

ГАЗЫ И ГАЗОВЫЕ ГИДРАТЫ В КРИОСФЕРЕ ЗЕМЛИ

УДК 551.345; 550.47
DOI: 10.15372/KZ20250105
EDN: YENHSZ

ВЫДЕЛЕНИЕ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ ОТТАЯВШИХ ОБРАЗЦОВ ПОДЗЕМНОГО ЛЬДА В УСЛОВИЯХ ИНКУБАЦИОННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

П.Б. Семенов^{1,*}, А.О. Киль¹, Е.В. Шатрова^{1,2}, Н.Г. Белова^{3,4}, О.В. Левочкина⁴, М.О. Лейбман⁴,
Г.Е. Облогов⁴, А.В. Хомутов^{4,5}, И.Д. Стрелецкая³

¹ ВНИИОкеангеология, 190121, Санкт-Петербург, Английский пр., 1, Россия

² Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле, 199178, Санкт-Петербург, 10-я линия В.О., 33–35, Россия

³ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, географический ф-т, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

⁴ Институт криосферы Земли ТюмНЦ СО РАН, 625026, Тюмень, ул. Малыгина, 86, Россия

⁵ Тюменский индустриальный университет, 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, Россия

*Автор для контакта; e-mail: p.semenov@vniio.ru

Цель работы – изучить количественные закономерности трансформации растворенного органического вещества в диоксиде углерода в образцах подземных льдов, отобранных из характерных обнажений Российской Арктики, в условиях экспериментальной инкубации. Продемонстрировано два пика эмиссии CO₂ в ходе инкубации, где первый связан с утилизацией растворенного органического углерода подземных льдов, а второй обусловлен мобилизацией органического вещества из твердой фракции оттаявших подземных льдов. Определены высокие значения содержания биоразлагаемого растворенного органического углерода (более 65 % в одном из образцов) и значимая положительная корреляция ($R^2 = 0.82$) между величиной кумулятивной эмиссии CO₂ и количеством биоразлагаемого растворенного органического углерода в оттаявших образцах подземных льдов. Полученные данные свидетельствуют о высоком потенциале подземных льдов как источника лабильного углерода в окружающую экосистему при термоденудации.

Ключевые слова: подземные льды, растворенное органическое вещество, диоксид углерода, инкубационные эксперименты, биоразлагаемый растворенный органический углерод.

Ссылка для цитирования: 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. Выделение диоксида углерода из оттаявших образцов подземного льда в условиях инкубационного эксперимента // Криосфера Земли, 2025, т. XXIX, № 1, с. 52–65. DOI: 10.15372/KZ20250105. EDN: YENHSZ.

CARBON DIOXIDE RELEASE FROM MELTED GROUND ICE SAMPLES UNDER CONDITIONS OF AN INCUBATION EXPERIMENT

P.B. Semenov^{1,*}, A.O. Kil¹, E.V. Shatrova^{1,2}, N.G. Belova^{3,4}, O.V. Levochkina⁴, M.O. Leibman⁴,
G.E. Oblogov⁴, A.V. Khomutov^{4,5}, I.D. Streletskaya³

¹ VNIIOkeangeologia, 190121, Saint-Petersburg, Angliyskiy Ave. 1, Russia

² St. Petersburg State University, Institute of Earth Sciences, 10th Line V.O. 33–35, St. Petersburg, 199178 Russia

³ Lomonosov Moscow State University, Department of Geography, Leninskie Gory 1, Moscow, 119991 Russia

⁴ Earth Cryosphere Institute, Tyumen Scientific Centre of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Malygina St. 86, Tyumen, 625026 Russia

⁵ Industrial University of Tyumen, Volodarskogo St. 38, Tyumen, 625000 Russia

*Corresponding author; e-mail: p.semenov@vniio.ru

This work aims to study the quantitative transformation of dissolved organic matter into CO₂ in ground ice samples collected from typical exposures of the Russian Arctic under conditions of an incubation experiment. The CO₂ emission during incubation has two peaks, the first being associated with the utilization of organic carbon dissolved in ground ice; and the second, with the mobilization of organic matter from the solid fraction of melted ground ice. Melted ice samples are characterized by high values of biodegradable dissolved organic carbon (> 65 %) and a significant positive correlation ($R^2 = 0.82$) between the values of cumulative CO₂ emission and biodegradable dissolved organic carbon. Our data indicate a high potential for ground ice to be a source of labile carbon in the ecosystem under thermodenudation.

Keywords: ground ice, dissolved organic matter, carbon dioxide, incubation experiments, biodegradable dissolved organic carbon.

ВВЕДЕНИЕ

Состояние криолитозоны в условиях меняющегося климата представляет огромный научный и практический интерес. В толще многолетнемерзлых пород (ММП) количество углерода, по оценкам ряда исследователей, может превышать его содержание в современной атмосфере в 2 раза и более [Schuur et al., 2008]. Наблюдаемое и прогнозируемое потепление климата способствует оттаиванию ММП и, как следствие, высвобождению в современный цикл углерода из захороненного органического вещества (ОВ) [McCalley et al., 2014; Dean et al., 2018]. Появление реликтового ОВ при деградации ММП в современном цикле углерода проявляется в эмиссии дополнительной порции углеродсодержащих газов: метана (CH₄) и углекислого газа (CO₂), что может быть триггером так называемой положительной обратной связи, способствующей увеличению темпов потепления климата [Schuur et al., 2015; Heinz, Zak, 2018; McGuire et al., 2018; Natali et al., 2019].

Залежеобразующие подземные льды (в том числе пластовые (ПЛ) и полигонально-жильные (ПЖЛ)) являются важными с точки зрения цикла углерода компонентами криолитозоны Российской Арктики. Для ПЛ и вмещающих их глинисто-песчаных пород Ямала, в частности, установлены относительно высокие концентрации метана, которые коррелируют с содержанием органического углерода в отложениях [Стрелецкая и др., 2018; Задорожная и др., 2022; Semenov et al., 2020, 2024]. Залежеобразующие подземные льды служат источником лабильного растворенного органического вещества (РОВ) в современных экосистемах криолитозоны. Формируемые ими при оттаивании поверхностные водоотоки осуществляют транспорт РОВ, сопровождаемый его биогенной минерализацией до CO₂ в аэробных условиях и до CH₄ в анаэробной среде, к базису эрозии в зону аккумуляции ОВ [Vonk et al., 2013]. Все вышесказанное обуславливает пристальное внимание к подземным льдам в качестве источников органического вещества и парниковых газов (ПГ).

Для изучения эмиссии ПГ используются методологические подходы, связанные с измерениями потоков газов *in situ* в полевых условиях [Задорожная и др. 2022; Kraev et al., 2017; Oblogov et al., 2020] или предполагающие экспериментальные инкубации с периодическими измерениями [Vonk et al., 2013; Knoblauch et al., 2018; Shirokova et al., 2019; Prijac et al., 2022]. Преимуществом последних служит возможность отслеживания трансформации углерода в контролируемых/замкнутых условиях инкубируемого сосуда. При этом

некоторые исследования фокусируются на изменении убыли органического углерода в связи с его биогенной минерализацией в ходе инкубации и на определении биоразлагаемого растворенного органического углерода (БРОУ, англ. BDOC) [Vonk et al., 2013, 2015; Shirokova et al., 2019]. Другие исследования ориентированы на динамику эмиссии и потоков ПГ во времени [Алексеева и др., 2021; Brouchkov, Fukuda, 2002; Tanski et al., 2019]. Следует также разделять методологические подходы, предполагающие измерение динамики РОВ и РОУ в фильтрах оттаявших образцов ММП [Vonk et al., 2013, 2015; Shirokova et al., 2019; Prijac et al., 2022], и подходы, связанные с анализом динамики общего и взвешенного органического вещества (ВОВ) и соответствующих фракций углерода (общий органический углерод C_{орг}, взвешенный органический углерод (ВОУ)) [Knoblauch et al., 2013, 2018; Shakil et al., 2022]. Как показывает опыт, значимая и устойчивая генерация CH₄ метаногенными археями в анаэробно-инкубируемых оттаявших образцах ММП начинается после трех–четырёх лет отсутствия признаков активности (лаг-фазы), что, вероятно, обусловлено адаптацией микробиоты. Поэтому, чтобы эксперименты по определению продукции метана образцами ММП были достоверны, они должны быть многолетними [Knoblauch et al., 2013, 2018]. Наиболее быстрый и интенсивный процесс биогеохимической мобилизации ОВ – аэробное дыхание бактерий, сопровождаемое эмиссией CO₂, что может быть продемонстрировано краткосрочными инкубационными экспериментами [Алексеева и др., 2021; Vonk et al., 2013, 2015; Tanski et al., 2019]. Бесспорно, РОВ включает наиболее лабильную фракцию ОВ, в первую очередь расходуемую на биогенную генерацию CO₂, однако пул ВОВ значительно больше по валовому содержанию C_{орг} [Shakil et al., 2020]. В настоящей работе анализируется динамика продукции CO₂ в фильтрованных и интактных образцах (ненарушенных оттаявших монолитах подземных льдов), включающих три образца ПЛ из термоцирков п-ова Ямал и два образца ПЖЛ (п-ов Ямал и окрестности г. Норильска).

