

doi: 10.24412/2687-1092-2023-10-245-254



ГЕОХИМИЯ ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДОВ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ С ФОКУСОМ НА ЦИКЛ УГЛЕРОДА: РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ СТАТИСТИКИ

✉ Семенов П.Б.¹, Мальшев С.А.¹, Киль А.О.¹, Шатрова Е.В.^{1,2}, Лодочникова А.С.¹, Белова Н.Г.³, Лейбман М.О.^{4,5}, Стрелецкая И.Д.³

¹ФГБУ «ВНИИОкеангеология», Санкт-Петербург, Россия

²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

³МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

⁴Институт криосферы Земли Тюм НЦ СО РАН, Тюмень, Россия

⁵Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

✉ petborsem@gmail.com

Подземные льды исключительно вариабельны по составу растворенных компонентов, включая молекулярные фракции растворенного органического вещества, что иллюстрирует многообразие биогеохимических обстановок и условий промерзания. В работе продемонстрировано, что взаимодействие материнской воды с твердым материалом служит основным источником обогащения грунтовых льдов растворенными компонентами. Полученная классификация подземных льдов, в частности полигонально-жильных и пластовых, будет полезна для пространственных обобщений при прогнозировании эмиссии парниковых газов и классификации образцов для экспериментальных исследований по определению биоразлагаемого углерода.

Ключевые слова: *подземные льды, цикл углерода, растворенное органическое вещество, диоксид углерода и метан*

Введение. Подземные льды широко распространены на территории Российской и Канадской Арктики, а также Аляски, вмещают существенный резервуар органического углерода, обладающий сравнительно высокой биологичностью [Hugelius et al., 2014]. Хотя подземные льды могут содержать большое количество литогенной фракции, они в основном состоят из воды, что определяет особую количественную роль растворенного органического углерода (РОУ, DOC) и растворенного органического вещества (РОВ, DOM) в углеродном резервуаре подземных льдов и его дальнейшей трансформации в цикле углерода. Растворенный органический углерод, несомненно, содержит наиболее биологичную составляющую общего органического углерода, непосредственно доступную для питания микроорганизмов. Вовлечение энергетически выгодных субстратов в современный биогеохимический цикл может способствовать преодолению самого энергоемкого этапа минерализации суммарного РОВ (DOM) – гидролиза высокомолекулярных соединений за счет секреции гидролитических ферментов гетеротрофной микробиотой. Эффект стимуляции процессов биохимической минерализации растворенного органического вещества мерзлых пород за счет добавления к инкубируемой смеси аликвот расплавов полигонально-жильных льдов был продемонстрирован экспериментальными исследованиями по определению биоразлагаемого РОУ [Vonk et al., 2013, Knolbauch et al., 2017]. Продуктами микробной минерализации органического вещества являются углекислый газ (в аэробных условиях) и метан (в анаэробных условиях) – наиболее значимые парниковые газы (ПГ), эмиссия которых в атмосферу влияет на состояние климата на планете. Кроме того, значительное количество «готового» метана (наиболее активного ПГ) содержится в мерзлых толщах в составе газовых пузырьков, а также в виде раствора. Эта часть метана при оттаивании вмещающих его льдистых отложений, ответственна за прямую эмиссию реликтового метана в атмосферу [Yokohata et al., 2020]. По предварительным оценкам ее относительный вклад сравнительно невелик, но также подлежит обязательному учету.

Растворенное органическое вещество – сложная смесь соединений различной химической природы с широким диапазоном молекулярных масс. Одним из наиболее эффективных методов изучения молекулярно-фракционного состава РОВ служит 3-D матричная флуориметрия с определением флуоресцирующих компонентов (флуорофоров) РОВ методом PARAFAC анализа (EEM DOM PARAFAC) [Fellman et al., 2008; Steadmon and Cory, 2014]. Выявленные компоненты информируют о структуре пула растворенного органического углерода, что может быть использовано в дальнейшем как для палеоклиматических реконструкций, так и для моделирования трансформации органического вещества в парниковые газы.

