

УДК 551.34:[550.43+550.72]

ГАЗОВЫЙ СОСТАВ И МИКРООРГАНИЗМЫ В ПОДЗЕМНЫХ ЛЬДАХ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Бутаков Владислав Игоревич¹,
vladbutakov@yahoo.com

Слагода Елена Адольфовна¹,
eslagoda@ikz.ru

Заватский Михаил Дмитриевич²,
zavatskijmd@tyuiu.ru

Иванов Вадим Игоревич¹,
ivanovvi.tyum@gmail.com

¹ Институт криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Малыгина, 86.

² Тюменский индустриальный университет,
Россия, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38.

Актуальность. Повышение концентраций парниковых газов в атмосфере является фундаментальной проблемой в масштабах планеты. Источником парниковых газов в приповерхностном горизонте мерзлых пород могут быть как глубинные залежи углеводородов, так и органическое вещество, переработанное микроорганизмами во время оттаивания толщ. Для уточнения источника газа в подземных льдах необходимым этапом является изучение его количества и состава, а также содержания в них микроорганизмов. На фоне развития энергетического комплекса на севере Западной Сибири требуется учитывать геотехнические риски, связанные с высвобождением парниковых газов из мерзлых толщ.

Цель: изучить состав и определить источники парниковых газов во льдах и ледогрунтах с учетом условий формирования льда и содержания в них микроорганизмов.

Объекты: подземные льды повторно-жильного, гидрогенного и сегрегационного генезиса; льдистые мерзлые отложения севера Западной Сибири и Центральной Якутии, собранные экспедициями Института криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН в 2011–2021 гг.

Методы исследования и интерпретации химического состава. Криолитологическими методами изучено строение мерзлых отложений. Монолиты льда и мерзлых пород хранились до проведения анализов при температуре -18°C . Экстракция газа из монолитов с определением объемной доли проведена методом термовакuumной дегазации. Состав газов определен методом газовой хроматографии. Проведена нормализация газового состава на значения растворимости в воде. Рассчитаны объемные доли газа, находящегося в свободной и растворенной в воде форме. Обработка данных осуществлена в программе «Geoset Anotaly». Культивируемые психрофильные микроорганизмы исследованы методом посева на питательные среды; общая численность микроорганизмов определена методом эпифлуоресцентной микроскопии.

Результаты. В подземных льдах и ледогрунтах установлен состав газовых пузырьков: N_2 (74,9–87,8 %), O_2 (11,7–20,3 %), CO_2 (0,01–3,28 %), CH_4 (0,003–7,35 %), H_2 (0,001–0,035 %) и углеводороды с содержанием атомов от 2 до 6 ($2,0 \times 10^{-5}$ – $2,8 \times 10^{-3}$ %). Состав по содержанию N_2 , O_2 близок к атмосферному воздуху. Отмечены большие вариации газонасыщенности (1,1–21,1 %), а также содержания CH_4 и CO_2 . При формировании льда происходило промерзание газонасыщенного раствора, часть воздуха присутствовала в свободной форме (от 30 до 75 % от объема газа). Рассчитанные показатели $\text{CH}_4/(\text{C}_2\text{H}_6+\text{C}_3\text{H}_8)$ и $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_4$ указывают на биогенный генезис углеводородов. Состав газовых пузырьков пересчитан на объем всей пробы: в повторно-жильных, термокарстово-полостных и наледном льдах содержание CH_4 незначительно (в среднем 51, 81 и 1 ppmV соответственно). Незначительные количества CH_4 могли поступать при формировании этих типов льда из отложений деятельного слоя, так как установлена зависимость газового состава от количества включений торфа. В пробах с включениями торфа повышены содержания CH_4 , CO_2 и H_2 . В пластовых льдах повышено содержание CH_4 (216 ppmV). В текстуробразующих льдах накапливался CO_2 (до 3007 ppmV), а в клиновидных льдах обнаружены высокие содержания CH_4 (до 4032 ppmV), так как льды промерзали в замкнутом объеме. Лед торфяного бугра пучения имеет максимальное содержание CH_4 (15545 ppmV) и высокое CO_2 (2466 ppmV), источником которых были вмещающие отложения, заливаемые прибрежно-морскими водами. В подземных льдах определены культивируемые психрофильные микроорганизмы, их максимальные количества выявлены в сегрегационных пластовых – до 1680 КОЕ/мл, в текстуробразующих льдах – до 1032 КОЕ/мл. Высокие концентрации парниковых газов в мерзлом торфе – CO_2 (1075 ppmV), H_2 (9 ppmV), CH_4 (262 ppmV) и других углеводородов обусловлены активной деятельностью микроорганизмов, что приводит к накоплению этих газов. Значительная газонасыщенность и высокие содержания CH_4 и CO_2 указывают на формирование газового состава под воздействием как аэробных, так и анаэробных микроорганизмов.

Ключевые слова:

Парниковые газы, подземные льды, биогенный метан, углекислый газ, газонасыщенные породы, метод термовакuumной дегазации, психрофильные микроорганизмы.

Введение

Высокие концентрации парниковых газов в атмосфере могут быть предвестником начала новой климатической эпохи. Вследствие этого поиск источников парниковых газов является фундаментальной проблемой геоэкологии. Одним из показателей изменения климата является газовый состав ледниковых льдов [1–3]. Газ в мерзлых отложениях и льдах может содержаться в растворенной, свободной, адсорбированной частицами грунта формах, а также в форме гидрата. Во льду растворяются только H_2 , He , Ne , остальные газы практически нерастворимы, так как размеры их молекул превышают размеры каналов во льду. При этом растворенные в воде CO_2 , CH_4 , и N_2 , а также пористость среды и минерализация раствора смещают температуру начала замерзания [4].

Арктическая тундра является поставщиком приблизительно 45 % от всех источников арктического CH_4 и 7 % его глобальных выбросов [5–7]. Высокие потоки CH_4 обнаружены в таликах под термокарстовыми озерами, а эпигенетическое промерзание отложений приводит к образованию газонепроницаемых систем с повышенным давлением [8].

Мерзлые толщи проницаемы для легких углеводородов и газов в зонах разломов [9]. На основе анализа более 250 образцов мерзлых пород, содержащих O_2 и CH_4 , Тазовского района ЯНАО с глубин до 30 м от поверхности сделан вывод о возможном миграционном глубинном происхождении CH_4 [10]. Пропан и бутан также считаются показателями глубинного поступления углеводородов [11]. Зоны повышенной концентрации CO_2 и избыточного содержания H_2 относят к косвенным признакам нефтегазоносности, поскольку это продукты вторичного преобразования углеводородов под влиянием микробиологических, окислительных процессов [12]. Однако льдистые тонкодисперсные отложения практически газонепроницаемы [13–15].

В настоящее время известны три версии происхождения CH_4 в верхней части мерзлых толщ:

1. Катагенетический источник, в котором содержание углеводородов обусловлено вертикальной миграцией из залежей углеводородов [11].
2. Биогенный из анаэробной зоны диагенеза на глубине 800–2200 м, где генерация CH_4 связана с биодеградацией углеводородов метаногенами в анаэробных условиях [12].
3. Биогенный из верхней части разреза, где генерация метана связана с деятельностью метаногенов во время таяния мерзлоты [14].

Метаногены – это археи, которые в результате переработки продуктов распада растительных остатков образуют метан. Большинство ученых считают, что среда, в которой развиваются метаногены, должна быть строго бескислородной [16]. Однако имеются эксперименты по изучению аэротолерантности метаногенных архей, некоторые из которых лояльны к концентрациям O_2 до 20 % [17].

Область развития анаэробных процессов – придонные участки застойных морских и континенталь-

ных водоемов, лишенные доступа свободного кислорода [18]. Археи более выживаемы и имеют самое широкое распространение в современных почвах и отложениях, в морских и озерных водах. Они являются основным источником биогенных газов [19]. Метаногены встречаются в болотах и торфяниках; они также присутствуют в многолетней мерзлоте и на дне ледников [20–25]. В хасырях и болотах тундры установлены наибольшие объемы метана в верхних 25 м многолетнемерзлых пород [8]. Из мерзлых пород выделены и описаны штаммы метанообразующих архей, относящихся к родам *Methanosarcina* и *Methanobacterium* [26, 27].

Нельзя судить об аэробных или анаэробных условиях без учета стратиграфического залегания, приуроченности и литологического состава отложений, условий, типа и стадий промерзания/оттаивания верхней части криолитозоны. При протаивании в толщу попадает вода с растворенным кислородом, т. е. возникают аэрируемые условия. В данной работе под термином «анаэробные условия» следует понимать «условия в системах, где скорость поступления кислорода ниже скорости его потребления на окисление органического вещества» вслед за Е.М. Ривкиной [26]. Наличие культивируемых психрофильных микроорганизмов может быть косвенным признаком метаногенеза. Выявлено, что археи развиваются в тесной ассоциации с аэробными бактериальными спутниками, их совместное культивирование приводило к значительному увеличению продукции метана [27].

Изотопный состав углерода считают важным показателем биогенного источника углеводородов [14, 23]. В газовых месторождениях изотопный состав углерода варьирует между эмпирическими значениями, характерными для углеводородов катагенетического и биогенного происхождения, их распределение по вертикали связано с фракционированием изотопов на легкие и тяжелые [28]. Фракционирование при промерзании грунтов также приводит к изменению соотношения изотопов кислорода и дейтерия в сегрегационных льдах [29]. С учетом изложенного представления о миграционном глубинном или биогенном происхождении метана и других углеводородов в верхних частях мерзлых толщ остаются дискуссионными.

В связи с активным индустриальным развитием арктических регионов Западной Сибири необходимо изучить природу опасных для инженерных сооружений процессов – возникновения газопроявлений из верхней части мерзлых пород, содержащих подземные льды.

Район и объекты исследования

В 2017–2021 гг. были изучены разрезы на ключевых участках севера Западной Сибири: о. Белый, Гыдане, Ямале, Пур-Тазовском междуречье (рис. 1), и в нижнем течении р. Вилюй (Якутия). Районы исследования расположены в зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород. Исследования многолетнемерзлых толщ включали описание литологических и морфологических особенностей; определение физических и химических характеристик пород; от-

бор монолитов льда, изучение его структурно-текстурных особенностей, химический анализ ионно-го, микрокомпонентного и газового состава льда.