Цель работы – изучить в ходе экспериментальных исследований некоторые закономерности трансформации РОВ в ПГ в образцах подземных льдов при их оттаивании. Основные задачи: проанализировать временную динамику эмиссии CO₂ в образцах расплавов подземных льдов, количественно оценить вклад твердого/взвешенного материала (ВОВ) в эмиссию CO₂, определить количество БРОУ и влияние взвешенного/твердого материала на минерализацию РОУ в условиях

эксперимента. Идея настоящей работы состоит не в имитации природных условий сезонного оттаивания подземных льдов с соблюдением соответствующих параметров климатического режима, а в демонстрации потенциала подземных льдов к высвобождению лабильного углерода и к генерации ПГ. В связи с этим для экспериментальной инкубации создаются условия, благоприятствующие биогенной генерации ПГ в аэробном режиме во всех образцах.

РАЙОН РАБОТ И ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБРАЗЦОВ

Пять образцов монолитов подземных льдов отобраны из характерных обнажений Центрального Ямала (на научно-исследовательском стационаре (НИС) "Васькины Дачи") и окрестностей г. Норильска (Индустриальный район, руч. Далдыкан) (рис. 1). Общее описание и исходные базовые геохимические характеристики образцов приведены в табл. 1. На рис. 2 представлены опробованные

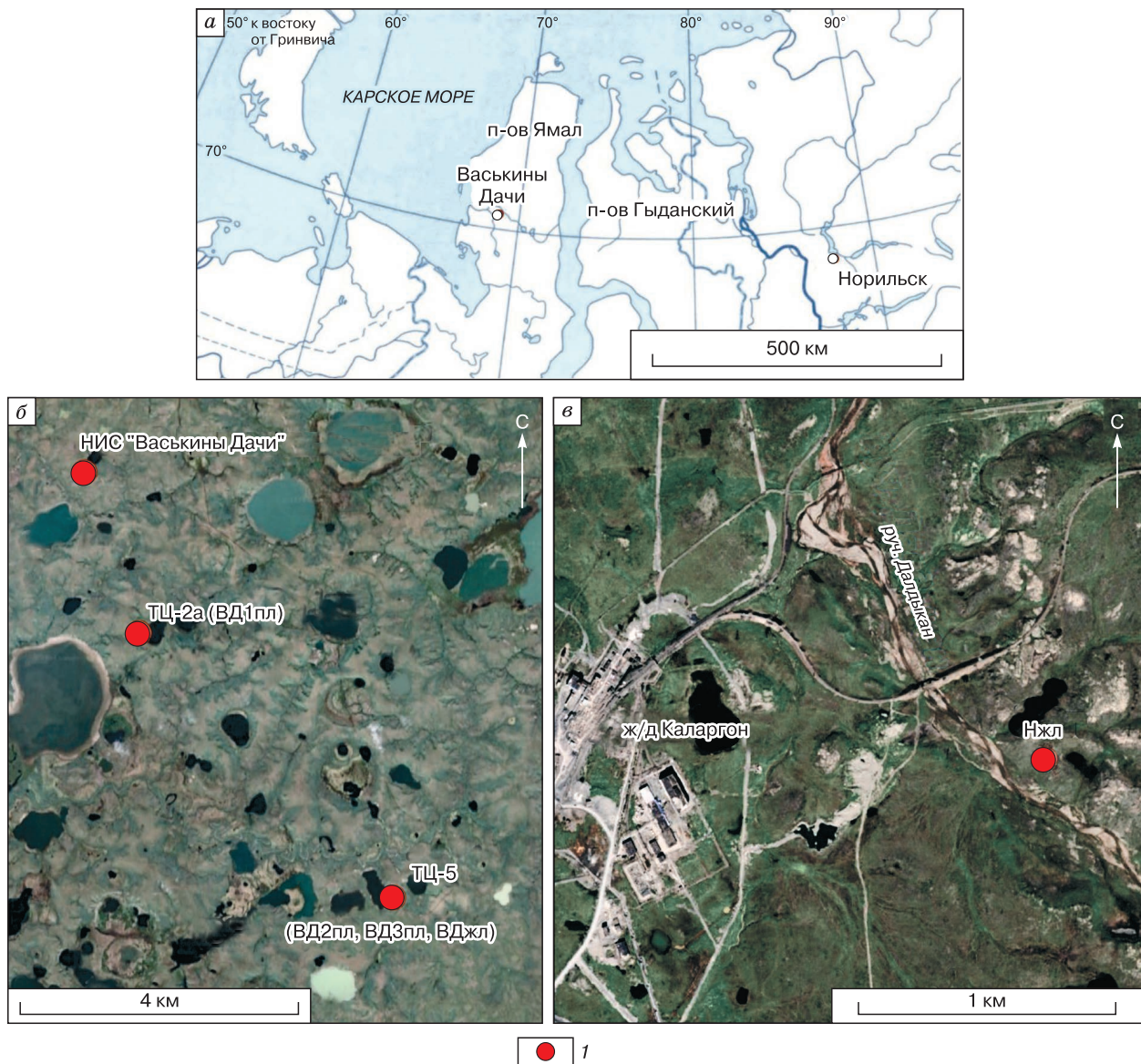


Рис. 1. Общая карта местоположения отбора проб монолитов подземных льдов (а) и детальные карты локаций отбора монолитов подземных льдов (ВД1пл, ВД2пл, ВД3пл, ВДжл) в пределах Центрального Ямала (б), монолита ПЖЛ (Нжл) в окрестностях г. Норильска, руч. Далдыкан (в).

1 – участки отбора проб; ТЦ – термощирк, пл – пластовый лед, жл – полигонально-жильный лед, НИС – научно-исследовательский стационар, ВД – Васькины Дачи, Н – Норильск.

Таблица 1. Общая характеристика и исходные геохимические параметры образцов льда

Проба	Тип льда	Место отбора	Литогенная фракция, мас. %	Общая минерализация TDS, мг/л	pH	POУ, мг/л	CH ₄ , ppmV	CO ₂ , ppmV
ВД1пл	Пластовый	П-ов Ямал, стационар "Васькины Дачи"	11.33	74.58	7.82	42.66	14 802.73	2435.95
ВД2пл	Пластовый		41.89	397.01	7.08	126.53	3485.78	2030.94
ВД3пл	Пластовый		3.61	40.57	7.20	7.14	1019.20	2138.37
ВДжл	Полигонально-жильный	Норильск, руч. Далдыкан	2.95	20.90	6.19	62.34	418.15	34 998.70
Нжл	Полигонально-жильный		0.01	9.27	6.62	5.35	3.90	1334.59

Примечание. TDS (Total Dissolved Solids) – общее содержание растворенных твердых веществ в воде, pH – водородный показатель, POУ – растворенный органический углерод, CH₄ – метан, CO₂ – диоксид углерода, ppmV (parts per million by volume) – миллионные доли по объему, пл – пластовый лед, жл – полигонально-жильный лед, ВД – Васькины Дачи, Н – Норильск.



Рис. 2. Общий вид геокриологических разрезов и расположение точек отбора монолитов в разрезе (а); общий вид монолитов подземного льда, использованных для инкубационных экспериментов (б); флаконы с расплавами образцов подземных льдов (в).

1 – точки отбора проб; ф – фильтрованные варианты расплавов. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1.

геокриологические разрезы с указанием расположения отбора каждого монолита, использованного для постановки инкубационных экспериментов.

Образец пластового льда ВД1пл отобран из стенки термоцирка ТЦ-2а (НИС “Васькины Дачи”) примерно в 1.9 м ниже бровки обнажения, представленного чередующимися прослоями льда черного цвета и белого прозрачного (стекловидного) льда с включениями песка и супеси темно-серого цвета. Пузырьки газа в монолите льда округлой формы диаметром до 2 мм. Термоцирк ТЦ-2а характеризуется абсолютной высотой бровки 21 м и подошвы – 13.7 м (см. рис. 1, б; 2, а, б).

Образец пластового льда ВД2пл отобран из стенки термоцирка ТЦ-5 (НИС “Васькины Дачи”), в обнажении льда примерно в 3 м ниже бровки обнажения, вблизи границы переслаивания серого суглинка и прозрачного стекловидного льда. Термоцирк ТЦ-5 находится на склоне, характеризуется абсолютной высотой бровки 25 м и подошвы – 3 м (см. рис. 1, б; 2, а, б).

Образец ВД3пл отобран из пласта льда, обнажающегося в восточной стенке термоцирка ТЦ-5. Лед залегает в 120 см ниже бровки, его мощность составляет около 40 см, видимая ширина около 1.5 м. Лед чистый, прозрачный, с многочисленными пузырьками (см. рис. 1, б; 2, а, б).

