе РОВ как биохимически устойчивые гуминовые кислоты и фульвокислоты, продуцируемые наземной растительностью, так и биодоступные формы РОВ (белки, аминокислоты), связанные с локальной активностью микробиоты (автохтонное РОВ) [Semenov et al., 2020]. По соотношению высоко- и низкомолекулярных форм белкового РОВ, а также по специфике его взаимоотношений с активными формами растворенного азота, дискриминируются обстановки формирования разных генетических типов подземных льдов.

Исследование выполнено в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» и ГЗ «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» № 121051100164, а также ГЗ «Изучение формирования, структуры, изменчивости и прогнозирование состояния криосферы, в том числе многолетнемерзлых толщ и криогенных ландшафтов» № 121041600042-7.

ЛИТЕРАТУРА

- Dvornikov Y.A., Leibman M.O., Heim B., Khomutov A.V., Roessler S., Gubarkov A.A. Thermodenudation on Yamal peninsula as a source of the dissolved organic matter increase in thaw lakes // *Earth's Cryosphere*. 2017. Vol. 21. P. 28–37. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2017-2(33-42)
- Rivkina E., Shcherbakova V., Laurinavichius K., Petrovskaya L., Krivushin K., Kraev G., Pecheritsina S., Gilichinsky D. Biogeochemistry of methane and methanogenic archaea in permafrost // *FEMS Microbiol. Ecol.* 2007. Vol. 61. P. 1–15. doi:10.1111/j.1574-6941.2007.00315.x
- Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C. et al. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. Vol. 520. P. 171–179, doi:10.1038/nature14338
- 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. Vol. 10, 450. doi:10.3390/geosciences10110450

Streletskaya I.D., Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Streletskiy D.A. Methane Content in Ground Ice and Sediments of the Kara Sea Coast // *Geosciences*. 2018 Vol. 8, 434. doi:10.3390/geosciences8120434

RESEARCH OF QUATERNARY SEDIMENTS AND GROUND ICE IN CENTRAL YAMAL

^{1,2}*Pismeniuk A.A.,* ²*Semenov P.B.,* ¹*Tarasevich I.I.,* ^{3,4}*Leibman M.O.,* ³*Babkin E.M.,* ⁴*Nesterova N.B.,* ²*Malyshev S.A.,* ¹*Streletskaya I.D.,* ²*Shatrova E.V.,* ^{3,4}*Khomutov A.V*

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; apismeniuk@gmail.com

² VNIIOkeangeologia, Saint-Petersburg, Russia

³ Earth Cryosphere Institute Tyumen Scientific Centre SB RAS, Tyumen, Russia

⁴ University of Tyumen, Tyumen, Russia

During the fieldwork in Central Yamal (Vaskiny Dachi Research station), exposures of ground ice and enclosing frozen deposits within the thermocirque walls were under study. The upper part of the Quaternary section consists of two units: the lower one being of the marine, and the upper one being of the continental origin. In the interface, at different absolute elevations (from 19 to 25 m), lies the upper limit of tabular ground ice. The continental unit encloses polygonal-ice wedges of different age.

Keywords: *Central Yamal, tabular ground ice, ice wedges, methane, dissolved organic matter, isotopic composition of methane*