Рис. 1. Расположение ключевых участков исследований льдов и мерзлых пород на севере Западной Сибири

Fig. 1. Key areas of studying ground ice and permafrost sediments in the north of Western Siberia

На о. Белый, в пределах высокой лайды, затопляемой прибрежно-морскими водами, изучено линзовидное ядро сегрегационного льда торфяного бугра пучения [30].

На севере п-ва Гыдан (с. Гыда), в пределах II надпойменной террасы, изучен линзовидный лед инфильтрационно-сегрегационного генезиса [31] мощностью 0,3 м, пересекающий повторно-жильный лед (ПЖЛ). Лед залегает в мерзлой аллювиальной толще между слоями внизу – льдистого песка, сверху – суглинка с линзовидно-сетчатой криогенной текстурой.

На Центральном Ямале (геокриологический стационар Васькины Дачи) в пределах холмистовувалистых казанцевской и салехардской III, IV равнин в термоцирках изучены залежи пластовых льдов (ПЛ), ПЖЛ, термокарстово-полостные льды. ПЛ субгоризонтальные и складчатые залегают в засоленных суглинках, глинах. ПЖЛ залегают в перекрывающих супесях и песках, их нижние концы внедряются в пласт льда на глубину около 3 м [32].

На Западном Ямале (м. Марре-Сале), в пределах III морской равнины, изучены сегрегационные льды пластовых залежей субгоризонтальной и диапировой формы, которые залегают в таберальном комплексе марресальской свиты. Клиновидные гидрогенные (кристаллизовавшиеся из свободной воды) и сегрегационные льды (образованные из разжиженного грунта) внедряются в ПЛ и залегают в синкриогенных тонких песках и супесях. Мерзлая толща с размывом перекрыта слоистыми песками и супесями [33].

На севере Пур-Тазовского междуречья, в пределах III озерно-аллювиальной равнины, изучен синкрио-

генный торфяник с массивной, корковой, шлировой, слоистой криогенными текстурами, ПЖЛ и термокарстово-полостными льдами [34].

В Центральной Якутии изучены ПЖЛ ледового комплекса, залегающие в каргинско-сартанских делювиально-пролювиальных пылеватых супесях и суглинках, вскрытые на левом 30-метровом берегу в низовьях р. Виллюй (по устному сообщению В.Е. Тумского). В этом же районе изучена наледь мощностью 5 м, залегающая в подножье песчаного золотого массива [35].

Методы исследования и интерпретации результатов

Криолитологическими методами изучено строение мерзлых отложений и отобраны монолиты льда и мерзлых пород. Монолиты хранили до проведения анализов при температуре -18°C . Проанализированы составы атмосферных и парниковых газов в 21 монолите льда и 9 монолитах ледогрунта. Газ извлекали в Учебно-научной лаборатории ТИУ в дегазационном приборе вакуумным насосом после термостатирования пробы в течение 20–30 мин при температуре $70\text{--}75^{\circ}\text{C}$ [36]. При дегазации измерены объемы льда и извлеченного газа. Объемная доля газа во льдах и ледогрунтах рассчитана для температуры 0°C . Определены содержания N_2 , O_2 , CO_2 , H_2 , He , алканов и алкенов с числом углеродных атомов от 1 до 6 и их изомеров ($\text{C}_2\text{--C}_6$) методом газовой хроматографии.

Проведено сравнение и нормализация содержаний газа в пробах с содержанием газа в атмосфере, со значениями растворимости воздуха [37] и других газов в воде [38–43]. Рассчитаны объемные доли газа, находящегося в свободной и растворенной в воде форме. Так как в пробах количество воздуха превышало предел его растворимости в воде при 0°C и давлении 1 атм., а количества CO_2 , CH_4 , H_2 , $\text{C}_2\text{--C}_6$ были значительно ниже предела растворимости, то растворенный в воде газ рассчитывали как сумму предела растворимости воздуха в воде и содержаний CO_2 , CH_4 , H_2 , $\text{C}_2\text{--C}_6$.

Для выявления метаногенеза в отложениях учитывали фоновые концентрации углеводородов: в морских отложениях метан содержится в концентрациях до 100 ppmV, а легкие углеводороды $\text{C}_2\text{--C}_3$ – от 0,01 до 2,0 ppmV. Один из методов определения происхождения газа – по составу углеводородов. Если соотношение $\text{CH}_4/(\text{C}_2\text{H}_6+\text{C}_3\text{H}_8)$ более 1000, значит, газ биогенный, если менее 50, то термогенный; если соотношение $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_4$ более 1000, значит, газ термогенный [44].

В 29 пробах льда М.Ю. Суловой проведен анализ микроорганизмов (МО) в ПЖЛ, ПЛ, текстурообразующих льдах Ямала и ледниковом льду полярного Урала. Анализ проведен в Лаборатории водной микробиологии ЛИИ СО РАН. Монолиты льда были очищены в стерильных условиях и расплавлены при температуре 4°C [45]. Методом посева на питательную среду R2A:10 определена численность психрофильных МО, растущих при низких температурах в течение двух месяцев, а также методом эпифлуоресцентной микроскопии определена общая численности МО.

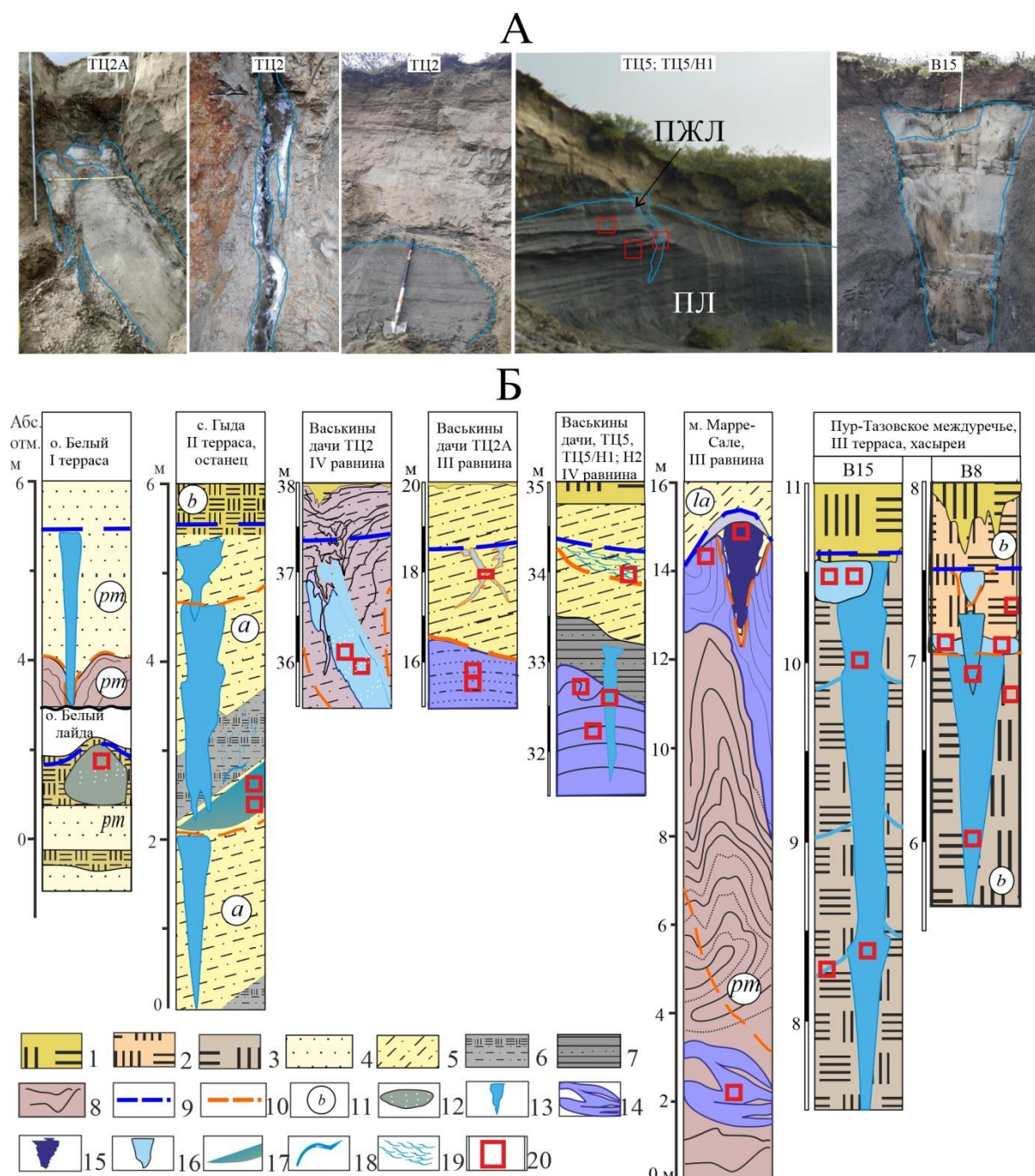


Рис. 2. Подземные льды в естественных обнажениях в расчистках 2011–2021 гг.: B15, TC-5H/1, TC-2A, TC-2, TC-5, TC5H/2 (А); строение отложений и разновидности подземных льдов в голоценовых и верхнеплейстоценовых отложениях на севере Западной Сибири (Б): 1 – мох свежий; 2 – торф криотурбированный с линзами и шлирами льда; 3 – торф автохтонный синкриогенный; 4 – пески засоленные; 5 – пески пылеватые; 6 – слоистые суглинки, супеси заторфованные; 7 – глины, суглинки; 8 – таберальные комплексы: суглинки, супеси и пески; 9 – граница сезонно-талого слоя; 10 – реликтовая граница сезонно-талого слоя; 11 – генезис отложений: а – аллювиальный, б – биогенный, la – озерно-аллювиальный, pm – прибрежно-морской, dl – делювиально-пролювиальные; 12 – лед бугра пучения; 13 – ПЖЛ; 14 – ПЛ; 15 – клиновидный лед; 16 – термокарстово-полостной лед; 17 – линзовидный лед; 18 – текстуробразующий лед; 19 – ледогрунт с линзовидно-сетчатыми текстурами; 20 – места отбора проб

Fig. 2. Ground ice in natural sites in 2011–2021: V15, TC-5N/1, TC-2A, TC-2, TC-5, TC-5N/2 (A); structure of deposits and types of ground ice in Holocene and Upper Pleistocene sediments in the north of Western Siberia: 1 – moss; 2 – cryoturbated peat with ice lenses and belts; 3 – peat atochthonous syncryogenic; 4 – saline sands; 5 – fine sands; 6 – layered loam, sandy loam with plant remains; 7 – clay, loam; 8 – taberal complex: loam, sandy loam and sands; 9 – recent base of active layer; 10 – relict base of active layer; 11 – genesis of deposits: a – alluvial, b – biogenic, la – lacustrine-alluvial, pm – coastal-marine; dl – deluvial-proluvial; 12 – pingo ice; 13 – ice wedge; 14 – massive ice; 15 – wedge-shaped ice; 16 – closed-cavity ice; 17 – lens-shaped ice; 18 – texture ice; 19 – ground ice with lenticular-mesh textures; 20 – location of sampling points for studies of gas composition

Проведен парный линейный корреляционный анализ содержания газов во льдах с оценкой средне-квадратичного отклонения (R^2). Корреляционная связь содержаний N_2 , O_2 и CO_2 в объеме льда с газонасыщенностью льда интерпретирована как показатель атмосферного генезиса этих газов. Связь содержаний CH_4 с газонасыщенностью интерпретирована как показатель значительного накопления CH_4 в изученных типах льда. Отрицательная корреляция содержаний O_2 с CO_2 в различных типах льда интерпретирована как показатель преобразования атмосферного воздуха при аэробном дыхании. Обработка данных проведена в программе «Geoschem Anomaly».

