

УДК 551.345.3

И.Д. Стрелецкая¹, М.О. Лейбман², А.И. Кизяков³, Г.Е. Облогов⁴, А.А. Васильев⁵,
А.В. Хомутов⁶, Ю.А. Дворников⁷

ПОДЗЕМНЫЕ ЛЬДЫ И ИХ РОЛЬ В ФОРМИРОВАНИИ ВОРОНКИ ГАЗОВОГО ВЫБРОСА НА ПОЛУОСТРОВЕ ЯМАЛ

Анализируются результаты гидрогеохимических и изотопных исследований пластового подземного льда и озерной воды воронки газового выброса на Ямале. Данные сопоставляются с результатами аналогичных исследований пластового и полигонально-жильного льда, а также поверхностных и атмосферных вод Ямала. Установлено сходство по изотопному и ионному составу пластового льда воронки и слоистого пластового льда района Марре-Сале и отличие этих льдов от ионного и изотопного состава поверхностных и атмосферных вод, а также полигонально-жильных льдов региона.

Ключевые слова: воронка газового выброса, подземные льды, стабильные изотопы, химический состав, метан.

Введение. Воронка газового выброса (ВГВ) на Центральном Ямале (N 69° 34'58" E 68° 13'20" в координатах системы WGS 84) образовалась в результате взрыва в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород в период с 09.10.2013 по 01.11.2013 г. [Leibman et al., 2014]. ВГВ расположена в 40 км к югу от куста газовых скважин 610 Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения, в 65 км к северо-востоку от метеостанции Марре-Сале (рис. 1) и в 4 км к востоку от действующего магистрального газопровода Бованенково–Ухта. Поскольку радиус разброса вылетевших из ВГВ фрагментов породы и, вероятно, льда, составляет 120 и более метров, то ясно, что потенциальная опасность для людей и сооружений в зоне образования такой воронки крайне велика. Поэтому происхождение этой формы является предметом активного обсуждения [Leibman et al., 2014], особенно в связи с тем, что на севере Западной Сибири обнаружены еще несколько аналогичных воронок и отсутствуют представления о том, где, когда и с какой частотой подобные явления могут повторяться.

Район ВГВ западнее субмеридионального отрезка р. Мордыяха и южнее субширотного отрезка р. Сеяха относится к зоне сплошного распространения многолетнемерзлых пород со средней годовой температурой пород на глубине нулевых годовых колебаний до –7°С и глубиной сезонного протаивания менее 1,0 м. В мерзлом состоянии породы содержат значительное количество льда, в том числе ледяные клинья (полигонально-жильные льды) и мономинеральные линзы и прослои толщиной от нескольких до

более 20 м (пластовые льды) [Стрелецкая, Лейбман, 2002]. Есть свидетельства загазованности (преобладающим газом является метан) верхней части разреза на Ямале [Якушев, 2009]. Газопроявления приурочены к мерзлым, в разной степени засоленным песчано-глинистым породам неоплейстоценового возраста в интервале глубин от 20 до 130 м [Бондарев с соавт., 2008]. При бурении в газонасыщенных горизонтах отмечались криопэги, ледяные прослои, в глинах – изометричные каверны, частично заполненные фирноподобным снегом [Строение ..., 2007].

Первые обследования ВГВ показали, что разрез до глубины 25 м от бровки воронки представлен почти исключительно мономинеральным льдом с вертикально ориентированной, облегающей цилиндрическую часть воронки, слоистостью по минеральным включениям [Лейбман с соавт., 2014]. Берега озер и склоны водоразделов в районе ВГВ подвержены криогенному оползанию. В стенках соседних с ВГВ термоцирков на поверхность выходят пластовые льды, что свидетельствует о близком к поверхности залегании пластового льда и/или сильнольдистых мерзлых пород и их широкое распространение [Лейбман, Кизяков, 2007]. Вскрытые в стенках ВГВ мощные льды внешне похожи на пластовые залежи, часто встречающиеся в четвертичных отложениях Центрального и Западного Ямала.

Цель исследований – определить изотопно-геохимические характеристики подземного льда ВГВ, сравнить лед в воронке с подземными льдами Центрального и Западного Ямала и установить их отличия или схожесть.