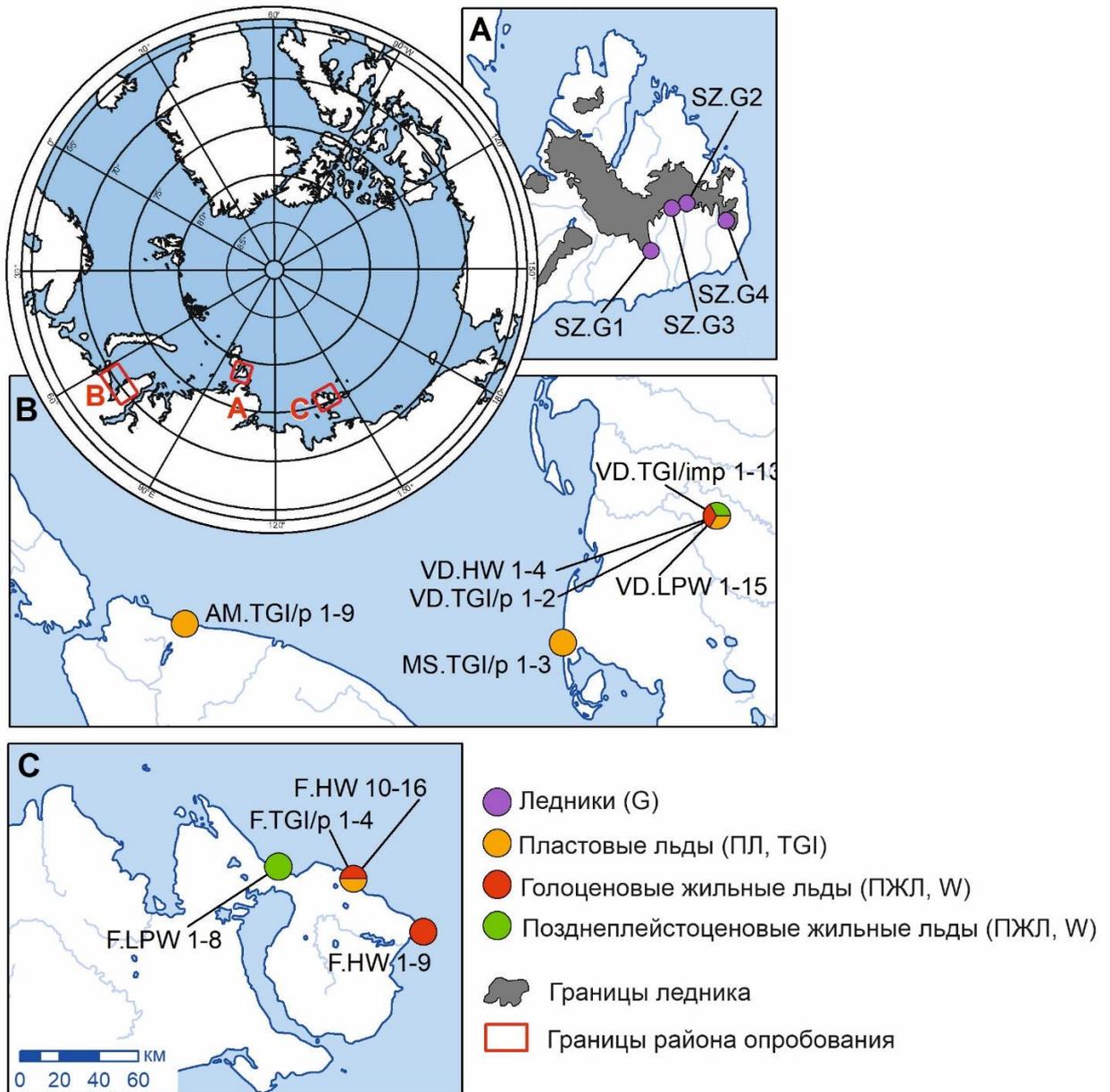


Рис. 1. Карта районов отбора проб. В скобках – количество образцов. А) Ленинградский ледник, о. Большевик, Северная Земля: SZ.G (n=4); В) Амдерма, Югорский п-ов: AM.TGI/p (n=9); стационар Васькины дачи, п-ов Ямал: VD.TGI/p (n=2), VD.TGI/imp (n=13), VD.LPW (n=15), VD.HW (n=4); стационар Марре-Салле, п-ов Ямал: MS.TGI/p (n=3); С) п-ов Фаддеевский, о-в Котельный, Новосибирские острова: F.TGI/p (n=5), F.LPW (n=8), F.HW (n=15).