Результаты и их обсуждение

Исследования показали, что объемная доля извлеченного газа сильно варьирует (табл. 1) в изученных льдах и ледогрунтах, что связано с условиями формирования льдов. Эти газы содержались в воде, служившей источником формирования льда, как в растворенной, так и в свободной форме и сохранились во

льду в виде газовых пузырьков [46]. Во всех изученных пробах содержание N_2 больше, чем в атмосферном воздухе и ледниковом льду [47, 48], а содержание O_2 ниже вследствие его потребления аэробными бактериями [49]. Содержание CO_2 , CH_4 , H_2 и C_2-C_6 значительно выше, чем в воздухе (табл. 2). Состав газа во льдах отличается от состава внутримерзлотного газа, отобранного из криогенной толщи Бованенковского месторождения, состоящего в основном только из CH_4 [50].

Содержание CH_4 варьирует в широком диапазоне (рис. 3), что свидетельствует о его поступлении или его продуцировании до промерзания и льдовыделения.

Максимальные содержания CO_2 обнаружены в торфе, где происходит активное разложение органического вещества, в текстурообразующих льдах отложений с разным содержанием органических остатков и во льду торфяного бугра пучения. Такой состав, по-видимому, связан с внутригрунтовым промерзанием в замкнутых условиях.

Таблица 1. Состав газа во льдах и ледогрунтах в об. %
Table 1. Gas composition in ice and ice-rich soil in vol. %

Содержание Content	Доля газа при 0 °C Gas share at 0 °C	N_2	O_2	CO_2	CH_4	H_2	C_2-C_6
min	1,1	74,9	11,7	0,01	0,003	0,001	$2,0 \times 10^{-5}$
max	21,1	87,8	20,3	3,28	7,352	0,035	$2,8 \times 10^{-3}$
mean	6,9	80,3	17,6	0,59	0,586	0,008	$4,2 \times 10^{-4}$

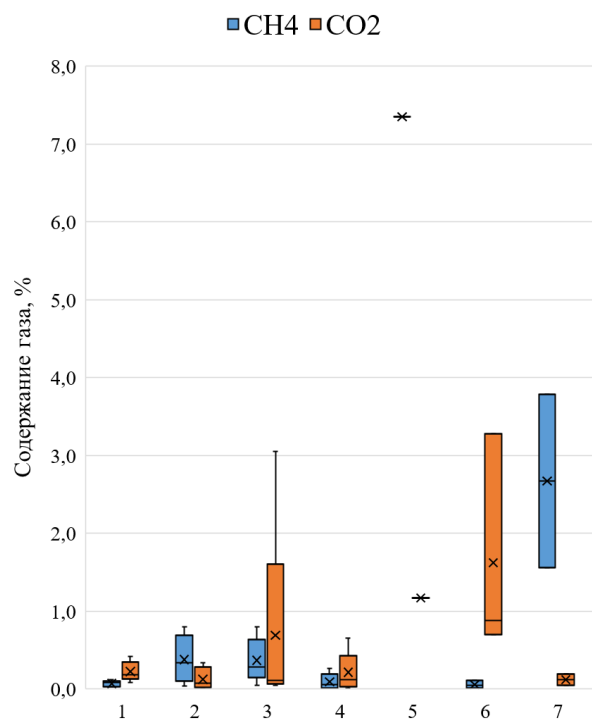


Рис. 3. Вариации содержания CH_4 и CO_2 в разных типах льда и ледогрунта: 1 – ПЖЛ; 2 – ПЛ; 3 – льдистый торф; 4 – термокарстово-полостные льды; 5 – лед бугра пучения; 6 – текстурообразующие льды; 7 – клиновидные льды

Fig. 3. Content of CH_4 and CO_2 in different types of ice and ice-rich soils: 1 – ice wedge; 2 – massive ice; 3 – ice peat; 4 – closed-cavity ice; 5 – pingo ice; 6 – texture ice; 7 – hydrogenic wedge-shaped ice

Содержание H_2 и углеводородов C_2-C_6 максимально в торфе, что обусловлено разложением органических веществ, так как H_2 является побочным продуктом разложения органического вещества [51].

Количество N_2 в 2–7 раз выше пределов растворимости в воде (рис. 4). Количество O_2 , CO_2 , CH_4 , H_2 , C_2-C_6 значительно ниже предела растворимости. В 11 пробах из гидрогенных и сегрегационных льдов выявлены концентрации CH_4 выше фоновых значений (>100 ppmV, табл. 2).

Соотношение $CH_4/(C_2H_6 + C_3H_8)$ в текстурообразующих льдах осадочных пород и наледном льду менее 1000, но так как в этих льдах содержания углеводородов близки к пределу обнаружения метода, то высока вероятность аналитической ошибки. В других типах льда средние значения соотношений $CH_4/(C_2H_6 + C_3H_8)$ превышают 1000, а соотношение C_2H_6/C_2H_4 варьирует от 0 до 7, что является показателем биогенного происхождения газа [44].

Рассчитаны значения превышения предела растворимости в воде при 0 °C для каждого газа (рис. 4). Наибольшие вариации этих значений выявлены для CO_2 и CH_4 , что связано с продуцированием этих газов в немерзлых породах. Во всех типах льда количество газа превышает предел растворимости воздуха в воде (табл. 3). Рассчитано содержание и соотношение газа в воде до ее промерзания: в растворенной форме – 25–70 %, в свободной форме – 30–75 %.

В ПЖЛ, ПЛ, термокарстово-полостных, текстурообразующих льдах обнаружены культивируемые психрофильные МО (табл. 3), в ледниковом льду культивируемых МО не обнаружено.

Таблица 2. Состав газов, извлеченных из льдов и ледогрунтов

Table 2. Composition of gases entrapped from ice and ice-rich soil

Тип и количество проб Type and number of samples	Содержание Content	Доля газа Gas share, %	Состав газа, об. % Gas composition, vol. %						Количество газа в объеме пробы льда, ppmV Amount of gas in the sample volume, ppmV					CH ₄ / (C ₂ H ₆ +C ₃ H ₈)	C ₂ H ₆ /C ₂ H ₄
			N ₂	O ₂	CO ₂	CH ₄	H ₂	C ₂ -C ₆	CO ₂	CH ₄	H ₂	C ₂ -C ₄	C ₅ -C ₆		
Атмосферный воздух Atmospheric air [53]	–	–	78,1	20,9	0,03	2×10 ⁻⁴	5×10 ⁻⁵	–	320	1,8	0,5	–	–	–	–
Ледниковый лед Glacial ice [48]	–	–	78,1	20,7	0,04	0,002	< 0,01	–	400	20	–	–	–	–	–
ПЖЛ (6) Ice wedge	min	4,9	79,7	11,9	0,08	0,027	0,001	2,0×10 ⁻⁵	39,8	15,5	1,5	0,04	<0,01	65	0,0
	max	19,9	87,8	19,0	0,42	0,125	0,007	8,4×10 ⁻⁴	750,2	79,7	5,2	0,35	0,06	8 869	3,9
	mean	7,7	81,9	16,7	0,25	0,065	0,005	2,2×10 ⁻⁴	246	50,6	3,1	0,11	0,02	4 991	0,7
Термокарстово- полостной лед (8) Closed-cavity ice	min	1,1	78,7	17,2	0,01	0,008	0,003	4,8×10 ⁻⁵	3,4	1,3	0,6	0,01	<0,01	715	0,0
	max	10,5	82,1	19,8	0,65	0,411	0,012	3,1×10 ⁻⁴	355	260	8,6	0,07	0,01	12 893	0,2
	mean	5,0	80,6	18,4	0,17	0,122	0,007	1,1×10 ⁻⁴	101	81,4	3,6	0,04	<0,01	3 573	0,0
Наледь (1) Icing	–	4,2	80,6	19,3	0,08	0,003	0,013	1,7×10 ⁻³	33,6	1,2	5,4	0,70	0,01	4	1,5
ПЛ (4) Massive ice	min	3,5	78,3	17,8	0,02	0,044	0,002	6,8×10 ⁻⁵	20,8	29,7	2,0	<0,01	<0,01	621	0,0
	max	8,3	80,9	20,3	0,41	0,799	0,013	1,1×10 ⁻⁴	278	308	7,5	0,07	<0,01	30 335	2,0
	mean	6,7	79,9	18,9	0,22	0,378	0,008	8,8×10 ⁻⁵	153	216	4,6	0,04		13 097	0,7
Лед бугра пучения (1) Pingo ice	–	21,1	74,9	15,7	1,17	7,352	0,001	5,8×10 ⁻⁴	2 466	15 545	1,9	0,58	0,65	92 404	–
Клиновидный лед (2) Hydrogenic wedge- shaped ice	min	6,5	78,4	11,7	0,04	1,555	0,002	1,8×10 ⁻⁴	47,3	1 018	2,2	< 0,01	<0,01	48 962	0,0
	max	10,7	85,7	15,8	0,19	3,785	0,004	1,9×10 ⁻⁴	126	4 032	2,9	0,19	0,01	83 827	0,0
	mean	8,6	82,0	13,8	0,12	2,670	0,003	1,8×10 ⁻⁴	86,6	2 525	2,5	0,10	<0,01	66 394	0,0
Льдистый торф (5) Ice peat	min	2,0	78,4	16,9	0,16	0,051	0,006	4,2×10 ⁻⁴	31,0	10,2	3,7	0,24	<0,01	57	0,0
	max	10,4	80,0	19,4	3,05	0,803	0,035	2,8×10 ⁻³	3 172	836	13,0	0,94	0,08	13 127	3,0
	mean	5,3	79,3	17,6	1,55	0,368	0,020	1,2×10 ⁻³	1 075	262	8,5	0,45	0,03	3 234	0,6
Текстуробразующий лед (3) Texture ice	min	4,9	78,1	17,6	0,70	0,006	0,001	2,7×10 ⁻⁴	433	4,4	1,0	0,25	<0,01	25	0,9
	max	9,2	79,9	18,3	3,28	0,109	0,010	7,2×10 ⁻⁴	3 007	58,6	4,7	0,36	0,07	239	6,7
	mean	7,0	79,1	17,9	1,62	0,054	0,004	5,3×10 ⁻⁴	1 312	34,0	2,4	0,31	0,04	157	3,8