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, кафедра криолитологии и гляциологии, доцент, ст. науч. с.; e-mail: irinastrelets@gmail.com

² Институт криосферы Земли СО РАН, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, ведущ. науч. с.; e-mail: moleibman@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, кафедра криолитологии и гляциологии, ст. науч. с.; e-mail: akizyakov@mail.ru

⁴ Институт криосферы Земли СО РАН, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, ст. науч. с.; e-mail: oblogov@mail.ru

⁵ Институт криосферы Земли СО РАН, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, ведущ. науч. с.; e-mail: al.a.vasiliev@gmail.com

⁶ Институт криосферы Земли СО РАН, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, ведущ. науч. с.; e-mail: akhomutov@gmail.com

⁷ Институт криосферы Земли СО РАН, Тюменский государственный университет, г. Тюмень, науч. с.; e-mail: ydvornikow@gmail.com

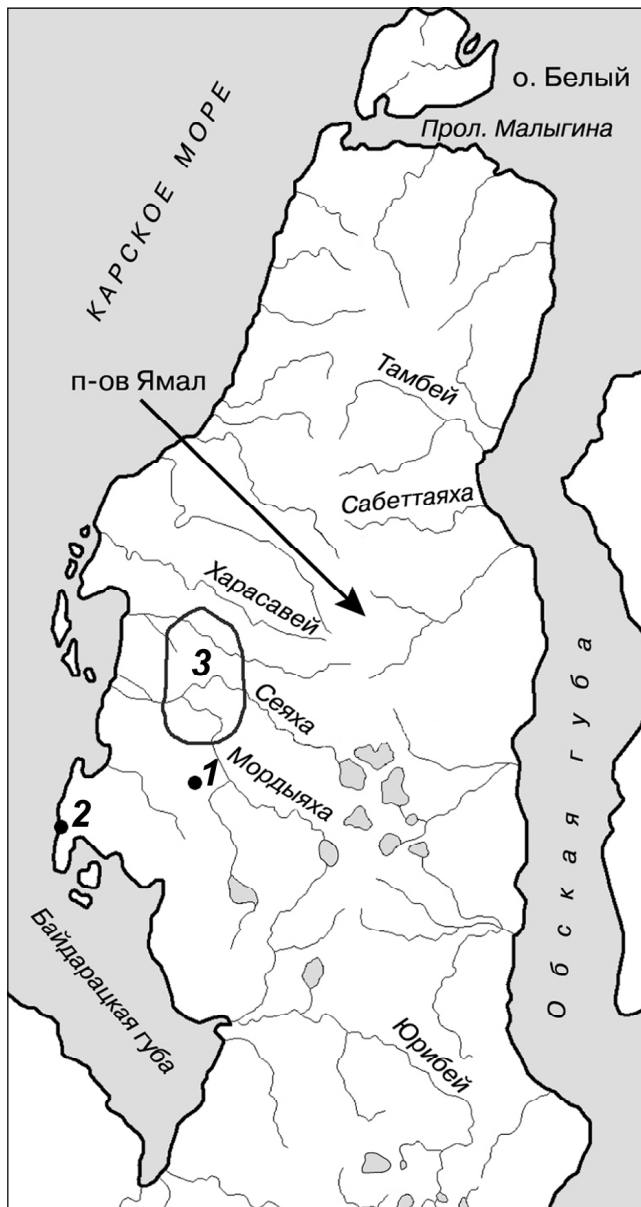


Рис. 1. Расположение воронки на карте полуострова Ямал. Условные обозначения: 1 – район воронки газового выброса, 2 – метеостанция Марре-Сале, 3 – территория Бованенковского газоконденсатного месторождения

Fig. 1. Location of the crater on the map of the Yamal Peninsula: 1 – area of the gas-emission crater, 2 – the Marre-Sale meteorite station, 3 – area of the Bovanenkovskoye gas condensate field

Подземные льды и четвертичные отложения Центрального и Западного Ямала. Разрезы четвертичных отложений, вмещающие мощные залежи подземных льдов, расположенные в радиусе 40–70 км от воронки, достаточно хорошо изучены [Инженерно-геологический ..., 1996; Ананьева, 1997; Каневский с соавт., 2005; Стрелецкая с соавт., 2006; 2013; Строение ..., 2007; Крицук, 2010; Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений ..., 2013].

Среднеплейстоценовые отложения представлены засоленными суглинками и глинами с многочисленными прослоями песков и супесей с включениями вивианита и тонких прослоев торфа. К прослоям песков приурочены линзы криопэггов и 90%

всех газопроявлений. Газовыделения характерны также для горизонтов пород с многочисленными кавернами и пустотами диаметром 5–8 мм [Криосфера нефтегазоконденсатных ..., 2013].

Верхнеплейстоценовые морские, прибрежно-морские отложения представляют собой чередование прослоев супесей, суглинков и песков с большим количеством в разной степени разложившейся органики. Глинистые отложения содержат пластовые монолитные линзы льдов. Пресные и слабозасоленные пески содержат большое количество органического вещества (до 1,2%) и слоистые линзы льда с песчано-глинистыми минеральными включениями и пузырьками зачехленных газов [Строение ..., 2007; Васильев с соавт., 2015].