Образец жильного льда ВДжл отобран из шурфа на полигональном торфянике (НИС “Васькины Дачи”). Кровля голоценовой жилы вскрыта на глубине около 0.5 м в межполигональном понижении. Лед достаточно прозрачный с характерной вертикальной слоистостью. Монолит отобран справа от оси жилы (см. рис. 1, б; 2, а, б).

Образец повторно-жильного льда Нжл отобран в голоценовом торфянике на правом берегу руч. Далдыкан (Норильский промышленный район) в 200 м от русла ручья. Торфяник протягивается с севера на юг на 150 м, имеет ширину 50 м. Полигональный рельеф здесь находится в стадии деградации, перепад высот между поверхностью блоков и межблоковыми понижениями местами достигает 2 м. Размер блоков составляет 8–13 м (до 17 м) в поперечнике (см. рис. 1, в; 2, а, б).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для изучения исходного газового состава образцов монолиты подземных льдов помещали в стеклянные флаконы объемом 75 мл, предварительно промытые 1 N HCl и деионизированной водой, затем высушенные и взвешенные. Образец, помещенный во флакон, взвешивали, фиксируя массу образца. Пространство над образцом (хэдспейс) промывали чистым аргоном и герметично закрывали. Герметизированные флаконы встряхивали при помощи орбитального шейкера (Heidolph Unimax 2010) в течение 3 ч на максимальной

скорости вращения (3500 об/мин). Измерения содержания в образцах льдов твердого материала (литогенной фракции в % от массы исходного образца), газов (CH₄, CO₂, N₂), а также РОУ в расплавах льдов осуществляли согласно методикам, описанным в работах [Semenov et al., 2020, 2024; Pismeniuk et al., 2023].

Для экспериментальных исследований монолиты подземных льдов подвергали оттаиванию при +4 °С в течение 24–48 ч. Полученные маточные расплавы каждого из пяти образцов использовали для приготовления двух экспериментальных вариантов: интактного (нефильтрованного) и фильтрованного (0.45 мкм). Сравнение интактных и фильтрованных вариантов в ходе эксперимента позволяет селективно определить эмиссию CO₂ и биоразлагаемого РОУ, связанных с растворенной и взвешенной (литогенная фракция) составляющими образцов подземных льдов соответственно. Фильтрованные образцы маркированы буквой “ф” в наименовании (фВД1пл и пр.). Ввиду ограниченного исходного количества материала (монолиты подземных льдов) в экспериментальную инкубацию закладывали дубликаты только трех образцов из пяти (ВД2пл, ВД3пл, Нжл). Таким образом, экспериментальная инкубация включала 16 образцов (вариантов). На рис. 2, в представлены фотографии инкубационных вариантов расплавов подземных льдов.

Суспензии (интактные расплавы) и фильтраты расплавов образцов подземных льдов для экспериментальных вариантов разливали по флаконам, предварительно взвешенным, промытым 1 N HCl и деионизированной водой. В каждый флакон помещали ~100 мл материала согласно шкале, нанесенной на флакон. Флаконы с образцами взвешивали и записывали массу образцов, которую в дальнейшем использовали для количественных расчетов. Работа основана на экспериментальной инкубации образцов в аэробных условиях при комнатной температуре, что позволяет отследить в каждом варианте инкубации динамику эмиссии CO₂ и количество БРОУ в начале и конце инкубационного теста [Алексеева и др., 2021; Vonk et al., 2013, 2015; Shirokova et al., 2019; Tanski et al., 2019]. Для выравнивания условий “микробиологической заселенности” инкубируемых образцов использовали метод инокуляции. В качестве инокулюма, вносимого в каждый образец, использовали 100 мкл фильтрата (0.75 мкм, Watman GF-F) водной суспензии культурной почвы. Такой способ позволяет внести достаточное количество активной аэробной микробиоты в каждый инкубируемый образец [Vonc et al., 2013].

Продолжительность инкубационного эксперимента составила 61 сутки. В ходе инкубации периодические заборы материала осуществляли (по-

мимо исходной точки) на 6, 15, 20, 26, 38, 50, 61-е сутки. Концентрацию CO_2 и других газов измеряли после встряхивания инкубационных флаконов в течение 3 ч на орбитальной шейкере (Heidolph Unimax 2010). Процедура отбора пробы газа и фильтрата, а также измерения концентраций газов (CO_2 и др.) и РОУ аналогичны описанным выше для определения исходных геохимических характеристик образцов подземных льдов. Для каждого измерения учитывали текущую массу образца и объем газа (хэдспейс). Концентрации газов рассчитывали по уравнению состояния идеального газа и закону Генри с использованием коэффициентов Бунзена [Yamamoto *et al.*, 1976; Ioffe, Vitenberg, 1984]. Генерацию CO_2 (эмиссию) в ходе эксперимента выражали в массе углерода CO_2 на массу расплава ($\text{CO}_2\text{-C}$, мкг/г), а также в массе углерода на массу расплава за сутки эксперимента ($\text{CO}_2\text{-C}$, (мкг/г)/сут) [Knoblauch *et al.*, 2013]. Изменения концентрации CO_2 во времени представляли в виде двух кривых: динамическая, где визуализируется количество выделенного CO_2 за каждый интервал/экспозицию инкубационного теста, и кумулятивная, где порции CO_2 , выделенные за каждый интервал/экспозицию, суммируются. Таким образом, конечная точка кумулятивной кривой – максимальное количество выделенного в ходе эксперимента CO_2 . Содержание БРОУ определяли по разности концентраций этого показателя в начале и конце инкубационного теста [Vonk *et al.*, 2013].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исходные геохимические характеристики образцов

В работе задействованы три образца ПЛ и два образца ПЖЛ. Образец пластового льда ВД2пл характеризуется наибольшим содержанием литогенной фракции, достигающим 41.89 мас.% (см. табл. 1). Наименьшее содержание литогенной фракции свойственно образцу жильного льда Нжл, отобранному в окрестностях г. Норильска. Значения $\text{pH} < 7$ (до 6.19) обнаруживаются в образцах ПЖЛ (ВДжл, Нжл), что, возможно, связано с локализацией залежей льдов в полигональных торфяниках. Максимальное значение pH (7.82) зафиксировано в образце пластового льда ВД1пл. Максимальное значение общей минерализации (TDS) обнаружено в пробе ВД2пл и равно 397.01 мг/л, тогда как минимальное (9.266 мг/л) измерено в образце ПЖЛ (ВДжл). Образец ВД2пл более чем в 5 раз обогащен растворенными солями по отношению к другим образцам ПЛ (ВД1пл, ВД3пл), что, вероятно, является результатом более высокого содержания литогенной фракции, захваченной льдом из вмещающих лед осадков морского генезиса.

Максимальное значение содержания РОУ (126.53 мг/л) в образце ВД2пл в 23.6 раза превышает минимальную концентрацию РОУ (5.35 мг/л) в образце Нжл. По содержанию РОУ (62.34 мг/л) резко выделяется образец голоценовой жилы ВДжл, который также характеризуется наименьшим значением TDS (9.26 мг/л) и аномально высоким содержанием CO_2 (34 598 ppmV) в газовой фазе расплава. Во всех образцах концентрации CO_2 многократно превышают современный атмосферный фон, что свидетельствует об обогащении диоксидом углерода материнской воды льдов. В образцах ПЛ наблюдаются значения концентрации CO_2 более или менее сходные: 2435.95 ppmV (ВД1пл), 2030.94 (ВД2пл), 2138.37 ppmV (ВД3пл). Максимальная концентрация метана (CH_4), отмеченная в образце ВД1пл, составляет 14 802.72 ppmV и многократно превышает все измеренные в этой работе значения.

Минимальная концентрация CH_4 (3.90 ppmV), близкая к равновесной атмосферной, свойственна образцу Нжл. В целом для ПЖЛ характерны меньшие концентрации метана среди проанализированных образцов, но диапазон вариаций между ними в ПЛ превышает различие между самой низкой концентрацией CH_4 в ПЛ (1019.20 ppmV; ВД3пл) и самой высокой концентрацией метана в ПЖЛ (418.14 ppmV; ВДжл). Изученная коллекция образцов достаточно разнообразна по распределению основных параметров вещественного состава подземных льдов, чтобы представлять материал в экспериментальных исследованиях.

Генерация парниковых газов в условиях экспериментальной инкубации

Результаты измерений газового состава в ходе экспериментальной аэробной инкубации расплавок подземных льдов демонстрируют генерацию CO_2 , различающуюся как в разных образцах подземных льдов, так и в интактных и фильтрованных вариантах каждого из изученных образцов. Ни в одном из образцов не удалось зафиксировать достоверного увеличения концентрации метана в газовой фазе в ходе экспериментальной инкубации расплавок подземных льдов. В связи с этим данные по эмиссии метана в тексте и на рисунках не приводятся.