Основные задачи работы:

- Сформировать и валидировать базу данных флуоресцентных спектров РОВ (ЕЕМ DOM PARAFAC), с помощью которой можно отследить количественные вариации флуорофоров.

- Методом многомерной статистики выявить взаимосвязь использованных геохимических переменных.

- Методом многомерной статистики оценить вариабельность и продемонстрировать распределение и классификацию образцов.

Таблица 1. Образцы грунтовых льдов и их первичные характеристики

Регион	Локация	Тип льда	Возраст ПЖЛ	Чистота ПЛ (содержание твердой фракции)	Обозначение групп и номера образцов
Югорский п-ов	Амдерма, АМ	ПЛ, TGI	-	«Чистый», pure /p	AM.TGI/p 1 — 9
п-ов Ямал	Васькины дачи, VD	ПЛ, TGI	-	«Чистый», pure /p	VD.TGI/p 1 — 2
		ПЛ, TGI	-	«Грязный», impure /imp	VD.TGI/imp1 — 13
		ПЖЛ, W	Поздний Плейстоцен		VD.LPW 1 — 15
		ПЖЛ, W	Голоцен		VD. HW 1 — 4
	Марре-Салле, TMS	ПЛ, TGI	-	«Чистый», pure /p	MS.TGI/p 1 — 3
Новосибирские острова	п-ов Фаддевский, о. Котельный, F	ПЛ, TGI	-	«Чистый», pure /p	F.TGI/p 1 — 5
		ПЖЛ, W	Поздний Плейстоцен		F.LPW 1 — 8
		ПЖЛ, W	Голоцен		F. HW 1 — 16
Арх. Северная Земля	о.Большевик, SZ	Ледник, G	-		SZ. G 1 — 4

Материалы и методы. В работе задействована уникальная база данных по геохимическим параметрам (16 переменных), включающая 78 образцов природных льдов: пластовых льдов (ПЛ); полигонально-жильных льдов (ПЖЛ), а также для сравнения были отобраны образцы ледникового льда с о. Большевик, Северная Земля. Для формирования базы данных, использованной при осуществлении PARAFAC анализа 3D спектров флуоресценции, демонстрирующего молекулярно-фракционный состав растворенного органического вещества, было задействовано 252 спектра флуоресценции, в том числе расплавы подземных льдов, образцы воды из поверхностных водотоков и озер.

Образцы льда для геохимических исследований были получены из различных географических локаций российской Арктики, включая Югорский п-ов (Амдерма), п-ов Ямал (стационары Васькины дачи, Марре-Сале), о-в Котельный (п-ов Фаддеевский), а также ледниковый лед с ледника Ленинградский, о. Большевик, Северная Земля (рис. 1). Образцы принадлежат к различным типам льдов, их рабочая классификация приведена в таблице 1. Возраст (Голоцен (H), Поздний Плейстоцен (LP)) указан только для ПЖЛ, а категории «чистый» (pure/p) и «грязный» (impure/imp), основанные на содержании твердой фракции в образцах - только для пластовых льдов (образцы ПЖЛ определяются как «чистые»).

Таблица 2. Геохимические переменные

Ионный состав (мг/л)	Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, (NO₂⁻, NO₃⁻, NH₄⁺) суммированы как растворенный неорганический азот (DIN))
Валовые параметры	S (%) - содержание твердой фракции TI (мг/л) – общее содержание ионов P (мг/л) – растворенный органический углерод РНУ (мг/л) - растворенный неорганический углерод РНА (мг/л) - растворенный неорганический углерод
Фракционный состав растворенного органического вещества (DOM), компоненты PARAFAC анализа флуоресцентного DOM	P1 370/470*нм (RU)** гуминовые кислоты P2-310/425 нм (RU) фульвокислоты P3-260/470 нм (RU) гуминовые кислоты P4-(RU)-270/340 нм белковое DOM
Газы	CH₄, CO₂ (ppmV)