Таблица 3. Значения превышений растворимости воздуха, формы нахождения газа в воде до промерзания и содержание МО в разных типах льда

Table 3. Values of air solubility excess, forms of gas presence in water before freezing and the content of microorganisms in different types of ice

Тип льда Ice type	Значение превыше- ний растворимости воздуха в воде Value of air solubility excess in water	Доля газа Gas share, %		Содержание Content	Культивируемые пси- хрофильные МО, КОЕ/мл Cultivated psychrophilic microorganism CFU/ml	Общая числен- ность МО, кл/мл×10 ⁶ Total microorganism number, cells/ml×10 ⁶
		в растворенной форме in dissolved form	в свободной форме in free form			
Ледник Романчиков Romantic Glacier	–	–	–	–	0	10
ПЖЛ Ice wedge	2,9	35	65	min	6	11
				max	631	25
				mean	175	16
Термокарстово- полостной лед Closed-cavity ice	1,7	59	41	min	39	13
				max	129	18
				mean	95	16
Наледь Icing	1,4	70	30	–	–	–
ПЛ Massive ice	2,3	44	56	min	3	7
				max	1680	138
				mean	200	33
Лед бугра пучения Pingo ice	6,6	25	75	–	–	–
Клиновидный лед Hydrogenic wedge- shaped ice	2,8	39	61	–	–	–
Льдистый торф Ice peat	1,8	59	41	–	–	–
Текстуробразую- щие льды Texture ice	2,3	45	55	min	414	13
				max	1032	19
				mean	723	16

Максимальные количества психрофильных МО выявлены в ПЛ (до 1680 КОЕ/мл), имеющем в химическом составе повышенные содержания, относи-

тельно других льдов, ионов NH₄⁺ (2,2 мг/л) и PO₄⁻³ (0,2 мг/л), благоприятно влияющих на рост МО [52]. Высокие количества психрофильных МО установле-

ны в текстуробразующих (до 1032 КОЕ/мл) льдах осадочных пород. Эти льды, которые формировались при промерзании грунтовой влаги или разжиженного дисперсного грунта, содержащего продукты жизнедеятельности бактерий, образованных при разложении органических веществ, относятся к сегрегационному типу. Промерзание сопровождалось разделением на ледяные включения, мерзлую породу и вытеснением газа в пузырьки.

Общая численность МО слабо варьирует в ПЖЛ, термокарстово-полостных и текстуробразующих льдах. Значительные различия установлены только в ПЛ (рис. 2, м. Марре-Сале). Максимальные значения общей численности МО в ПЛ обусловлены формированием льда в засоленных прибрежно-морских отложениях, содержащих органические вещества и соли, необходимые для роста МО [52].

Большие количества психрофильных МО в ПЖЛ являются результатом поступления вод деятельного слоя с растворенными органическими веществами. Клиновидный гидрогенный лед (рис. 2, м. Марре-Сале) содержит органо-минеральные примеси в больших количествах, что позволяет предполагать присутствие МО.

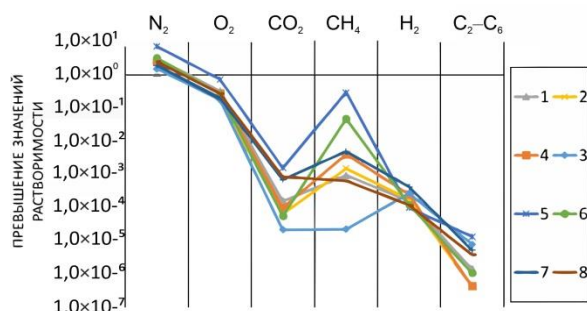


Рис. 4. Превышение предела растворимости газов в воде в разных типах льда: 1 – ПЖЛ; 2 – термокарстово-полостные; 3 – наледный; 4 – ПЛ; 5 – лед бугра пучения; 6 – клиновидные льды; 7 – льдистый торф, 8 – текстуробразующие льды

Fig. 4. Exceeding the limit of solubility of gases in water in different types of ice: 1 – ice wedge; 2 – thermokarst-cavity; 3 – icing; 4 – massive ice; 5 – pingo ice; 6 – hydrogenic wedge-shaped ice; 7 – ice peat; 8 – texture ice

Повторно-жильный лед

Лед, залегающий в органическом горизонте отложений и имеющий тонкие прожилки торфа (рис. 2, В8, В15), отличается невысокой газонасыщенностью (4,9–6,8 %) и повышенным содержанием CH_4 (0,03–0,12 %), CO_2 (0,08–0,42 %) и H_2 (0,003–0,007 %). ПЖЛ, залегающий в супесях и суглинках, имеет высокую газонасыщенность (7,0–19,9 %), а содержания CH_4 (0,04–0,09 %) и CO_2 (0,09–0,38 %) ниже, чем во льду с торфом.

Льды характеризуются высокой газонасыщенностью за счет морозобойного растрескивания и формирования льда за счет зимних атмосферных осадков и сублимационных водяных паров на стенках трещин [54]. Содержания O_2 имеют отрицательную корреля-

цию с N_2 , CH_4 и H_2 ($R^2=0,6–0,8$), корреляция O_2 и CO_2 отсутствует. Наблюдается зависимость содержаний N_2 , O_2 , CO_2 от газонасыщенности льда ($R^2=0,9–1,0$), следовательно, можно судить об атмосферном генезисе этих газов. Содержания CH_4 и H_2 не зависят от газонасыщенности.

Содержания углеводородов $\text{C}_2–\text{C}_6$ коррелируют между собой ($R^2=0,6–0,9$). Максимальные содержания углеводородов и углеводороды $\text{C}_5–\text{C}_6$ выявлены во льдах, залегающих в торфе. Большое количество психрофильных МО и повышенное относительно атмосферного воздуха содержание CO_2 , CH_4 и других углеводородов обусловлено поступлением органических соединений из деятельного слоя и диффузией из отложений на контакте со льдом [55].

Термокарстово-полостной лед

Лед (рис. 2, В8, В15) с включениями торфа имеет повышенную долю газа 4,2–10,2 %, высокие содержания CH_4 (0,17–0,26 %), CO_2 (0,35–0,65 %) и H_2 (0,005 %). Лед без включений торфа отличается низкой долей газа 1,1–4,8 % с незначительно повышенным содержанием CH_4 (0,01–0,04 %).

Термокарстово-полостной лед (рис. 2, ТЦ-2, ТЦ-2А), залегающий в песках и супесях с включениями неразложившейся органики, обладает долей газа 1,6–7,3 % и повышенными содержаниями CH_4 (0,01–0,41 %) и H_2 (0,003–0,012 %).

Содержания O_2 имеют обратную корреляцию с количеством N_2 и CO_2 ($R^2=0,5–0,75$), следовательно, происходило аэробное дыхание МО до промерзания льда. Наблюдается зависимость содержаний N_2 , O_2 , CH_4 , от газонасыщенности льда ($R^2=0,5–1,0$). Содержания H_2 и CO_2 слабо зависят от газонасыщенности ($R^2=0,4$).

В ПЖЛ и термокарстово-полостных льдах, залегающих в торфе, установлена зависимость газового состава от количества органических включений в составе льда. В пробах льда с включениями торфа повышены содержания CH_4 , CO_2 и H_2 . Незначительные концентрации CH_4 могут поступать в эти льды из перекрывающих отложений деятельного слоя.

Наледь

Лед наледи горизонтально слоистый за счет пузырьков газа. Состав газа во льду близок к составу атмосферного воздуха с повышенным содержанием H_2 (0,013 %), который может поступать из нижележащих пород и растворяться во льду. Формирование льда происходило за счет поступления вод источника, расположенного внизу эолового песчаного массива.

Пластовые льды

Лед, залегающий в песчаных породах (рис. 2, м. Марре-Сале), характеризуется составом газа близким к атмосферному, с небольшим повышением CH_4 (0,04 %). Лед формировался за счет опресненных вод при промерзании талика в отложениях с низким содержанием органического вещества.

Во льдах сильно варьирует состав газа, возможно, из-за включений разного литологического состава. Лед

с песчаными прослоями (рис. 2, ТЦ2А) имеет повышенную газонасыщенность (8,2 %) и содержания CH_4 (0,30 %) и CO_2 (0,34 %). Лед с супесчаными прослоями отличается низкой долей газа (3,5 %), но высокими содержаниями CH_4 (0,80 %), CO_2 (0,11 %) и H_2 (0,013 %). Лед с прослоями суглинка и глины (рис. 2, ТЦ5) обладает повышенной долей газа (8,3 %) и содержаниями CH_4 (0,37 %) и H_2 (0,009 %). Высокие содержания CH_4 обусловлены формированием льда в засоленных отложениях, содержащих органическое вещество [50].

Содержания O_2 имеют обратную корреляцию с количеством N_2 и H_2 ($R^2=0,8-0,9$). Корреляции O_2 с CO_2 и CH_4 отсутствуют. Наблюдается зависимость содержаний N_2 , O_2 от газонасыщенности льда ($R^2=1,0$), следовательно, можно судить об атмосферном генезисе этих газов. Содержания CO_2 , CH_4 и H_2 не зависят от газонасыщенности. ПЛ отличаются повышенным содержанием CH_4 . Большие вариации количества МО обусловлены сегрегационным генезисом льда и, как следствие, неоднородным химическим составом льда по вертикали [33].