Графики, иллюстрирующие эмиссию CO_2 в образцах подземных льдов, приведены на рис. 3, 4. На графиках представлена динамика эмиссии CO_2 для каждого из двух вариантов (интактный и фильтрованный). Максимальное значение кумулятивной эмиссии CO_2 (см. рис. 4, в, з) за весь период инкубации (61 день) составило 173.40 $\text{CO}_2\text{-C}$, мкг/г в интактном образце пластового льда ВД2пл из центральной части Ямала, характеризующемся наибольшим содержанием твер-

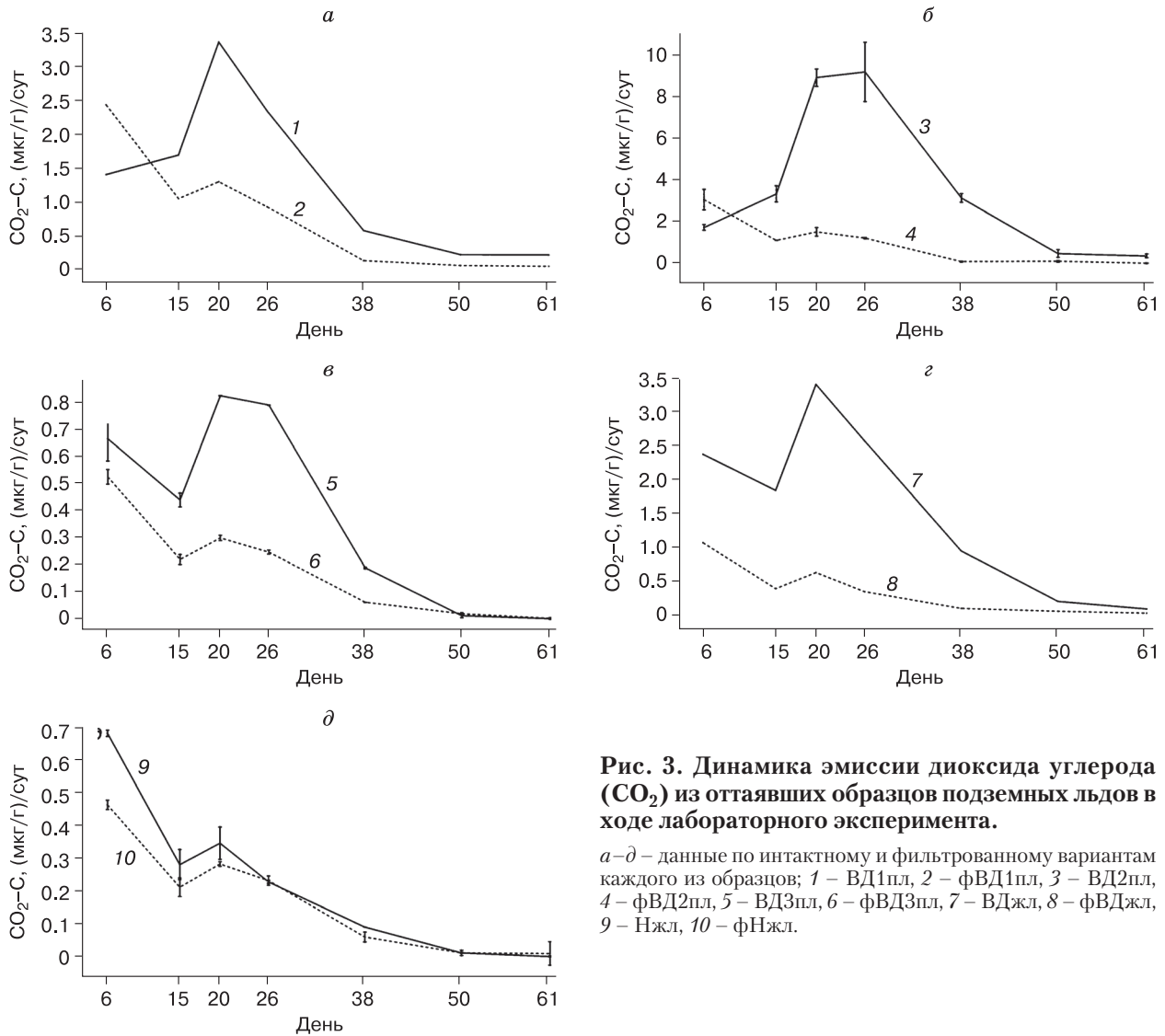


Рис. 3. Динамика эмиссии диоксида углерода (CO_2) из оттаивающих образцов подземных льдов в ходе лабораторного эксперимента.

а-д – данные по интактному и фильтрованному вариантам каждого из образцов; 1 – ВД1пл, 2 – фВД1пл, 3 – ВД2пл, 4 – фВД2пл, 5 – ВД3пл, 6 – фВД3пл, 7 – ВДжл, 8 – фВДжл, 9 – Нжл, 10 – фНжл.

дой фракции среди проанализированных льдов (41.8 мас.%). Минимальное значение кумулятивной эмиссии CO_2 (10.63 $\text{CO}_2\text{-C}$, мкг/г) обнаружено в фильтрованном расплаве образца Нжл, приготовленном из прозрачного монолита ПЖЛ с крайне малым содержанием литогенной фракции (~0.01 мас.%). Таким образом, измеренные минимальное и максимальное значения кумулятивной эмиссии CO_2 различаются более чем в 17 раз. Кривым динамики генерации CO_2 в интактных образцах свойствен резкий подъем в течение 15–26 дней инкубации, когда отмечаются максимальные показатели среднесуточного выделения CO_2 (до 9.160 $\text{CO}_2\text{-C}$, мкг/г в сутки в образце ВД2пл). Значения стандартных отклонений (СКО) между параллельными измерениями эмиссии CO_2 , нанесенные на графики в виде рисок для образцов ВД2пл, ВД3пл и Нжл (см. рис. 3, б, в, д; 4, а-г), несколько выше в интактных вариантах, чем для

фильтрованных, особенно это заметно по образцу ВД2пл, в наибольшей степени обогащенном литогенной фракцией.

Биоразлагаемый растворенный органический углерод (БРОУ) в условиях экспериментальной инкубации

Значения БРОУ (вычисленные как разность концентраций РОУ в исходной и финальной точках инкубации) варьируют от 83.39 мг/л (образец пластового льда ВД2пл с наибольшим содержанием твердой фракции и значением кумулятивной эмиссии CO_2 за весь период инкубации) до 0.27 мг/л в фильтрате расплава прозрачного ПЖЛ (Нжл) с наименьшими значениями указанных параметров. Данные по РОУ в условиях эксперимента приведены в табл. 2. В целом для всех изученных образцов БРОУ имеет более высокие значения в интактных вариантах. Величины отно-

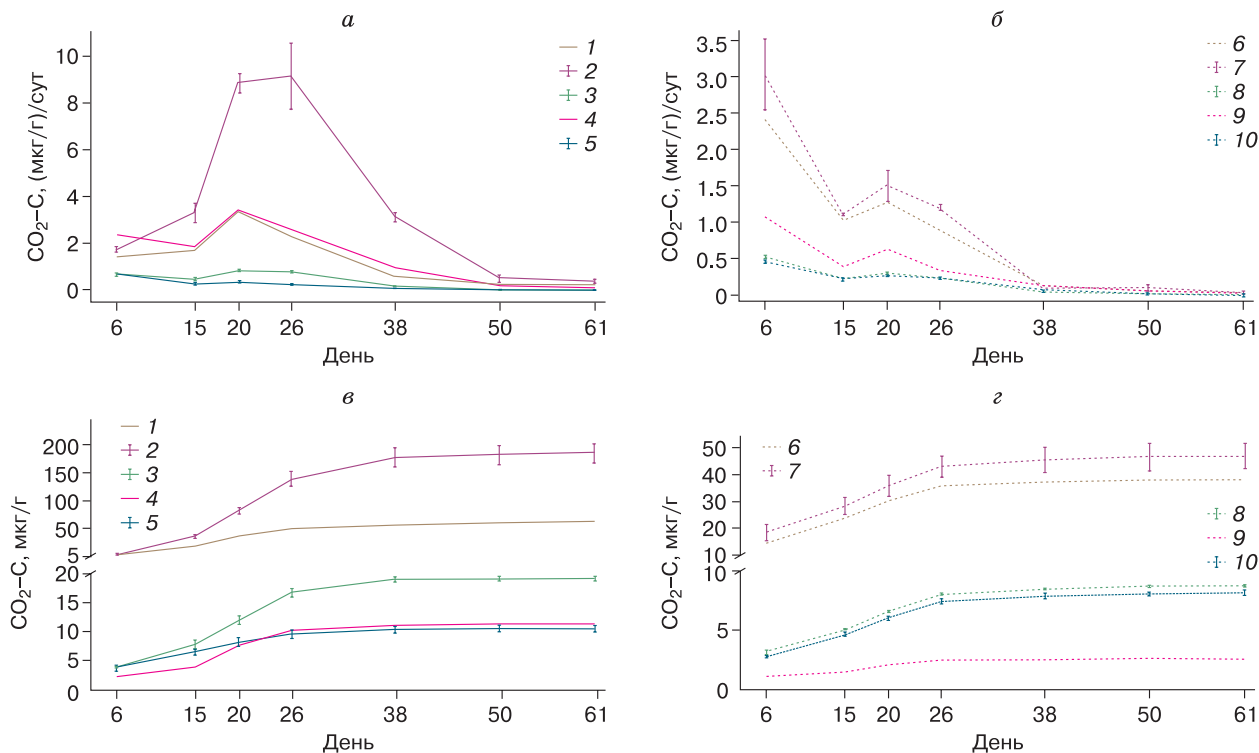


Рис. 4. Эмиссия CO₂ из оттаивших образцов подземных льдов в ходе лабораторного эксперимента.
 а, б – кривые динамики; в, г – кумулятивные кривые; 1 – ВД1пл, 2 – ВД2пл, 3 – ВД3пл, 4 – ВДжл, 5 – Нжл, 6 – фВД1пл, 7 – фВД2пл, 8 – фВД3пл, 9 – фВДжл, 10 – фНжл.