*нм- длины волн флуоресценции возбуждение/эмиссия

**RU Рамановские единицы интенсивности флуоресцентной эмиссии

В работе использованы методы (табл. 2), подробно описанные в наших предыдущих публикациях [Semenov et al., 2020; Pismeniuk et al., 2023]. Для подготовки расплавов, льды были помещены в термоблок с контролируемыми условиями (+4°C) для оттаивания на ночь. Расплавы фильтровали через фильтры 0,45 мкм (полиэтилсульфон, ПЭС). Для отбора проб на газы предварительно взвешенный фрагмент льда помещали в обжимной флакон, газовый зазор (хэдспейс) заполняли чистым гелием. Содержание твердой фракции определяли весовым методом, сравнивая исходную массу монолита и массу твердого остатка после лиофильного высушивания осадка, полученного при оттаивании монолита. Ионный состав (10 компонентов) определяли на хроматографе Metrohm IC Vario 940 с кондуктометрическим детектором с неопределенностью ± 2,5%. Валовые формы углерода: растворенный органический углерод (РОУ), растворенный

неорганический углерод (РНА) определяли на анализаторе Shimadzu TOC-V с неопределенностью $\pm 3,0\%$.

Углеводородные газы состава C_1-C_5 (13 компонентов) определяли на газовом хроматографе Shimadzu GC 2014 с пламенно-ионизационным детектором (ПИД) с неопределенностью $\pm 2,5\%$, CO_2 определяли на газовом хроматографе Shimadzu GC 2014 с детектором по теплопроводности (ДТП) с неопределенностью $\pm 5\%$.

Флуориметрические измерения осуществляли на спектрофлуориметре Shimadzu RF5301. Обработку 3D спектров флуоресценции, включая все необходимые процедуры спектральной коррекции, PARAFAC анализ, расчет концентраций флуорофоров и сравнение обработанных спектров с библиотечными данными выполняли при помощи программного обеспечения (ПО) EFC v1.2 (<https://www.nomresearch.cn/efc/indexEN.html>).

Все перечисленные аналитические работы были выполнены в аналитическом центре ФГБУ ВНИИОкеангеология (АЦВ). Для проведения статистического анализа методом главных компонент (МГК, PCA) использовали ПО StatSoft STATISTICA 12.

Результаты исследований и их обсуждение. Два первых главных компонента (PC1,2) объясняют 83,61% общей дисперсии данных, среди которых 50,26% приходится на компонент PC1, а 15,06% - на компонент PC2. На рисунке 2 представлены графики распределения векторов переменных (а) и координаты факторных счетов точек наблюдения (образцов подземных льдов). Как следует из графика, все геохимические параметры положительно коррелируют между собой, демонстрируя отрицательные значения по оси PC1.

Таким образом, обогащение всеми растворенными компонентами в составе расплавов льдов фиксируется убыванием значений нагрузок по PC1. В наименьшей степени с PC1 коррелируют такие параметры как сульфат (SO_4^{2-}) метан (CH_4), диоксид углерода (CO_2) и белковый компонент DOM P4. В наибольшей степени с PC1 коррелируют гуминовые компоненты DOM P1-P3, DIC, DOC, S (содержание твердой фракции в расплавах льдов). Относительно оси PC2 геохимические переменные четко распадаются на две группы, характеризующиеся положительными и отрицательными нагрузками соответственно. Группа переменных с отрицательными значениями по PC2 включает PНУ (DIC), РОУ (DOC), CO_2 , CH_4 , компоненты РОВ (DOM) P1-P3, S. Мы обозначаем эту группу переменных как «углерод-доминантную» в связи с тем, что большинство образующих ее параметров содержит в своем составе углерод в качестве основного элемента. Группа с положительными значениями по оси PC2 включает Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , TI , FI , белковый компонент РОВ (DOM) P4, K^+ , PНУ, Ca^{2+} , Mg^{2+} . Мы обозначаем эту группу как «ион-доминантную» ввиду того, что большинство ее компонентов - ионы растворимых солей. Гуминовые компоненты РОВ (DOM) (P1-P3) положительно коррелируют друг с другом, но не коррелируют с белковым компонентом P4, что указывает на различные источники этих молекулярных фракций растворенного органического вещества: аллохтонных и автохтонных, соответственно. Гуминовые компоненты сильно коррелируют с растворенным органическим углеродом (DOC), закономерно демонстрируя, что терригенное (аллохтонное) гуминовое органическое вещество образует основной пул РОУ подземных льдов, а автохтонное РОВ, связанное с местной микробиотой, играет существенную количественную роль лишь в образцах подземных льдов, сравнительно обедненных РОУ. Пул РОУ, связанный с компонентом РОВ P4 представляет собой его наиболее биологичную фракцию, которая коррелирует с определяемым экспериментально биоразлагаемым углеродом (BDOC), что было продемонстрировано в ряде предыдущих исследований [Vonk et al., 2013; 2015].