Лед бугра пучения

Лед (рис. 2, о. Белый) отличается высокой газонасыщенностью (21,1 %) и составом с низким содержанием O_2 (15,7 %), а также высоким содержанием CH_4 (7,4 %) и CO_2 (1,2 %). CH_4 и CO_2 поступают из нижележащего слоя пород при их оттаивании при залипании прибрежно-морскими водами.

Клиновидные льды

Слоистые гидрогенные клиновидные льды с включениями грунта (рис. 2, м. Марре-Сале) характеризуются высокой долей газа (6,5–10,7 %), низким содержанием O_2 (11,7–15,8 %) и высоким содержанием CH_4 (1,6–3,8 %). Вероятно, при оттаивании и обводнении мерзлой льдистой толщи образовался небольшой водоем, в котором происходило биогенное образование CH_4 . При всестороннем промерзании газ сохранился в форме газовых пузырьков во льду.

Торф с текстуробразующими льдами

Мерзлый автохтонный торф имеет разное количество льда в составе пробы. В торфе со шпирями льда (рис. 2, В15) высокая доля газа – 10,4 % и содержания CH_4 (0,80 %), CO_2 (3,1 %) и H_2 (0,006 %). Торф с массивной криотекстурой (рис. 2, В8) имеет низкую долю газа (2,0–6,1 %) и немного повышенные содержания CH_4 (0,05–0,28 %) и CO_2 (0,11–0,88 %); в составе также обнаружены углеводороды C_5 – C_6 . Вероятно, наличие льда уменьшает газопроницаемость торфа и способствует накоплению газа.

Содержание O_2 имеет отрицательную корреляцию с газонасыщенностью ($R^2=0,5$), CO_2 ($R^2=0,6$) и CH_4 ($R^2=0,4$), следовательно, в торфе преобладает преимущественно аэробное дыхание. Количество CO_2 и CH_4 имеет корреляцию с газонасыщенностью ($R^2=0,8-0,9$), что связано с продуцированием этих газов в торфе. Высокие концентрации CH_4 и CO_2 , H_2 и углеводородов обусловлены активной деятельностью МО в ходе циклического промерзания и протаивания.

Текстуробразующие льды

Инфильтрационно-сегрегационный лед (рис. 2, с. Гыда) отличается повышенной газонасыщенностью (4,9–7,0 %) и высоким содержанием CO_2 (0,70–0,88 %). Лед был сформирован из таликовых вод при двухстороннем промерзании.

Ледогрунт с линзовидной криотекстурой (рис. 2, ТЦ-5Н/2) имеет большую долю газа (9,2 %) и высокие содержания CO_2 (3,3 %). Лед сформирован за счет таяния мерзлой толщи с ПЛ, переотложения и промерзания на дне термоцирка.

В текстуробразующих льдах содержания O_2 имеют обратную корреляцию с количеством CH_4 ($R^2=0,8$). Наблюдается достоверная линейная зависимость содержаний N_2 , O_2 , CO_2 в объеме льда от газонасыщенности. В текстуробразующих льдах минеральных горизонтов накапливается CO_2 , так как они промерзали в замкнутом пространстве. В текстуробразующих льдах количество CH_4 незначительно, но обнаружены высокие содержания CO_2 и большое количество психрофильных МО. Следовательно, происходило преимущественно аэробное дыхание.

Заключение

Установлен газовый состав во льдах и ледогрунтах Западной Сибири и Центральной Якутии, а также содержание МО во льдах Ямала и Полярного Урала. Выявлены большие вариации газонасыщенности, содержаний CH_4 и CO_2 . Во всех типах льда содержание N_2 , O_2 сравнимо с атмосферным воздухом. В результате анализа соотношений $\text{CH}_4/(\text{C}_2\text{H}_6+\text{C}_3\text{H}_8)$ и $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_4$ не выявлено поступления глубинных газов вследствие вертикальной миграции из залежей углеводородов. Различия в газонасыщенности льда и в распределении химического состава газа можно объяснить разными условиями формирования и генетическими типами льда. В частности, на накопление газа влияет тип промерзания толщи – при эпигенетическом всестороннем промерзании образованные во время протаивания парниковые газы остаются в мерзлой толще.

При формировании повторно-жильных льдов в морозобойных трещинах накапливается атмосферный воздух. В повторно-жильных, термокарстово-полостных льдах и наледи содержание CH_4 незначительно. Установлена зависимость газового состава от количества включений торфа – в пробах с органическими включениями повышены содержания CH_4 , CO_2 и H_2 . Большое количество психрофильных МО и повышенное относительно атмосферного воздуха содержание CO_2 , CH_4 обусловлено поступлением органических соединений из деятельного слоя и диффузией из отложений на контакте со льдом.

Пластовые льды отличаются повышенным содержанием CH_4 и максимальными количествами психрофильных и общей численности МО. Вариации количества МО обусловлены сегрегационным генезисом льда и неоднородным химическим составом льда.

Лед бугра пучения на лаиде имеет высокие содержания CH_4 и CO_2 , которые поступают из промерзающих

вмещающих осадков в верхней части разреза, заливаемых прибрежно-морскими водами. В клиновидных льдах обнаружены высокие содержания CH_4 , который был образован в небольшом водоеме, а при промерзании газ сохранился в форме газовых пузырьков во льду.

В торфе происходит продуцирование CO_2 , H_2 , CH_4 и других углеводородов при разложении биомассы за счет активной деятельности МО в ходе циклического

промерзания и протаивания. В текстуробразующих льдах накапливался CO_2 при аэробном дыхании психрофильных МО во время оттаивания и сохраняется при дальнейшем всестороннем промерзании.

Работа выполнена по госзаданию Института криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН СО РАН № 121041600042-7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bender M., Sowers T., Brook E. Gases in ice cores // Proc. of the National Academy of Sciences. – 1997. – V. 94 (16). – P. 8343–8349.
2. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica / J.R. Petit, J. Jouzel, D. Raynaud, N.I. Barkov, J.-M. Barnola, I. Basile, M. Bender, J. Chappellaz, M. Davisk, G. Delaigle, M. Delmotte, V.M. Kotlyakov, M. Legrand, V.Y. Lipenkov, C. Lorius, L. Pepin, C. Ritz, E. Saltzman, M. Stievenard // Nature. – 1999. – V. 399. – P. 429–436.
3. The long-term ice core record of CO_2 and other greenhouse gases / D. Raynaud, J.Ch. Beeman, J. Chappellaz, F. Parrenin, J. Shin // Past Antarctica: Paleoclimatology and Climate Change. – 2020. URL: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03082021> (дата обращения 25.01.2023).
4. Влияние компонентного состава и давления газа на льдо- и гидратообразование в газонасыщенных поровых растворах / В.А. Истомин, Е.М. Чувилин, Д.В. Сергеева, Б.А. Буханов, Ю.В. Станиловская, К. Бадец // НефтеГазХимия. – 2018. – № 2. – С. 33–42. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10206.
5. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions / A.D. McGuire, T.R. Christensen, D. Hayes, A. Herault, E. Euskirchen, J.S. Kimball, C. Koven, P. Lafleur, P.A. Miller, W. Oechel, P. Peylin, M. Williams, Y. Yi // Biogeosciences. 2012. – V. 9. – P. 3185–3204. DOI: 10.5194/bg-9-3185-2012.
6. Three decades of global methane sources and sinks / S. Kirschke, P. Bousquet, P. Ciais, M. Saunois, J.G. Canadell, E.J. Dlugokencky, P. Cameron-Smith // Nature geoscience. – 2013. – V. 6 (10). – P. 813–823.
7. Topp E., Pettey E. Soils as sources and sinks for atmospheric methane // Canadian Journal of Soil Science. – 1997. – V. 77 (2). – P. 167–177. DOI: 10.4141/S96-107.
8. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils / G. Kraev, E.-D. Schulze, A. Yurova, A. Kholodov, E. Chuvilin, E. Rivkina // Atmosphere. – 2017. – V. 8. DOI: 10.3390/atmos8060105.
9. О фильтрации газов в многолетнемёрзлых породах в свете проблемы дегазации литосферы Земли и формирования естественных взрывных процессов в криолитозоне / А.Н. Хименков, А.В. Кошульников, Ф.С. Карпенко, В.Н. Кутергин, В.Е. Гагарин, П.А. Соболев // Арктика и Антарктика. – 2019. – № 3. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29627.
10. Заватский М.Д., Нежданов А.А., Курчатова А.Н. Особенности состава газа, сорбированного в породах верхней части разреза осадочного чехла // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2021. – Т. 6. – С. 23–35. DOI: 10.31660/0445-01108-2021-6-23-35.
11. Коржов Ю.В., Исаев В.И., Жильцова А.А. Проблемы нефтепоисковой геохимии и обобщающая схема миграции углеводородных флюидов // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 318. – № 1. – С. 116–122.
12. Мильков А.В. Роль метанообразующей деградации углеводородов в формировании гигантских сеноманских залежей сухого газа на севере Западной Сибири // Геология нефти и газа. – 2010. – № 4. – С. 55–62.
13. Чувилин Е.М., Гребенкин С.И. Экспериментальная оценка газопроницаемости газонасыщенных пород при гидратообразовании и замораживании // Криосфера Земли. – 2015. – Т. 19. – № 2. – С. 67–74.
14. Biogeochemistry of methane and methanogenic archaea in permafrost / E. Rivkina, V. Shcherbakova, K. Laurinavichius, L. Petrovskaya, K. Krivushin, G. Kraev, S. Pecheritsina, D. Gilichinsky // FEMS Microbiology Ecology. – 2007. – V. 61. – P. 1–15. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2007.00315.x.
15. Andersland O.B., Wiggert D.C., Davies S.H. Hydraulic conductivity of frozen granular soils // Journal of Environmental Engineering. – 1996. – V. 122. – P. 212–216.
16. Ferry J.G. Biochemistry of methanogenesis // Crit Rev Biochem Mol Biol. – 1992. – V. 27 (6). – P. 473–503. DOI: 10.3109/10409239209082570.
17. Брюханов А.Л., Нетрусов А.И. Аэротолерантность строго анаэробных микроорганизмов: факторы защиты от окислительного стресса (обзор) // Прикладная биохимия и микробиология. – 2007. – Т. 43. – № 6. – С. 635–652.
18. Геологический словарь / под ред. К.Н. Паффенгольца и др. – М.: Недра, 1978. – 447 с.
19. Бонч-Осмоловская Е.А. Археи // Большая российская энциклопедия. – М.: Большая Рос, 2005. – Т. 2. – С. 311–312.
20. Lengeler J., Drews G., Schlegel H. Biology of the prokaryotes. – Germany: Wiley-Blackwell Publ., 1998. – 955 p. DOI: 10.1002/9781444313314.
21. Paré M.C., Bedard-Haughn A. Landscape-scale N mineralization and greenhouse gas emissions in Canadian Cryosols // Geoderma. – 2012. – V. 189–190. – P. 469–479. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.06.002.
22. Remote sensing northern lake methane ebullition / M. Engram, K.M. Walter, T. Sachs, K. Kohnert, A. Serafimovich, G. Grosse, F.J. Meyer // Nature Climate Change – 2020. – V. 10. – P. 511–517. DOI: 10.1038/s41558-020-0762-8.
23. Anaerobic oxidation of methane and associated microbiome in anoxic water of Northwestern Siberian lakes / L. Cabrol, F. Thalasso, L. Gandois, A. Sepulveda-Jauregui, K. Martinez-Cruz, R. Teisserenc, N. Tananaev, A. Tveit, M.M. Svenning, M. Barret // Science of The Total Environment. – 2020. – V. 736. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139588.
24. Methane and dissolved organic matter in the ground ice samples from Central Yamal: implications to biogeochemical cycling and greenhouse gas emission / P.B. Semenov, A.A. Pismeniuk, S.A. Malyshev, M.O. Leibman, I.D. Streletskaia, E.V. Shatrova, A.I. Kizyakov, B.G. Vanshtein // Geosciences. – 2020. – V. 10. DOI: 10.3390/geosciences10110450.
25. Метан в мерзлых и оттаивающих отложениях западной Арктики / Н.А. Задорожная, Г.Е. Облогов, А.А. Васильев, И.Д. Стрелецкая, Г.В. Малкова, П.Б. Семенов, Б.Г. Ванштейн // Криосфера Земли. – 2022. – Т. 26. – № 5. – С. 41–55.
26. Метан в вечномёрзлых отложениях Северо-Восточного сектора Арктики / Е.М. Ривкина, Г.Н. Краев, К.В. Кривушин, К.С. Лауринавичюс, Д.Г. Федоров-Давыдов, А.Л. Холодов, В.А. Щербакова, Д.А. Гиличинский // Криосфера Земли. – 2006. – Т. X. – № 3. – С. 23–41.
27. Ошуркова В.И. Метанообразующие археи из многолетнемёрзлых отложений Арктики: автореф. дис. ... канд. биол. наук. – Пушкино, 2017. – 22 с.
28. Лурье М.А. Особенности изотопного состава углерода и серы нефтегазовых и других природных систем // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2018. – Т. 5. – С. 108–115. DOI: 10.31660/0445-0108-2018-5-108-115.
29. Экспериментальное исследование изотопного фракционирования воды в процессе сегрегационного льдообразования / В.Н. Конищев, В.Н. Голубев, В.В. Рогов, С.А. Сократов, И.В. Токарев // Криосфера Земли. – 2014. – Т. 18. – № 3. – С. 3–10.
30. Криолитологическое строение первой террасы острова Белый в Карском море: геокриологическая история и изменения природных условий (часть 3) / Е.А. Слагода, А.Н. Курчатова, О.Л. Опокина, И.В. Томберг, Т.В. Ходжер, А.Д. Фирсова,