печения концентраций БРОУ в интактных и фильтрованных образцах составляют (в порядке убывания): 13.2 (ВД1пл), 2.23 (ВД2пл), 1.814 (Нжл), 1.55 (ВД2жл). Исключением является образец ВДжл, отобранный на НИС “Васькины Дачи” (п-ов Ямал), который демонстрирует более высокое значение БРОУ в фильтрованном варианте (2.98 мг/л против 1.30 мг/л в интактном образце).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В работе задействована коллекция из пяти образцов, четыре из них отобраны в пределах НИС “Васькины Дачи”. Обнажения подземных льдов и обстановки оттаивания ММП в этой локации служат объектом ряда исследований [Дворников и др., 2017; Хомутов и др., 2017; Лейбман и др., 2019; Savvichev et al., 2021].

Кривые динамики эмиссии CO₂ в инкубируемых образцах в целом образуют различные паттерны для интактных и фильтрованных вариантов. Первые характеризуются пиковыми величинами среднесуточной эмиссии CO₂ в период с 15-го по 38-й день инкубации с максимумом в интервале 26–28 суток. Для вторых характерна наибольшая интенсивность в период с 6-го по 15-й день с максимумом на самом раннем этапе инкуба-

ции (6-й день). Временная динамика генерации CO₂ бесспорно отражает мобилизацию лабильного ОВ в локальный цикл углерода. Вероятно, первый этап пиковой эмиссии CO₂ связан с использованием наиболее лабильной фракции РОУ подземных льдов, которая уже содержится в растворе и непосредственно доступна для микроорганизмов. Интенсивная генерация CO₂ в течение первых дней инкубации была отмечена ранее для разных мерзлых пород, обогащенных лабильным ОВ [Lee et al., 2012; Knoblauch et al., 2013]. Следующий пик эмиссии CO₂ (15–38-е сутки), наиболее выраженный в интактных образцах, по-видимому, обусловлен поступлением дополнительной порции органического углерода из твердой составляющей расплава льда. Эта порция играет существенную количественную роль в результирующей (кумулятивной) эмиссии CO₂ расплавами льдов. Кривые динамики эмиссии CO₂ в интактном и фильтрованном вариантах образца Нжл, который почти не содержит твердых включений, практически совпадают, иллюстрируя второстепенную роль взвешенного материала в минерализации ОВ до CO₂ для данного образца. Мобилизация ОВ из твердой фазы может быть связана с десорбцией из органоминерального матрикса и с

Таблица 2. Концентрации растворенного и биоразлагаемого растворенного органического углерода в эксперименте

Проба	РОУ _{исх}	РОУ _{фин}	БРОУ	
	мг/л		мг/л	%
ВД1пл	42.66	25.28	17.38	40.74
фВД1пл		34.88	7.78	18.24
ВД2пл (1)	126.53	43.14	83.39	65.91
ВД2пл (2)		48.22	78.32	61.90
ВД2пл ср			80.85	63.90
ВД2пл, СКО			3.59	2.84
фВД2пл (1)	126.53	119.47	7.06	5.58
фВД2пл (2)		121.35	5.19	4.10
фВД2пл ср			6.12	4.84
фВД2пл, СКО			1.33	1.05
ВД3пл (1)	7.14	4.74	2.40	33.61
ВД3пл (2)		4.88	2.26	31.65
ВД3пл ср			2.33	32.63
ВД3пл, СКО			0.10	1.39
фВД3пл (1)	7.14	5.51	1.63	22.83
фВД3пл (2)		5.78	1.36	19.05
фВД3пл ср			1.50	20.94
фВД3пл, СКО			0.19	2.67
ВДжл	62.34	61.04	1.30	2.09
фВДжл		59.36	2.98	4.78
Нжл (1)	5.35	4.75	0.60	11.21
Нжл (2)		4.97	0.38	7.10
Нжл ср			0.49	9.16
ВДжл, СКО			0.16	2.91
фНжл (1)	5.35	5.04	0.31	5.79
фНжл (2)		5.12	0.23	4.30
фНжл ср			0.27	5.05
фНжл, СКО			0.06	1.06

Примечание. РОУ – растворенный органический углерод, БРОУ – биоразлагаемый растворенный органический углерод, РОУ_{исх} и РОУ_{фин} – значения до и после инкубации соответственно, РОУ_{исх} – общие значения для имтактных и фильтрованных вариантов каждого образца, ср – среднее значение, СКО – стандартное отклонение, ф – фильтрованные варианты расплавов, пл – пластовый лед, жл – полигонально-жильный лед, ВД – Васькины Дачи, Н – Норильск.

растворением/разрушением детритных форм ОВ в образце [Groeneweld et al., 2020]. Взвешенный материал инкубируемой смеси также способствует закреплению и развитию микробной биомассы [Battin et al., 2008; Shakil et al., 2020]. Указанные процессы, безусловно, в значительной мере активированы оттаиванием и высокой температурой в инкубируемых расплавах (+22 °С) в период инкубации. Следует отметить, что в этой работе авторы не преследовали цель воспроизвести природные условия оттаивания подземных льдов, но ориентировались на сопоставление данных по различным образцам, помещенным в одинаковые ус-

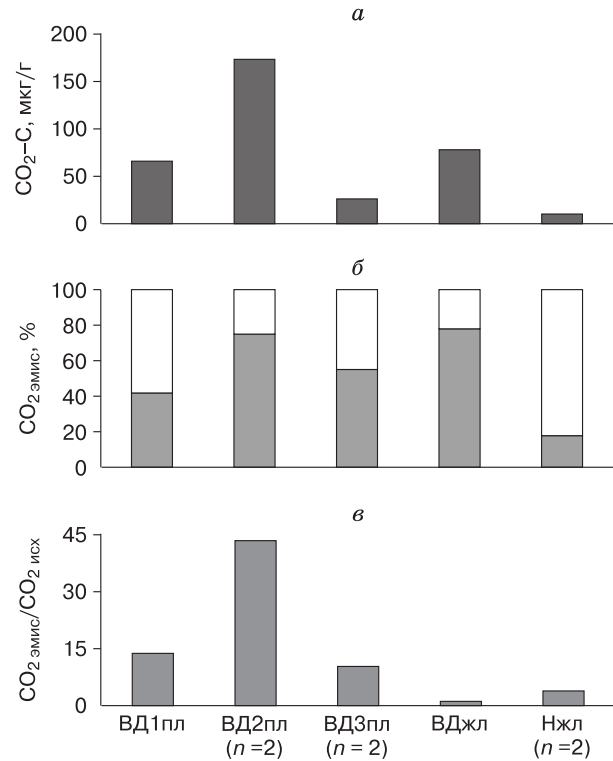


Рис. 5. Сопоставление значений кумулятивной эмиссии CO₂ в образцах расплавов подземных льдов, полученных в результате инкубации в течение 61 дня (а), вкладов в эмиссию CO₂ растворенного и взвешенного ОВ (ассоциированного с твердой фазой расплавов) (б) и отношения значений кумулятивной эмиссии CO₂ к его исходным концентрациям в образцах подземных льдов (в).

Для параллельных измерений (n = 2) показаны осредненные данные (ВД2пл, ВД3пл, Нжл). Остальные усл. обозн. см. на рис. 1.

ловия краткосрочного инкубационного эксперимента.