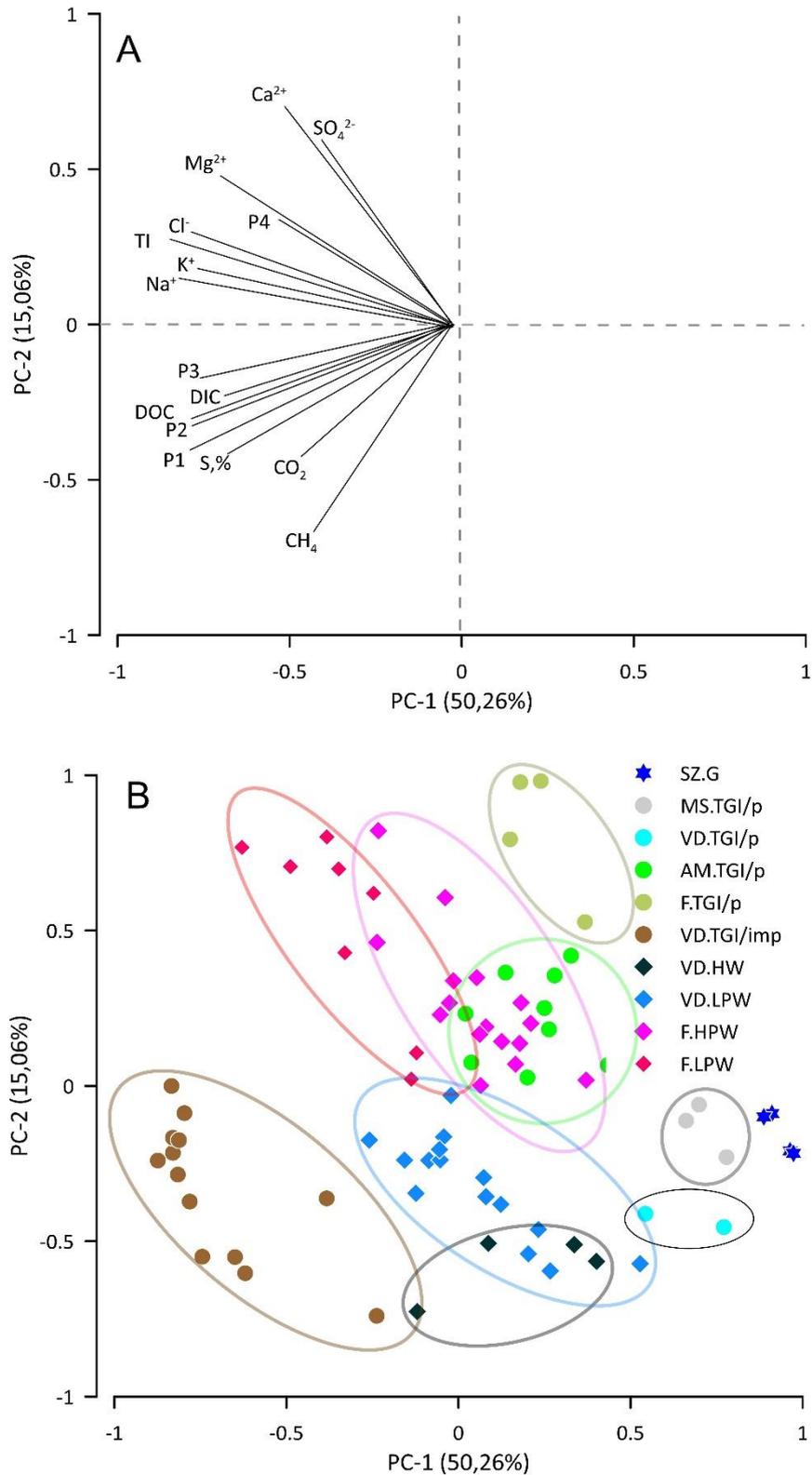


Рис 2. Результаты статистического анализа с применением метода главных компонент (МГК, PCA) А - график распределения собственных векторов геохимических переменных по осям главных компонент; Б - график распределения факторных счетов точек наблюдения (образцов подземных льдов).