- Е.В. Родионова, К.А. Попов, Е.Л. Никулина // Криосфера Земли. – 2014. – Т. XVIII. – № 3. – С. 33–45.
31. Бутаков В.И., Слагода Е.А. Связь химического состава с условиями формирования линзовидного пластового льда в аллювиальных отложениях на севере п-ва Гыдан // Строение литосферы и геодинамика: XXIX Всероссийская молодежная конференция. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2021. – С. 55–57.
32. Лейбман М.О., Хомутов А.В. Стационар «Васькины Дачи» на Центральном Ямале: 30 лет исследований // Криосфера Земли. – 2019. – Т. XXIII. – № 1. – С. 91–95. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(91-95).
33. Особенности формирования гидрохимического и микроэлементного состава разных типов подземных льдов мыса Марре-Сале / В.И. Бутаков, Е.А. Слагода, О.Л. Опокина, И.В. Томберг, Н.А. Жученко // Криосфера Земли. – 2020. – Т. XXIV. – № 5. – С. 29–44.
34. Гетерогенное строение полигонально-жильных льдов в торфяниках Пур-Газовского междуречья / Я.В. Тихонравова, Е.А. Слагода, В.В. Рогов, В.И. Бутаков, А.В. Лупачёв, А.О. Кузнецова, Г.В. Симонова // Лёд и Снег. – 2020. – Т. 60. – № 2. – С. 225–238. DOI: 10.31857/S2076673420020036.
35. Галанин А.А., Павлова М.Р., Папина Т.С., Эйрих А.Н., Павлова Н.А. Стабильные изотопы O^{18} и D в ключевых компонентах водного стока и криолитозоны Центральной Якутии (Восточная Сибирь) // Лёд и снег. – 2019. – Т. 59. – № 3. – С. 333–354. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-3-414.
36. Бутаков В.И., Слагода Е.А., Тихонравова Я.В. Содержание и состав атмосферных и парниковых газов в подземных льдах разного генезиса // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 11. – С. 22–36. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3082.
37. Коленко Е.А. Технология лабораторного эксперимента: справочник. – СПб.: Политехника, 1994. – 629 с.
38. Nitrogen and air. IUPAC Solubility Data Series / Ed. by R. Battino. – Oxford, England: Pergamon Press, 1982. – V. 10. – 613 p.
39. Oxygen and ozone. IUPAC Solubility Data Series / Ed. by R. Battino. – Oxford, England: Pergamon Press, 1981. – V. 7. – 533 p.
40. Carbon dioxide in water and aqueous electrolyte solutions. IUPAC Solubility Data Series / Ed. by P. Scharlin – Oxford, England: Pergamon Press, 1996. – V. 62. – 401 p.
41. Methane. IUPAC Solubility Data Series / Ed. by H.L. Clever, C.L. Young. – Oxford, England: Pergamon Press, 1987. – V. 27/28. – 801 p.
42. Hydrogen and deuterium. IUPAC Solubility Data Series / Ed. by C.L. Young. – Oxford, England: Pergamon Press, 1981. – V. 5/6. – 663 p.
43. Ethane. IUPAC Solubility Data Series / Ed. by W. Hayduk. – Oxford, England: Pergamon Press, 1982. – V. 9. – 281 p.
44. Bernard B.B., Brooks J.M., Zumberge J. Determining the origin of gases in near-surface sediments // Proc. of the Near-Surface Hydrocarbon Migration: Mechanisms and Seepage Rates. – Vancouver: AAPG Hedberg Conference, 2001. – P. 16–19.
45. Криолитология, гидрохимия и микробиология голоценовых озерных и повторно-жильных льдов о-ва Сибирякова Карского моря / О.Л. Опокина, Е.А. Слагода, И.Д. Стрелецкая, М.Ю. Суслова, И.В. Томберг, Т.В. Ходжер // Природа шельфа и архипелагов европейской Арктики. Комплексные исследования природы Шпицбергена: Материалы международной научной конференции. – М.: ГЕОС, 2010. – С. 241–247.
46. Бутаков В.И., Слагода Е.А., Заватский М.Д. Генезис парниковых и атмосферных газов в подземных льдах Севера Западной Сибири // Научная территория: Технологии и инновации: Материалы международной научно-практической конференции. – Тюмень: ТИУ, 2022. – С. 12–15.
47. Содержание и генезис метана в мерзлых отложениях и подземных льдах на побережье и шельфе Карского моря / И.Д. Стрелецкая, Б.Г. Ванштейн, А.А. Васильев, Г.Е. Облогов // Актуальные проблемы нефти и газа. – 2018. – Т. 4 (23). – С. 1–5. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art67.
48. Arkhangelov A.A., Novgorodova E.V. Genesis of massive ice at «Ice Mountain», Yenesei River, Western Siberia, according to results of gas analyses // Permafrost and Periglacial Processes. – 1991. – V. 2. – P. 167–170.
49. Микробные сообщества древних семян, извлеченных из многолетнемерзлых плейстоценовых отложений / В.Л. Стахов, С.В. Губин, С.В. Максимович, Д.В. Ребриков, А.М. Савилова, Г.А. Кочкина, С.М. Озерская, Н.Е. Иванушкина, Е.А. Воробьева // Микробиология. – 2008. – Т. 77. – № 3. – С. 396–403.
50. Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения / Е.М. Чувилин, Е.В. Перлова, Ю.Б. Баранов, В.В. Кондаков, А.Б. Осокин, В.С. Якушев. – М.: ГЕОС, 2007. – 135 с.
51. Chaban B., Ng S.Y., Jarrell K.F. Archaeal habitats-from the extreme to the ordinary // Canadian Journal of Microbiology. – 2006. – V. 52 (2). – P. 73–116. DOI: 10.1139/w05-147.
52. Питательная среда для культивирования бактерий *Bacillus subtilis* BN-135 – продуцента пектат-лиазы: пат. Рос. Федерация, № 2571945, заявл. 17.11.2014; опубл. 27.12.2015. Бюл. № 36. – 8 с.
53. Allen C.W. Astrophysical quantities. – London: Athlone Press, 1976. – 119 p.
54. Криогенные процессы / под ред. проф. А.И. Попова. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1987. – 185 с.
55. Слагода Е.А. Следы метаморфизма контактных зон подземных льдов // Мониторинг в криолитозоне: Сборник докладов Шестой конференции геокриологов России / под ред. Р.Г. Мотенко. – М.: «КДУ», «Добросвет», 2022. – С. 917–924. DOI: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130.

Поступила: 15.02.2023 г.

Прошла рецензирование: 27.02.2023 г.

Информация об авторах

Бутаков В.И., кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Института криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН.

Слагода Е.А., доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН.

Заватский М.Д., кандидат геолого-минералогических наук, профессор Института геологии и нефтегазодобычи, Тюменский индустриальный университет.

Иванов В.И., аспирант, младший научный сотрудник Института криосферы Земли Тюменского научного центра СО РАН.