Из рис. 5, а следует, что наибольшие значения кумулятивной эмиссии свойственны двум образцам подземных льдов, среди которых образец пластового льда ВД2пл (173.40 CO₂-С, мкг/г) и образец жильного льда ВДжл (78.035 CO₂-С, мкг/г), что в целом иллюстрирует вполне сравнимый потенциал к генерации CO₂ подземных льдов разных генетических типов. Интересно, что образцы ВД2пл и ВДжл, отобранные из термоцирков центрального Ямала, характеризуются сходной величиной вклада взвешенного органического вещества (75.02 и 77.95 % соответственно) в кумулятивную эмиссию CO₂ при более чем в 20 раз различающемся содержании твердой фракции в инкубируемых расплавах (41.88 и 2.95 мас.% соответственно). Это указывает на критическое значение твердой фракции подземных льдов в каче-

стве источника биодобильного РОВ, минерализуемого аэробной микробиотой с выделением CO_2 , а также подтверждает особую роль ПЖЛ в локальном цикле углерода при оттаивания подземных льдов в термоцирках. Подобные закономерности отмечались в ряде работ, описывающих процесс мобилизации ОВ из взвешенного материала мерзлых пород термокарстовых ландшафтов [Tanski et al., 2017; Shakil et al., 2020]. Кроме того, в литературе описано стимулирующее влияние расплавов ПЖЛ на минерализацию РОВ водных вытяжек ледового комплекса в условиях экспериментальной инкубации (побережье р. Колымы, Дуваный Яр) за счет эффекта кометаболизма, известного как прайминг-эффект [Vonk et al., 2013; Textor et al., 2019]. Сопоставление исходных концентраций CO_2 в расплавах ПЛ и концентраций CO_2 , выделенного в результате биогенной минерализации содержащегося в нем лабильного ОВ (эмиссии CO_2 в ходе инкубации), показывает, что эти параметры, по-видимому, не связаны. Это видно на рис. 5, в, где отношения указанных переменных ($\text{CO}_2_{\text{эмис}}/\text{CO}_2_{\text{исх}}$) характеризуются значительным разбросом, не подчиненным какой-либо закономерности. Таким образом, исходная концентрация CO_2 в образце ПЛ не предсказывает потенциал генерации CO_2 из вмещенного ОВ.

Основываясь на данных временной динамики биогенной минерализации ОВ подземных льдов в условиях инкубационного эксперимента, авторы предполагают наличие следующих фаз эмиссии CO_2 : первая (6–15-е сутки инкубации) связана с мобилизацией РОВ в расплаве, вторая с высвобождением РОВ из взвешенного материала (15–38-е сутки), далее следует затухание эмиссии CO_2 , отмеченное во всех инкубируемых образцах (38–61-е сутки). Резкое снижение активности аэробного дыхания (основного биохимического процесса, обеспечивающего минерализацию ОВ до CO_2) на 28–40-е сутки инкубации может быть связано с исчерпанием лабильного ОВ или биодоступных форм азота, лимитирующих интенсивность биохимических процессов при явном отсутствии голодания по кислороду (концентрация O_2 в газовом зазоре образцов не опускалась ниже 16 %). Вероятно, подобная схема эмиссии CO_2 с двумя пиками, обусловленными последовательной утилизацией РОВ и ВОВ соответственно, характерна и для природных условий термоденудации обнажений подземных льдов.

Корректное сопоставление полученных данных по кумулятивной эмиссии CO_2 образцами подземных льдов с аналогичными данными, имеющимися в литературе по мерзлым породам, не вполне осуществимо, так как в последних случаях имел место пересчет значений на сухой вес пробы [Knoblauch et al., 2013; Tanski et al., 2019]. В настоящей работе выделенное в ходе инкубации коли-

чество CO_2 пересчитывали на массу оттаявших образцов подземных льдов, содержащих, соответственно, и воду, и твердую фракцию. Однако даже очень приблизительные сравнения с учетом вышеупомянутых несоответствий информируют о значительно меньшей эмиссии CO_2 расплавами подземных льдов по отношению к образцам донных осадков или мерзлых пород [Алексеева и др., 2021; Knoblauch et al., 2013; Tanski et al., 2019].

Инкубационные эксперименты демонстрируют существенную убыль лабильного (биоразлагаемого) РОУ (БРОУ) в ходе инкубации расплавов льда. Зафиксированный максимум БРОУ составляет 65.91 % за 61 день инкубации в образце ВД2пл, примечательном максимальной исходной концентрацией РОУ (126.53 мг/л) и максимальным содержанием твердой фракции 41.88 мас.% среди проанализированных проб. Образец ВД2пл также характеризуется чрезвычайно высокой величиной общей минерализации (TDS), составляющей 397.01 мг/л, что может косвенно свидетельствовать о вкладе ОВ морского происхождения, обнаруженного в образовании пула лабильного углерода, обеспечившего максимальную эмиссию CO_2 в ходе эксперимента. Приведенное выше значение БРОУ в образце ВД2пл (65.91 % за 61 день) сопоставимо со значениями, указанными в литературе для проб поверхностных водотоков в зоне плейстоценового ледового комплекса, отобранных на побережье р. Колымы (около 34 % за 14 дней инкубации) [Vonk et al., 2013, 2015]. Отдельного внимания заслуживают более высокие значения БРОУ в интактных вариантах по сравнению с фильтрованными, характерные для всех образцов, за исключением ВДжл (рис. 6). Так, отношения

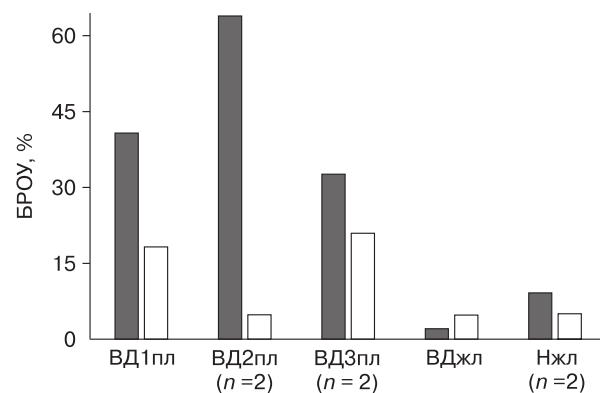


Рис. 6. Сопоставление значений концентраций биоразлагаемого растворенного органического углерода (БРОУ) в оттаявших образцах расплавов подземных льдов, полученных в результате инкубации в течение 61 дня.

Темные столбцы – интактные варианты, белые столбцы – фильтрованные варианты. Для параллельных измерений ($n = 2$) показаны осредненные данные (ВД2пл, ВД3пл, Нжл). Остальные усл. обозн. см. на рис. 1.

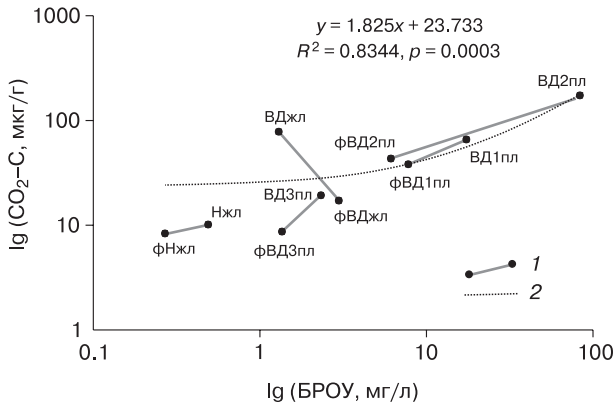


Рис. 7. Корреляция между содержанием биоразлагаемого растворенного органического углерода (БРОУ) и кумулятивной эмиссией CO_2 , измеренными в результате эксперимента по аэробной инкубации (61 день).

1 – соединение точек, маркирующих значения по фильтрованным (ф) и интактным образцам расплавов подземных льдов; 2 – линия регрессии. Остальные усл. обозн. см. на рис. 1, 5.

значений БРОУ интактных вариантов к фильтрованным составляют в порядке убывания: 13.2 (ВД2пл), 2.23 (ВД1пл), 1.81 (Нжл), 1.56 (ВД3пл). Эта особенность противоречит исходным предположениям авторов, согласно которым более интенсивный расход РОУ должен наблюдаться в фильтрованных вариантах, где РОВ служит единственным источником энергии для аэробной хемоорганотрофной микробиоты, тогда как для интактных расплавов предполагается дополнительный источник ОВ, связанный с твердой фазой (ВОВ), который гипотетически может обеспечить компенсацию убыли РОУ в ходе его биогенной минерализации. Следовательно, нельзя исключить версию, согласно которой более интенсивный расход РОУ и более высокие значения эмиссии CO_2 в интактных пробах обусловлены не высвобождением в раствор дополнительной его порции из ВОВ, а связаны с активацией биогеохимических процессов в присутствии твердого материала, задействующих исходный РОУ. Однако в рамках данной работы рассматривается достаточно узкий набор экспериментальных вариантов и переменных, поэтому авторы отдают предпочтение более прямолинейной гипотезе высвобождения лабильного РОВ из твердой фазы расплавов (за счет десорбции и растворения), которая основывается на сопоставлении значений кумулятивной эмиссии CO_2 в интактных и фильтрованных вариантах расплавов. Очевидно, что образец пластового льда ВД2пл выделяется наибольшим влиянием твердой фракции на минерализацию РОУ, а образец Нжл примечателен обратной тенденцией,

где большая величина БРОУ отмечена для фильтрованного варианта. Дальнейшие, более детальные исследования должны приблизить нас к пониманию полученных закономерностей распределения значений БРОУ.