Проанализированные образцы подземных льдов имеют широкий разброс по осям главных компонент (PC1, PC2). Ледниковые льды (SZ.G) Северной Земли, характеризующиеся минимальным содержанием твердых включений, задействованы в

качестве референсной группы, они демонстрируют максимальные значения нагрузок по оси PC1 и, таким образом, являются «антиподами» группы образцов «грязных» пластовых льдов (VD.TGI/imp) из термоцирка, расположенного в центральном Ямале (стационар Васькины Дачи). В целом, можно сказать, что распределение образцов вдоль оси PC1 иллюстрирует общее обогащение льдов растворенными компонентами, образуя ряд от ледников до пластовых льдов с массовым содержанием льда 50-20% (величина обратная S- содержанию твердой фракции, использованному в этой работе в качестве базового параметра). Примечательно, что все образцы с п-ова Ямал, независимо от генетического типа (ПЛ/ПЖЛ, TGI/W), попадают в диапазон отрицательных значений по PC2, тогда как все образцы с п-ова Фаддеевский (Новосибирские острова) – в диапазон положительных значений по оси этого компонента. Можно предположить, что первые относительно обогащены растворенными солями, а вторые, как растворенными солями, так и растворенными формами углерода и углеродсодержащими газами (CH₄ и CO₂). Это наблюдение, возможно, отражает генетические закономерности, связанные с географическими вариациями обстановок промерзания. Образцы «чистых» пластовых льдов MS.TGI/p стационара Марре Сале (западный Ямал) по распределению геохимических параметров обнаруживают конвергентное сходство с образцами ледникового льда (SZ.G), максимально приближаясь к ним по значениям нагрузок обоих главных компонентов (PC1,2). При этом, образцы «чистого» льда стационара Васькины Дачи (VD.TGI/p), обособлены от MS.TGI/p меньшими значениями нагрузок по оси PC2, что обусловлено с относительным обогащением последних CH₄ и DOC. «Чистые» пластовые льды п-ова Фаддеевский (F.TGI/p) выделяются низким содержанием CH₄, DOC, гуминовых компонентов РОВ при достаточно высоком содержании ионов: SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺. Избирательное обогащение сульфатом, характерно как для пластовых, так и для жильных льдов п-ова Фаддеевский (F.TGI/p, F.NPW, H.LPW), что может фиксировать размыв и реокисление сульфидов морских отложений поверхностными водотоками (Pismeniuk et al., 2023). Любопытно, что группа образцов «чистых» пластовых льдов, отобранных недалеко от п. Амдерма (AM.TGI/p) демонстрирует конвергентное сходство по геохимическому составу растворенных компонентов с голоценовыми жилами п-ова Фаддеевский (F.NPW), но при этом существенно отстоит от более близких географически «чистых» ПЛ п-ова Ямал (MS.TGI/p, VD.TGI/p), как следует из графика Рис. 2 (В). Наблюдаемое сходство в паттернах распределения геохимических переменных пластовых и жильных льдов стационара Васькины дачи может свидетельствовать о влиянии на формирование льдов вмещающих отложений, исключительно обогащенных метаном и гуминовым РОВ.

Заключение и выводы. Изучение вариабельности геохимических параметров с фокусом на ключевые компоненты цикла углерода необходимо для пространственных обобщений и последующего моделирования влияния органического углерода, высвобождаемого оттаиванием подземных льдов на биогеохимию современных экосистем. Независимо от оценок глобальных тенденций текущего и прогнозируемого состояния мерзлоты, а также воздействия реликтового углерода мерзлоты на цикл углерода в планетарном масштабе по меньшей мере периодически оттаивающие мерзлые породы, среди которых важную роль играют подземные льды, несомненно оказывают воздействие на состояние трофической системы в конкретных обстановках российской Арктики.

Результаты этой работы позволяют сделать следующие предварительные выводы:

1. Обогащение льдов растворенными компонентами обусловлено контактом материнской воды с твердым материалом и экстракции из него водорастворимых компонентов.

2. Растворенное органическое вещество подземных льдов и его валовый эквивалент (РОУ) представлено преимущественно высокомолекулярным терригенным

гуминовым РОВ которое требует энергоемкой длительной обработки, прежде чем стать биодоступным/биолабильным и непосредственно генерировать ПГ.