UDC 551.34:[550.43+550.72]

GAS COMPOSITION AND MICROORGANISMS OF GROUND ICE IN RUSSIAN ARCTIC

Vladislav I. Butakov¹,
vladbutakov@yahoo.com

Elena A. Slagoda¹,
eslagoda@ikz.ru

Mikhail D. Zavatsky²,
zavatskiydm@tyuiu.ru

Vadim I. Ivanov¹,
ivanovvi.tyumu@gmail.com

¹ Earth Cryosphere Institute, Tyumen scientific centre SB RAS,
86, Malygin street, Tyumen, 625000, Russia.

² Tyumen industrial university,
38, Volodarsky street, Tyumen, 625000, Russia.

Relevance. The increase in the concentration of greenhouse gases in the atmosphere is a fundamental problem on a planetary scale. The source of greenhouse gases in the subsurface horizon of soil can be both deep deposits of hydrocarbons and organic matter processed by microorganisms during the thawing of the ice-rich soil. To determine the source of gas it is necessary to examine both its quantity and composition and microorganism content in the subsurface ice. Taking into account the dynamic development of the energy complex in the north of Western Siberia it is necessary to take into account the geotechnical risks associated with the release of greenhouse gases from frozen deposits.

Purpose: to study the composition and identify the sources of greenhouse gases in the ice and the ice-rich soil on account of the ice formation conditions and the microorganism content.

Objects: ice wedge, hydrogenic and segregational genesis of ice, ice-rich soil of northern Western Siberia and Central Yakutia, collected by expeditions Earth Cryosphere Institute, Tyumen scientific center SB RAS in 2011–2021.

Methods of research and interpretation of chemical composition. The structure of frozen deposits has been investigated by cryolithological methods. The monoliths of the ice and the frozen deposits were stored at -18°C . Gas was extracted from the monoliths with the determination of volume fraction by thermovacuum degassing method. The composition of gases is determined by gas chromatography. Normalization of the gas composition with solubility values in water was carried out. Volume fractions of gas in free and dissolved forms was calculated. The data processing were implemented by means of «Geochem Anomaly» program. Cultivated psychrophilic microorganisms were studied by seeding on nutrient media; the total number of microorganisms was determined by epifluorescent microscopy.

Results. The contents of N_2 (74.9–87.8 %), O_2 (11.7–20.3 %), CO_2 (0.01–3.28 %), CH_4 (0.003–7.35 %), H_2 (0.001–0.035 %) and hydrocarbons with an atom content from 2 to 6 (2.0×10^{-5} – 2.8×10^{-3} %) are determined in ice and ice-rich soil. The value of N_2 and O_2 in the gas composition of ice is close to atmospheric air. The ice has wide variations in gas saturation (1.1–21.1 %), CH_4 and CO_2 content. The freezing of gas-saturated solution occurred for the ice formation, part of the air was in a free form (from 30 to 75 %). Calculated indexes $\text{CH}_4/(\text{C}_2\text{H}_6+\text{C}_3\text{H}_8)$ and $\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_4$ indicate biogenic hydrocarbon genesis. The composition of gas bubbles is recalculated for the volume of the entire sample: CH_4 content is insignificant in ice wedge, closed-cavity ice and icing (averages 51, 81 and 1 ppmV, respectively). Low amounts of CH_4 could be produced by forming these types of ice from the sediments of the active layer, as the dependence of the gas composition on the peat element amount is established. CH_4 , CO_2 and H_2 contents increased in samples with peat elements. In interbedding ice the CH_4 content is high (216 ppmV). CO_2 (up to 3007 ppmV) was accumulated in the texturing ice, and hydrogenic wedge-shaped ice showed high levels of CH_4 (up to 4032 ppmV) as the ice was frozen in an enclosed volume. The ice of peat mound has a maximum content of CH_4 (15545 ppmV) and high CO_2 (2466 ppmV); inclosing sediments flooded with marginal-marine waters are the source of high values of CH_4 and CO_2 . The cultivated psychrophilic microorganisms were identified in the surface ice, and their maximum quantities were identified in segregated formations – up to 1680 KOU/ml, in textural ice – up to 1032 KOU/ml. High concentrations of greenhouse gases are found in frozen peat – CO_2 (1075 ppmV), H_2 (9 ppmV), CH_4 (262 ppmV) and other hydrocarbons due to activity of microorganisms, which results in accumulation of these gases. High gas saturation and CH_4 and CO_2 levels indicate the formation of gaseous composition by both aerobic and anaerobic microorganisms.

Key words:

Greenhouse gases, ground ice, biogenic methane, carbon dioxide, gas-saturated deposits, thermal vacuum degassing method, psychrophilic microorganisms.

The research was carried out by the state assignment of ECI Tyumen Scientific Center SB RAS SB RAS no. 121041600042-7.

REFERENCES

1. Bender M., Sowers T., Brook Ed. Gases in ice cores. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 1997, vol. 94, pp. 8343–8349.
2. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D., Barkov N.I., Barnola J.-M., Basile I., Bender M., Chappellaz J., Davisk M., Delaygue G., Delmotte M., Kotlyakov V.M., Legrand M., Lipenkov V.Y., Lorius C., Pepin L., Ritz C., Saltzman E., Stievenard M. Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok Ice Core, Antarctica. *Nature*, 1999, vol. 399, pp. 429–436.
3. Raynaud D., Beeman J.Ch., Chappellaz J., Parrenin F., Shin J. The long-term ice core record of CO_2 and other greenhouse gases. *Past*

- Antarctica: Paleoclimatology and Climate Change*, 2020. Available at: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03082021> (accessed 25 February 2021).
4. Istomin V.A., Chuvin E.M., Sergeeva D.V., Buhkanov B.A., Stanilovskaya Yu.V., Badetz C. Influence of composition and external gas pressure on ice and hydrate formation in gas-saturated pore solutions. *Oil & gas chemistry*, 2018, no. 2, pp. 33–42. In Rus. DOI: 10.24411/2310-8266-2018-10206.
 5. McGuire A.D., Christensen T.R., Hayes D., Heroult A., Euskirchen E., Kimball J.S., Koven C., Lafleur P., Miller P.A., Oechel W., Peylin P., Williams M., Yi Y. An assessment of the carbon balance of Arctic tundra: comparisons among observations, process models, and atmospheric inversions. *Biogeosciences*, 2012, vol. 9, pp. 3185–3204. DOI: 10.5194/bg-9-3185-2012.
 6. Kirschke S., Bousquet P., Ciais P., Saunoy M., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Cameron-Smith P. Three decades of global methane sources and sinks. *Nature geoscience*, 2013, vol. 6 (10), pp. 813–823.
 7. Topp E., Pattey E. Soils as sources and sinks for atmospheric methane. *Canadian Journal of Soil Science*, 1997, vol. 77 (2), pp. 167–177. DOI: 10.4141/S96-107.
 8. Kraev G., Schulze E.-D., Yurova A., Kholodov A., Chuvin E., Rivkina E. Cryogenic displacement and accumulation of biogenic methane in frozen soils. *Atmosphere*, 2017, vol. 8. DOI: 10.3390/atmos8060105.
 9. Himenkov A.N., Koshurnikov A.V., Karpenko F.S., Kutergin V.N., Gagarin V.E., Sobolev P.A. Gas infiltration into permafrost in the context to lithosphere degassing and origin of natural gas blowouts in permafrost. *Arctic and Antarctica*, 2019, no. 3. In Rus. DOI: 10.7256/2453-8922.2019.3.29627.
 10. Zavatsky M.D., Nezhdanov A.A., Kurchatova A.N. Features of the composition of gas sorbed in the rocks of the upper part of the sedimentary cover section. *Oil and Gas Studies*, 2021, vol. 6, pp. 23–35. DOI: 10.31660/0445-01108-2021-6-23-35. In Rus.
 11. Korzhov Yu.V., Isaev V.I., Zhilcova A.A. Problems of oil prospecting geochemistry and a general scheme of hydrocarbon fluid migration. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 318, no. 1, pp. 116–122. In Rus.
 12. Milkov A.V. The role of methane generating biodegradation of hydrocarbons in formation of giant cenomanian pools of dry gas in the north of West Siberia. *Geology of oil and gas*, 2010, no. 4, pp. 55–62. In Rus.
 13. Chuvin E.M., Grebenkin S.I. Experimental estimation of gas permeability of gas-saturated sediments during hydrate formation and freezing. *Earth's Cryosphere*, 2015, vol. 19, no. 2, pp. 67–74. In Rus.
 14. 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 Microbiology Ecology*, 2007, vol. 61, pp. 1–15. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2007.00315.x.
 15. Andersland O.B., Wiggert D.C., Davies S.H. Hydraulic conductivity of frozen granular soils. *Journal of Environmental Engineering*, 1996, vol. 122, pp. 212–216.
 16. Ferry J.G. Biochemistry of methanogenesis. *Critical Reviews in Biochemistry and Molecular Biology*, 1992, vol. 27 (6), pp. 473–503. DOI: 10.3109/10409239209082570.
 17. Brioukhanov A.L., Netrusov A.I. Aerotolerance of strictly anaerobic microorganisms and factors of defense against oxidative stress: a review. *Applied Biochemistry and Microbiology*, 2007, vol. 43, no. 6, pp. 635–652. In Rus.
 18. *Geologicheskii slovar* [Geological dictionary]. Ed. by K.N. Paffengolts. Moscow, Nedra Publ., 1978. 447 p.
 19. Bonch-Osmolovskaya E.A. Arkhei [Archaea]. *Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya* [Great Russian Encyclopedia]. Moscow, Bolshaya Ros Publ., 2005. Vol. 2, pp. 311–312.
 20. Lengeler J., Drews G., Schlegel H. *Biology of the prokaryotes*. Germany, Wiley-Blackwell Publ., 1998. 955 p. DOI: 10.1002/9781444313314.
 21. Paré M.C., Bedard-Haughn A. Landscape-scale N mineralization and greenhouse gas emissions in Canadian Cryosols. *Geoderma*, 2012, vol. 189–190, pp. 469–479. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.06.002.
 22. Engram M., Walter K.M., Sachs T., Kohnert K., Serafimovich A., Grosse G., Meyer F.J. Remote sensing northern lake methane ebullition. *Nature Climate Change*, 2020, vol. 10, pp. 511–517. DOI: 10.1038/s41558-020-0762-8.
 23. Cabrol L., Thalasso F., Gandois L., Sepulveda-Jauregui A., Martinez-Cruz K., Teisserenc R., Tananaev N., Tveit A., Svenning M.M., Barret M. Anaerobic oxidation of methane and associated microbiome in anoxic water of Northwestern Siberian lakes. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 736. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139588.
 24. Semenov P.B., Pismeniuk A.A., Malyshev S.A., Leibman M.O., Streletskaia 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, no. 11. DOI: 10.3390/geosciences10110450.
 25. Zadorozhnaya N.A., Oblogov G.E., Vasiliev A.A., Streletskaia I.D., Malkova G.V., Semenov P.B., Vanshtein B.G. Methane in frozen and thawing sediments of Western Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*, 2022, vol. 26, no. 5, pp. 41–55. In Rus.
 26. Rivkina E.M., Kraev G.N., Krivushin K.V., Laurinavichius K.S., Fyodorov-Davydov D.G., Kholodov A.L., Shcherbakova V.A., Gilichinsky D.A. Methane in permafrost of Northeastern Arctic. *Earth's Cryosphere*, 2006, vol. X, no. 3, pp. 23–41. In Rus.
 27. Oshurkova V.I. *Metanobrazuyushchie arkhei iz mnogoletnemerzlykh otlozheniy Arktiki*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Methane-forming archaea from permafrost deposits in Arctic. Cand. Diss. Abstract]. Pushchino, 2017. 22 p.
 28. Lur'e M.A. Features of isotopic composition of carbon and sulfur in oil-and-gas and other natural systems. *Oil and Gas Studies*, 2018, vol. 5, pp. 108–115. In Rus. DOI: 10.31660/0445-0108-2018-5-108-115.
 29. Konishchev V.N., Golubev V.N., Rogov V.V., Sokratov S.A., Tokarev I.V. Experimental study of the isotopic fractionation of water in the process of ice segregation. *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. 18, no. 3, pp. 3–10. In Rus.
 30. Slagoda E.A., Kurchatova A.N., Opokina O.L., Tomberg I.V., Khodzher T.V., Firsova A.D., Rodionova E.V., Popov K.A., Nikulina E.L. Cryostratigraphy of the first terrace in Bely Island, Kara Sea: permafrost and climate history (Part 3). *Earth's Cryosphere*, 2014, vol. XVIII, no. 3, pp. 32–43. In Rus.
 31. Butakov V.I., Slagoda E.A. Svyaz khimicheskogo sostava s usloviyami formirovaniya linozoidnogo plastovogo lida v allyuvialnykh otlozheniyakh na severe p-va Gydan [Relationship between the chemical composition and the conditions for the formation of ice lens in alluvial sediments on the north of the Gydan Peninsula]. *Stroenie litosfery i geodinamika. XXIX Vserossiyskaya molodezhnaya konferentsiya* [XXIX All-Russian Youth Conference. Structure of the Lithosphere and Geodynamics]. Irkutsk, Institute of the Earth's crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences Publ., 2021. pp. 55–57.
 32. 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, pp. 91–95. In Rus. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-1(91-95).
 33. Butakov V.I., Slagoda E.A., Opokina O.L., Tomberg I.V., Zhuchenko N.A. The formation features of the hydrochemical and trace element composition of various types of ground ice at Marre-Sale Cape. *Earth's Cryosphere*, 2020, vol. XXIV, no. 5, pp. 29–44. In Rus.
 34. Tikhonravova Y.V., Slagoda E.A., Rogov V.V., Butakov V.I., Lupachev A.V., Kuznetsova A.O., Simonova G.V. Heterogeneous ices in ice wedges structure on the Pur-Taz interfluvial peatlands of the north of West Siberia. *Ice and Snow*, 2020, vol. 60, no. 2, pp. 225–238. In Rus. DOI: 10.31857/S2076673420020036.
 35. Galanin A.A., Pavlova M.R., Papina T.S., Eyrikh A.N., Pavlova N.A. Stable isotopes of ^{18}O and D in key components of water flows and the permafrost zone of Central Yakutia (Eastern Siberia). *Ice and Snow*, 2019, vol. 59, no. 3, pp. 333–354. In Rus. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-3-414.
 36. Butakov V.I., Slagoda E.A., Tikhonravova Ya.V. Content and composition of atmospheric and greenhouse gases in underground ice of different genesis. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 11, pp. 22–36. In Rus. DOI: 10.18799/24131830/2021/11/3082.
 37. Kolenko E.A. *Tekhnologiya laboratornogo eksperimenta: spravochnik* [Laboratory experiment technology: handbook]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 1994. 629 p.