На рис. 7 представлена зависимость между значениями кумулятивной эмиссии CO_2 и концентрациями БРОУ в расплавах подземных льдов, которая демонстрирует значимую положительную корреляцию ($R^2 = 0.82$, $p = 0.003$). Обе оси имеют логарифмическую размерность для более наглядного представления данных в области низких значений переменных. Очевидна ранее упомянутая особенность, где для большинства образцов наблюдается более значительная убыль РОУ в интактных вариантах по сравнению с фильтрованными, сопряженная с более интенсивной эмиссией CO_2 . Единственным исключением из этого тренда является проба жильного льда ВДжл, отображенная на НИС “Васькины Дачи”, где интактный образец демонстрирует непропорционально высокие значения эмиссии CO_2 (78.035 $\text{CO}_2\text{-C}$, мкг/г) в сочетании со сравнительно низкими значениями БРОУ. Формально это можно объяснить компенсацией убыли РОУ за счет экстракции из твердой фазы. Учитывая довольно низкое содержание твердой фракции в расплаве ВДжл (2.95 мас.%), можно предположить наличие в данном образце слабо преобразованных детритных форм ОВ, которые, растворяясь в водной фазе расплава, пополняют пул лабильного РОВ. Следует также отметить образец пластового льда ВД3пл, который характеризуется сравнительно большей величиной отношения эмиссии CO_2 к содержанию БРОУ, чем остальные расплавы, за исключением ВДжл. Этот факт трудно интерпретировать однозначно на данном этапе исследований, но он безусловно характеризует специфику состава РОВ, утилизируемого аэробной хемоорганотрофной микробиотой в ходе инкубации. По-видимому, зависимость содержаний БРОУ от значений кумулятивной эмиссии CO_2 представляет собой перспективный инструмент для анализа экспериментальных данных и дифференциации образцов подземных льдов в отношении локального цикла углерода. Дальнейшие исследования с монолитами подземных льдов на уровне химического состава растворенного и взвешенного ОВ в совокупности с измерениями эмиссии CO_2 и содержаний БРОУ позволят объяснить закономерности, полученные в работе, и усовершенствовать диагностический подход, основанный на результатах экспериментальной инкубации.

Полученные результаты свидетельствуют о достаточно высокой лабильности РОВ подземных льдов, а также о сложных взаимодействиях между РОВ и ВОВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали, что динамика генерации CO_2 отражает два временных этапа мобилизации лабильного ОВ в локальный цикл углерода, где первый этап связан с использованием исключительно РОВ подземных льдов, а второй обусловлен мобилизацией лабильного ОВ из твердой фракции расплавов подземных льдов. Максимальное измеренное значение кумулятивной эмиссии CO_2 в 17 раз превышает минимальное, что говорит о высокой вариабельности потенциала эмиссии CO_2 оттаивающими подземными льдами.

Для образцов подземного льда, относительно обогащенных твердой фракцией, продемонстрирована решающая роль взвешенного органического вещества (ассоциированного с твердой фракцией расплавов) в качестве источника биолабильного РОВ, минерализуемого аэробной микробиотой с выделением CO_2 . При этом относительный вклад твердого материала неоднороден, что свидетельствует о роли его состава на потенциал эмиссии диоксида углерода.

Инкубационные эксперименты демонстрируют существенную убыль биоразлагаемого РОУ (до 65.91 % за 61 день), что свидетельствует о высокой лабильности органического вещества подземных льдов. Обнаружена значимая положительная корреляция ($R^2 = 0.82$) между значениями кумулятивной эмиссии CO_2 и значениями БРОУ в расплавах подземных льдов. При этом более высокие значения БРОУ в интактных вариантах по сравнению с фильтрованными (где РОВ служит единственным источником углерода для генерируемого CO_2) характерны для большинства образцов подземных льдов. Это говорит о сложных и многогранных взаимодействиях между РОВ и ВОВ, которые не вписываются в механистические представления.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 23-27-00123).

Литература

Алексеева Н.К., Евграфова С.Ю., Децура А.Е. и др. Микробная доступность органического вещества в донных отложениях арктических озер: лабораторный инкубационный эксперимент // Проблемы Арктики и Антарктики, 2021, т. 67, № 1, с. 100–121.

Дворников Ю.А., Лейбман М.О., Хайм Б. и др. Термоденудация на Ямале – источник увеличения концентрации растворенного органического вещества в озерах // Криосфера Земли, 2017, т. XXI, № 2, с. 33–42.

Задорожная Н.А., Облогов Г.Е., Васильев А.А. и др. Метан в мерзлых и оттаивающих отложениях западной Арктики // Криосфера Земли, 2022, т. XXVI, № 5, с. 41–55.

Лейбман М.О., Хомутов А.В. Стационар “Васькины Дачи” на центральном Ямале: 30 лет исследований // Криосфера Земли, 2019, т. XXIII, № 1, с. 91–95.

Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е. и др. Метан в подземных льдах и мерзлых отложениях на побережье и шельфе Карского моря // Лед и снег, 2018, т. 58, № 1, с. 65–77.

Хомутов А.В., Дворников Ю.А., Бабкина Е.А. и др. Мониторинг термоденудационных процессов на полуострове Ямал полевыми и дистанционными методами // Материалы конф. “Современные проблемы географии и геологии” (Томск, 16–19 дек. 2017), 2017, т. 1, № 4, с. 190–194.

Battin T.J., Kaplan L.A., Findlay S. et al. Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks // Nat. Geosci., 2008, vol. 1, p. 95–100.

Brouchkov A., Fukuda M. Preliminary measurements on methane content in permafrost, Central Yakutia, and some experimental data // Permafr. Periglac. Process., 2002, vol. 13, p. 187–197.

Dean J.F., Middelburg J.J., Röckmann T. et al. Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world // Rev. Geophys., 2018, vol. 56, No. 1, p. 207–250.

Groeneveld M., Catalán N., Attermeyer K. et al. Selective adsorption of terrestrial dissolved organic matter to inorganic surfaces along a Boreal inland water continuum // J. Geophys. Res.-Biogeo., 2020, vol. 125, No. 3.

Heinz M., Zak D. Storage effects on quantity and composition of dissolved organic carbon and nitrogen of lake water, leaf leachate and peat soil water // Water Res., 2018, vol. 130, p. 98–104.

Ioffe B.V., Vitenberg A.G. Head-space analysis and related methods in gas chromatography. New York, Wiley, 1984, 276 p.

Knoblauch C., Beer C., Liebner S. et al. Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost // Nat. Clim. Change, 2018, vol. 8, p. 309–312.

Knoblauch C., Beer C., Sosnin A. et al. Predicting long-term carbon mineralization and trace gas production from thawing permafrost of Northeast Siberia // Global Change Biol., 2013, vol. 19 (4), p. 1160–1172.

Kraev G., Schulze E.-D., Yurova A. et al. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils // Atmosphere, 2017, vol. 8, p. 105.

Lee H., Schuur E.A.G., Inglett K.S. et al. The rate of permafrost carbon release under aerobic and anaerobic conditions and its potential effects on climate // Global Change Biol., 2012, vol. 18, p. 515–527.

McCalley C.K., Woodcroft B.J., Hodgkins S.B. et al. Methane dynamics regulated by microbial community response to permafrost thaw // Nature, 2014, vol. 514 (7523), p. 478–481.

McGuire A.D., Lawrence D.M., Koven C. et al. Dependence of the evolution of carbon dynamics in the northern permafrost region on the trajectory of climate change // Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 2018, vol. 115, p. 3882–3887.

Natali S.M., Watts J.D., Rogers B.M. et al. Large loss of CO_2 in winter observed across the northern permafrost region // Nat. Clim. Change, 2019, vol. 9, p. 852–857.

Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskaya I.D. et al. Methane content and emission in the permafrost landscapes of Western Yamal, Russian Arctic // Geosciences, 2020, vol. 10, p. 412.

Pismeniuk A., Semenov P., Veremeeva A. et al. 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, p. 324.

Prijac A., Gandois L., Jeanneau L. et al. Dissolved organic matter concentration and composition discontinuity at the

peat–pool interface in a boreal peatland // *Biogeosciences*, 2022, vol. 19, p. 4571–4588.

Savvichev A., Rusanov I., Dvornikov Y. et al. The water column of the Yamal tundra lakes as a microbial filter preventing methane emission // *Biogeosciences*, 2021, vol. 18, p. 2791–2807.

Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J.G. et al. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle // *Bioscience*, 2008, vol. 58, p. 701–714.

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.

Semenov P., Pismeniuk A., Kil A. et al. Characterizing dissolved organic matter and other water-soluble compounds in ground ice of the Russian Arctic: A focus on ground ice classification within the carbon cycle context // *Geosciences*, 2024, vol. 14, p. 77.

Semenov P.B., Pismeniuk A.A., Malyshev S.A. et al. 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, No. 11, p. 450.

Shakil S., Tank S.E., Kokelj S.V. et al. Particulate dominance of organic carbon mobilization from thaw slumps on the Peel Plateau, NT: quantification and implications for stream systems and permafrost carbon release // *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 15, No. 11, 114019.

Shakil S., Tank S.E., Vonk J.E., Zolkos S. Low biodegradability of particulate organic carbon mobilized from thaw slumps on the Peel Plateau, NT, and possible chemosynthesis and sorption effects // *Biogeosciences*, 2022, vol. 19, No. 7, p. 1871–1890.