3. Льды с низким содержанием DOC содержат преимущественно билабиальное DOM, которое может служить «затравкой» для биологического окисления и минерализации менее биодоступного DOM, ассоциированное с главным пулом DOC. Высвобождаемое гипотетическим оттаиванием «чистых» подземных льдов большое количество воды, обеспечивает транспорт биодоступной «затравки» с поверхностными потоками талых вод.

4. Данные многомерного статистического анализа показывают разнообразие биогеохимических обстановок и характерную группировку данных. Классификация проб на основе проведенного анализа позволит наиболее эффективно осуществить экспериментально-инкубационные условия с избранными образцами в рамках дальнейших запланированных исследований.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ «Трансформация органического вещества и генерация парниковых газов (диоксида углерода и метана) при оттаивании подземных льдов Российской Арктики в условиях лабораторного эксперимента» в 2023-24 гг." № 23-27-00123.

ЛИТЕРАТУРА

Cory R.M., Ward C.P., Crump B.C., Kling G.W. Sunlight controls water column processing of carbon in arctic fresh waters // *Science*, 2014. Vol. 345. Is. 6199. P. 925-928. doi: 10.1126/science.125311

Fellman J.B., Hood E., D'Amore D.V., Edwards R.T., White D. Seasonal changes in the chemical quality and biodegradability of dissolved organic matter exported from soils to streams in coastal temperate rainforest watersheds // *Biogeochemistry*. 2009. Vol. 95. P. 277–293. doi: 10.1007/s10533-009-9336-6

Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S. et al (2014) Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11. Is. 23. P. 6573–6593. doi:10.5194/bg-11-6573-2014

Knoblauch C., Beer C., Liebner S., Grigoriev M.N., Pfeiffer E.M. Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost // *Nature Climate Change*. 2018. Vol. 8. P. 309–312. doi: 10.1038/s41558-018-0095-z

Pismeniuk A., Semenov P., Veremeeva A., He W., Kozachek A., Malyshev S., Shatrova E., Lodochnikova A., Streletskaya I. Geochemical Features of Ground Ice from the Faddeevsky Peninsula Eastern Coast (Kotelny Island, East Siberian Arctic) as a Key to Understand Paleoenvironmental Conditions of Its Formation // *Land*. 2023. Vol. 12, 324. doi:10.3390/land12020324

Semenov P., Pismeniuk A., Malyshev S., Leibman M., Streletskaya I., Shatrova E., Kizyakov A., Vanshtein B. 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

Stedmon C.A., Cory R.M. Biological origins and fate of fluorescent dissolved organic matter in aquatic environments. In: *Aquatic Organic Matter Fluorescence*; Coble, P.G., Lead, J.R., Eds., Cambridge University Press: Cambridge, NY, 2014, pp. 278–300.

Streletskaya I.D., Pismeniuk A.A., Vasiliev A.A., Gusev E.A., Oblogov G.E., Zadorozhnaya N.A. The ice-rich permafrost sequences as a paleoenvironmental archive for the Kara Sea region (Western Arctic) // *Frontiers in Earth Science*. 2021. Vol. 9. 723382. doi: 10.3389/feart.2021.723382

Vonk J.E., Tank S.E., Bowden W.B., Laurion I., Vincent W.F., Alekseychik P., Amyot M., Billet M.F., Canário J., Cory R.M., Deshpande B.N. Reviews and syntheses: Effects of permafrost thaw on Arctic aquatic ecosystems // *Biogeosciences*. 2015. Vol. 12. Is. 23. P. 7129-7167. doi: 10.5194/bg-12-7129-2015

Vonk J.E., Mann P.J., Davydov S., Davydova A., Spencer R.G.M., Schade J., Sobczak W.V., Zimov N., Zimov S., Bulygina E., Eglinton T.I., Holmes R.M. High biolability of ancient permafrost carbon upon thaw // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40. P. 2689-2693 doi: 10.1088/1748-9326/8/3/035023

Yokohata T., Saito K., Ito A. et al. Future projection of greenhouse gas emissions due to permafrost degradation using a simple numerical scheme with a global land surface model // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2020. Vol. 7, 56. doi:10.1186/s40645-020-00366-8

GEOCHEMISTRY OF GROUND ICE IN THE RUSSIAN ARCTIC WITH A FOCUS ON THE CARBON CYCLE: EXPLORATIVE STATISTICS RESULTS

Semenov P.B.¹, Malyshev S.A.¹, Kil A.O.¹, Shatrova E.V.^{1,2}, Lodochnikova A.S.¹, Belova N.G.³, Leibman M.O.^{4,5}, Streletskaya I.D.³