38. *Nitrogen and air. IUPAC Solubility Data Series*. Ed. by R. Battino. England, Pergamon Press, 1982. Vol. 10, 613 p.
39. *Oxygen and ozone. IUPAC Solubility Data Series*. Ed. by R. Battino. England, Pergamon Press, 1981. Vol. 7, 533 p.
40. *Carbon dioxide in water and aqueous electrolyte solutions. IUPAC Solubility Data Series*. Ed. by P. Scharlin. England, Pergamon Press, 1996. Vol. 62, 401 p.
41. *Methane. IUPAC Solubility Data Series*. Ed. by H.L. Clever, C.L. Young. England, Pergamon Press, 1987. Vol. 27/28, 801 p.
42. *Hydrogen and deuterium. IUPAC Solubility Data Series*. Ed. by C.L. Young. England, Pergamon Press, 1981. Vol. 5/6, 663 p.
43. *Ethane. IUPAC Solubility Data Series*. Ed. by W. Hayduk. England, Pergamon Press, 1982. Vol. 9, 281 p.
44. Bernard B.B., Brooks J.M., Zumberge J. Determining the origin of gases in near-surface sediments. *Proceedings of the near-surface hydrocarbon migration: mechanisms and seepage rates*. Vancouver, AAPG Hedberg Conference, 2001. pp. 16–19.
45. Opokina O.L., Slagoda E.A., Streletskaya I.D., Suslova M.Yu., Tomberg I.V., Khodger T.V. Kriolitologiya, gidrokimiya i mikrobiologiya golotsenovykh ozernykh i povtorno-zhilnykh ldov o-va Sibiryakova Karskogo morya [Cryolithology, hydrochemistry and microbiology of Holocene lacustrine ice and ice wedge of the Sibiryakov Island of the Kara Sea]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii. Priroda shelfa i arhipelagov evropeyskoy Arktiki. Kompleksnye issledovaniya prirody Shpicbergena* [Proceedings of the international scientific conference. The nature of the shelf and archipelagos of the European Arctic. Comprehensive studies of the nature of Spitsbergen]. Moscow, GEOS Publ., 2010. pp. 241–247.
46. Butakov V.I., Slagoda E.A., Zavatskiy M.D. Genezis parnikovykh i atmosferykh gazov v podzemnykh ldakh Severa Zapadnoy Sibiri [Genesis of greenhouse and atmospheric gases in underground ice of the North of Western Siberia]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Nauchnaya territoriya: Tehnologii i innovatsii* [Proceedings of the international scientific-practical conference. Scientific territory: Technologies and innovations]. Tyumen, IUT PUBL., 2022. Vol. 2, pp. 12–15.
47. Streletskaya I.D., Vanshteyn B.G., Vasiliev A.A., Oblogov G.E. Content and genesis of frost sediments and underground ice methane offshore and onshore Kara Sea. *Actual problems of oil and gas*, 2018, vol. 4 (23), pp. 1–5. In Rus. DOI: 10.29222/ipng.2078-5712.2018-23.art67.
48. Arkhangelov A.A., Novgorodova E.V. Genesis of massive ice at «Ice Mountain», Yenesei river, Western Siberia, according to results of gas analyses. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1991, vol. 2, pp. 167–170.
49. Stakhov V.L., Gubin S.V., Maksimovich S.V., Rebrikov D.V., Savilova A.M., Kochkina G.A., Ozerskaya S.M., Ivanushkina N.E., Vorobyova E.A. Microbial communities of ancient seeds derived from permanently frozen pleistocene deposits. *Microbiology*, 2008, vol. 77, no. 3, pp. 348–355.
50. Chuvilin E.M., Perlova E.V., Baranov Yu.B., Kondakov V.V., Osokin A.B., Yakushev V.S. *Stroenie i svoystva porod kriolitozony yuzhnoy chasti Bovanenkovskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya* [Structure and properties of rocks in the cryolithozone of the southern part of the Bovanenkovo gas condensate field]. Moscow, GEOS Publ., 2007. 135 p.
51. Chaban B., Ng S.Y., Jarrell K.F. Archaeal habitats-from the extreme to the ordinary. *Canadian Journal of Microbiology*, 2006, vol. 52 (2), pp. 73–116. DOI: 10.1139/w05-147.
52. Bravova G.B., Larina L.N., Petrova N.T., Kozlov I.M. *Pitatelnaya sreda dlya kultivirovaniya bakteriy Bacillus subtilis BN-135 – produtsenta pektat-liazy* [Nutrient medium to cultivate bacteria Bacillus subtilis BN-135 – producent of pectate lyase]. Patent RF, no. 2571945, 2015.
53. Allen C.W. *Astrophysical quantities*. London, Athlone Press, 1976. 119 p.
54. *Kriogennyye protsessy* [Cryogenic processes]. Ed. by A.I. Popov. Moscow, Moscow state university Publ., 1987. 185 p.
55. Slagoda E.A. Sledy metamorfizma kontaknykh zon podzemnykh ldov [Traces of metamorphism of the contact zones of underground ice]. *Sbornik dokladov Shestoy konferentsii geokriologov Rossii. Monitoring v kriolitozone* [Collection of reports of the Sixth Conference of geocryologists of Russia. Monitoring in the permafrost zone]. Moscow, «KDU», «Dobrosvet» Publ., 2022. pp. 917–924. DOI: 10.31453/kdu.ru.978-5-7913-1231-0-2022-1130.

Received: 15 February 2023.

Reviewed: 27 February 2023.

Information about the authors

Vladislav I. Butakov, Cand. Sc., researcher, Earth Cryosphere Institute, Tyumen scientific centre SB RAS.

Elena A. Slagoda, Dr. Sc., principal researcher, Earth Cryosphere Institute, Tyumen scientific centre SB RAS.

Mikhail D. Zavatskiy, Cand. Sc., professor, Tyumen Industrial University.

Vadim I. Ivanov, graduate student, junior researcher Earth Cryosphere Institute, Tyumen scientific centre SB RAS.