Shirokova L.S., Chupakov A.V., Zabelina S.A. et al. Humic surface waters of frozen peat bogs (permafrost zone) are highly resistant to bio- and photodegradation // *Biogeosciences*, 2019, vol. 16, p. 2511–2526.

Tanski G., Lantuit H., Ruttner S. et al. Transformation of terrestrial organic matter along thermokarst-affected permafrost coasts in the Arctic // *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 581, p. 434–447.

Tanski G., Wagner D., Knoblauch C. et al. Rapid CO₂ release from eroding permafrost in seawater // *Geophys. Res. Lett.*, 2019, vol. 46, No. 20, p. 11244–11252.

Textor S.R., Wickland K.P., Podgorski D.C. et al. Dissolved organic carbon turnover in permafrost-influenced watersheds of Interior Alaska: molecular insights and the priming effect // *Front. Earth Sci.*, 2019, vol. 7, p. 275.

Vonk J.E., Mann P.J., Davydov S. et al. High biolability of ancient permafrost carbon upon thaw // *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, p. 2689–2693.

Vonk J.E., Tank S.E., Mann P.J. et al. Biodegradability of dissolved organic carbon in permafrost soils and aquatic systems: a meta-analysis // *Biogeosciences*, 2015, vol. 12, p. 6915–6930.

Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and seawater // *J. Chem. Eng. Data*, 1976, vol. 21, p. 78–80.

Dvornikov Yu.A., Leibman M.O., Heim B. et al. Thermodenudation on Yamal peninsula as a source of the dissolved organic matter increase in thaw lakes. *Earth's Cryosphere*, 2017, vol. XXI, No. 2, p. 28–37.

Zadorozhnaya N.A., Oblogov G.E., Vasiliev A.A. et al. Methane in frozen and thawing sediments of Western Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*, 2022, vol. XXVI, No. 5, p. 35–47.

Leibman M.O., Khomutov A.V. Research station “Vaskiny Dachi” at Central Yamal, 30 years of study. *Earth's Cryosphere*, 2019, vol. XXIII, No. 1, p. 78–82.

Streletskaya I.D., Vasiliev A.A., Oblogov G.E. et al. Methane in ground ice and frozen sediments in the coastal zone and on the shelf of Kara Sea. *Led i sneg [Ice and Snow]*, 2018, vol. 58, No. 1, p. 65–77.

Khomutov A.V., Dvornikov Yu.A., Babkina E.A. et al. Monitoring of thermal denudation processes on the Yamal peninsula by field and remote methods. In: *Proc. of Conf. “Modern problems of geography and geology”* (Tomsk, December 16–19, 2017), 2017, vol. 1, No. 4, p. 190–194 (in Russian).

Battin T.J., Kaplan L.A., Findlay S. et al. Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks. *Nat. Geosci.*, 2008, vol. 1, p. 95–100.

Brouchkov A., Fukuda M. Preliminary measurements on methane content in permafrost, Central Yakutia, and some experimental data. *Permafrost. Periglac. Process.*, 2002, vol. 13, p. 187–197.

Dean J.F., Middelburg J.J., Röckmann T. et al. Methane feedbacks to the global climate system in a warmer world. *Rev. Geophys.*, 2018, vol. 56, No. 1, p. 207–250.

Groeneveld M., Catalán N., Attermeyer K. et al. Selective adsorption of terrestrial dissolved organic matter to inorganic surfaces along a Boreal inland water continuum. *J. Geophys. Res.-Biogeo.*, 2020, vol. 125, No. 3. –

<https://doi.org/10.1029/2019JG005236>

Heinz M., Zak D. Storage effects on quantity and composition of dissolved organic carbon and nitrogen of lake water, leaf leachate and peat soil water. *Water Res.*, 2018, vol. 130, p. 98–104.

Ioffe B.V., Vitenberg A.G. *Head-space analysis and related methods in gas chromatography*. New York, Wiley, 1984, 276 p. DOI: 10.1016/s0021-9673(01)89205-0.

Knoblauch C., Beer C., Liebner S. et al. Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost. *Nat. Clim. Change*, 2018, vol. 8, p. 309–312.

Knoblauch C., Beer C., Sosnin A. et al. Predicting long-term carbon mineralization and trace gas production from thawing permafrost of Northeast Siberia. *Global Change Biol.*, 2013, vol. 19 (4), p. 1160–1172.

Kraev G., Schulze E.-D., Yurova A. et al. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils. *Atmosphere*, 2017, vol. 8, p. 105.

Lee H., Schuur E.A.G., Inglett K.S. et al. The rate of permafrost carbon release under aerobic and anaerobic conditions and its potential effects on climate. *Global Change Biol.*, 2012, vol. 18, p. 515–527.

McCalley C.K., Woodcroft B.J., Hodgkins S.B. et al. Methane dynamics regulated by microbial community response to permafrost thaw. *Nature*, 2014, vol. 514 (7523), p. 478–481.

McGuire A.D., Lawrence D.M., Koven C. et al. Dependence of the evolution of carbon dynamics in the northern permafrost region on the trajectory of climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2018, vol. 115, p. 3882–3887.

Natali S.M., Watts J.D., Rogers B.M. et al. Large loss of CO₂ in winter observed across the northern permafrost region. *Nat. Clim. Change*, 2019, vol. 9, p. 852–857.

References

Alekseeva N.K., Evgrafova S.Yu., Detsura A.E. et al. Availability of arctic lakes organic sediments to microbial degradation: a laboratory incubation experiment. *Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research]*, 2021, vol. 67, No. 1, p. 100–121.

- Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskaya I.D. et al. Methane Content and Emission in the Permafrost Landscapes of Western Yamal, Russian Arctic. *Geosciences*, 2020, vol. 10, p. 412.
- Pismeniuk A., Semenov P., Veremeeva A. et al. 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, p. 324. – <https://doi.org/10.3390/land12020324>
- Prijac A., Gandois L., Jeanneau L. et al. Dissolved organic matter concentration and composition discontinuity at the peat–pool interface in a boreal peatland. *Biogeosciences*, 2022, vol. 19, p. 4571–4588.
- Savvichev A., Rusanov I., Dvornikov Y. et al. The water column of the Yamal tundra lakes as a microbial filter preventing methane emission. *Biogeosciences*, 2021, vol. 18, p. 2791–2807.
- Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadell J.G. et al. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle. *Bioscience*, 2008, vol. 58, p. 701–714.
- 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.
- Semenov P., Pismeniuk A., Kil A. et al. Characterizing dissolved organic matter and other water-soluble compounds in ground ice of the Russian Arctic: A focus on ground ice classification within the carbon cycle context. *Geosciences*, 2024, vol. 14, p. 77.
- Semenov P.B., Pismeniuk A.A., Malyshev S.A. et al. 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, No. 11, p. 450.
- Shakil S., Tank S.E., Kokelj S.V. et al. Particulate dominance of organic carbon mobilization from thaw slumps on the Peel Plateau, NT: Quantification and implications for stream systems and permafrost carbon release. *Environ. Res. Lett.*, 2020, vol. 15, No. 11, 114019.
- Shakil S., Tank S.E., Vonk J.E., Zolkos S. Low biodegradability of particulate organic carbon mobilized from thaw slumps on the Peel Plateau, NT, and possible chemosynthesis and sorption effects. *Biogeosciences*, 2022, vol. 19, No. 7, p. 1871–1890.
- Shirokova L.S., Chupakov A.V., Zabelina S.A. et al. Humic surface waters of frozen peat bogs (permafrost zone) are highly resistant to bio- and photodegradation. *Biogeosciences*, 2019, vol. 16, p. 2511–2526.
- Tanski G., Lantuit H., Ruttner S. et al. Transformation of terrestrial organic matter along thermokarst-affected permafrost coasts in the Arctic. *Sci. Total Environ.*, 2017, vol. 581, p. 434–447.
- Tanski G., Wagner D., Knoblauch C. et al. Rapid CO₂ release from eroding permafrost in seawater. *Geophys. Res. Lett.*, 2019, vol. 46, No. 20, p. 11244–11252.
- Textor S.R., Wickland K.P., Podgorski D.C. et al. Dissolved organic carbon turnover in permafrost-influenced watersheds of Interior Alaska: Molecular insights and the priming effect. *Front. Earth Sci.*, 2019, vol. 7, p. 275.
- Vonk J.E., Mann P.J., Davydov S. et al. High biolability of ancient permafrost carbon upon thaw. *Geophys. Res. Lett.*, 2013, vol. 40, p. 2689–2693.
- Vonk J.E., Tank S.E., Mann P.J. et al. Biodegradability of dissolved organic carbon in permafrost soils and aquatic systems: A meta-analysis. *Biogeosciences*, 2015, vol. 12, p. 6915–6930.
- Yamamoto S., Alcauskas J.B., Crozier T.E. Solubility of methane in distilled water and seawater. *J. Chem. Eng. Data*, 1976, vol. 21, p. 78–80.

*Поступила в редакцию 5 августа 2024 г.,
после доработки – 10 октября 2024 г.,
принята к публикации 14 декабря 2024 г.*