¹VNIOkeangeologiya, St. Petersburg, Russia

²St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁴Institute of the Earth Cryosphere Tyumen Scientific Center SB RAS, Tyumen, Russia

⁵Tyumen State University, Tyumen, Russia

Ground ice is extremely variable in the composition of dissolved components, including molecular fractions of dissolved organic matter, which illustrates the diversity of biogeochemical environments. The work demonstrates that the interaction of source water with solid material serves as the main mechanism for the enrichment of ground ice with dissolved components. The resulting classification of ground ice will be useful for spatial generalizations and classification of samples for experimental studies.

Keywords: *ground ice, carbon cycle, dissolved organic matter, carbon dioxide and methane*

REFERENCES

Cory R.M., Ward C.P., Crump B.C., Kling G.W. Sunlight controls water column processing of carbon in arctic fresh waters // *Science*, 2014. Vol. 345. Is. 6199. P. 925-928. doi: 10.1126/science.125311

Fellman J.B., Hood E., D'Amore D.V., Edwards R.T., White D. Seasonal changes in the chemical quality and biodegradability of dissolved organic matter exported from soils to streams in coastal temperate rainforest watersheds // *Biogeochemistry*. 2009. Vol. 95. P. 277–293. doi: 10.1007/s10533-009-9336-6

Hugelius G, Strauss J, Zubrzycki S. et al (2014) Estimated stocks of circumpolar permafrost carbon with quantified uncertainty ranges and identified data gaps // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11. Is. 23. P. 6573–6593. doi:10. 5194/bg-11-6573-201

Knoblauch C., Beer C., Liebner S., Grigoriev M.N., Pfeiffer E.M. Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost // *Nature Climate Change*. 2018. Vol. 8. P. 309–312. doi: 10.1038/s41558-018-0095-z

Pismeniuk A., Semenov P., Veremeeva A., He W., Kozachek A., Malyshev S., Shatrova E., Lodochnikova A., Streletskaya I. Geochemical Features of Ground Ice from the Faddeevsky Peninsula Eastern Coast (Kotelny Island, East Siberian Arctic) as a Key to Understand Paleoenvironmental Conditions of Its Formation // *Land*. 2023. Vol. 12, 324. doi:10.3390/land12020324

Semenov P., Pismeniuk A., Malyshev S., Leibman M., Streletskaya I., Shatrova E., Kizyakov A., Vanshtein B. 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

Stedmon C.A., Cory R.M. Biological origins and fate of fluorescent dissolved organic matter in aquatic environments. In: *Aquatic Organic Matter Fluorescence*; Coble, P.G., Lead, J.R., Eds., Cambridge University Press: Cambridge, NY, 2014, pp. 278–300.

Streletskaya I.D., Pismeniuk A.A., Vasiliev A.A., Gusev E.A., Oblogov G.E., Zadorozhnaya N.A. The ice-rich permafrost sequences as a paleoenvironmental archive for the Kara Sea region (Western Arctic) // *Frontiers in Earth Science*. 2021. Vol. 9. 723382. doi: 10.3389/feart.2021.723382

Vonk J.E., Tank S.E., Bowden W.B., Laurion I., Vincent W.F., Alekseychik P., Amyot M., Billet M.F., Canário J., Cory R.M., Deshpande B.N. Reviews and syntheses: Effects of permafrost thaw on Arctic aquatic ecosystems // *Biogeosciences*. 2015. Vol. 12. Is. 23. P. 7129-7167. doi: 10.5194/bg-12-7129-2015

Vonk J.E., Mann P.J., Davydov S., Davydova A., Spencer R.G.M., Schade J., Sobczak W.V., Zimov N., Zimov S., Bulygina E., Eglinton T.I., Holmes R.M. High biolability of ancient permafrost carbon upon thaw // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40. P. 2689-2693 doi: 10.1088/1748-9326/8/3/035023

Yokohata T., Saito K., Ito A. et al. Future projection of greenhouse gas emissions due to permafrost degradation using a simple numerical scheme with a global land surface model // *Progress in Earth and Planetary Science*. 2020. Vol. 7, 56. doi:10.1186/s40645-020-00366-8