Континентальные отложения верхнеплейстоценового возраста, перекрывающие морские отложения, представлены озерными и аллювиальными слоистыми супесями и песками, реже суглинками, с растительными включениями, нередко с мощными сингенетическими полигонально-жильными льдами.

Голоценовые морские, аллювиальные, озерные, болотные, эоловые и склоновые отложения мощностью до 8–10 м слагают верхние части разрезов лайд, пойм, водоразделов и озерных котловин.

Из 3 тысяч скважин глубиной от 10 до 100 м, пробуренных в пределах Бованенковской площади, в 260 скважинах вскрыты пластовые льды. Большинство ледяных залежей приурочены к породам морского и прибрежно-морского генезиса, реже они встречаются в аллювиальных, склоновых, озерно-болотных отложениях. Пластовые льды имеют форму протяженных (до нескольких километров), мощных (до 30 м) линз. Кровля залежей часто залегает непосредственно под сезонно-талым слоем. Подошва пластовых залежей ниже абсолютной отметки –21,5 м не была установлена [Стрелецкая, Лейбман, 2002; Васильчук с соавт., 2009].

В районе метеостанции Марре-Сале в 45% скважин вскрыты пластовые монолитные или слоистые льды мощностью от 0,3 до 17,5 м. В пределах водоразделов на глубинах 32 и 92 м зафиксированы линзы криопэггов, при бурении наблюдались мощные выбросы газа. На глубинах от 58 до 61 м и от 92 до 125 м отмечались провалы бурового оборудования, что косвенно может свидетельствовать о свободных полостях в разрезах [Крицук, 2010]. В морских береговых обрывах в разные годы наблюдались многочисленные залежи пластовых льдов на глубинах 1,5–20,0 м, мощностью более 17 м, подошва которых уходила под уровень моря [Стрелецкая с соавт., 2006; Крицук, 2010; Стрелецкая с соавт., 2013; Васильев с соавт., 2015].

В районе озера Халэв-То в 12 км к северу от ВГВ в разрезах водораздельных поверхностей бурением установлено несколько сильнольdistых горизонтов и линзы чистого льда мощностью 1,5–4,0 м на глубинах от 2,0 до 15,0 м [Ананьева, 1997].

Объект исследования – воронка газового выброса (ВГВ). Ямальская ВГВ на момент первого обследования в июне 2014 г. представляла собой ци-

линдрическое углубление глубиной более 50 м с бурством в верхней части, окруженное грунтовым бруствером (рис. 2). Диаметр цилиндрической части с вертикальными стенками составил 18–20 м. Образовавшаяся воронка пространственно совпадает с положительной формой рельефа, существовавшей на этом месте до 01.11.2013 г. Диаметр основания бугра составлял 45,0–58,0 м, относительная высота 5–6 м [Кизяков с соавт., 2015]. В ноябре 2014 г. глубина воронки составляла уже 25,5 м, а в нижней части северной вертикальной стенки на глубине 20,5 м хорошо был виден грот в виде усеченной сферы высотой 5,0 м и радиусом 2,0 м. О том, что грот имел большие размеры, свидетельствуют кадры видеосъемки в момент первого обследования воронки. Съемка проводилась портативной камерой, которая опускалась на тросе в кратер. Предполагаемая высота грота могла составлять более 30,0 м (рис. 2).

Геофизическими исследованиями установлено, что в разрезе выделяются слои различного удельного электрического сопротивления, которые интерпретируются следующим образом: верхняя часть разреза сложена высокольдистыми супесями с пластовыми залежами льда, нижняя с глубины 60,0–70,0 м – засоленными мерзлыми и охлажденными суглинками ямальской серии. Слой мощностью 7,5–

20,0 м на контакте проводящих и непроводящих горизонтов, возможно, является коллектором газогидратов [Оленченко с соавт., 2015].

К началу сентября 2015 г. (через 2 года после газового выброса) воронка представляла собой круглое озеро правильной формы диаметром 45,0–55,0 м, окруженное вертикальными стенками высотой до 6,0 м. По периферии сохранился бруствер, однако его ширина и высота существенно сократились. За 2014 г. уровень озера от дна воронки поднялся примерно на 24,0 м, а до сентября 2015 г. еще на 20,0 м. Таким образом, стенки воронки постоянно и постепенно оттаивают; талые воды с частицами породы стекают вниз по стенкам и заполняют воронку. За счет отступания стенок вскрылся иной по строению и составу разрез с пластовыми льдами обычного для региона облика. С глубины 3,5 м лед в стенках воронки представляет собой чередование слоистого (с включениями глины) и стекловидного.

Геофизическими методами и натурными наблюдениями установлено, что криолитологический разрез района воронки газового выброса аналогичен ранее исследованному на Центральном Ямале.

Методы исследования. Отбор образцов производился для определения комплексного химического анализа пород и водорастворимых солей во льду,

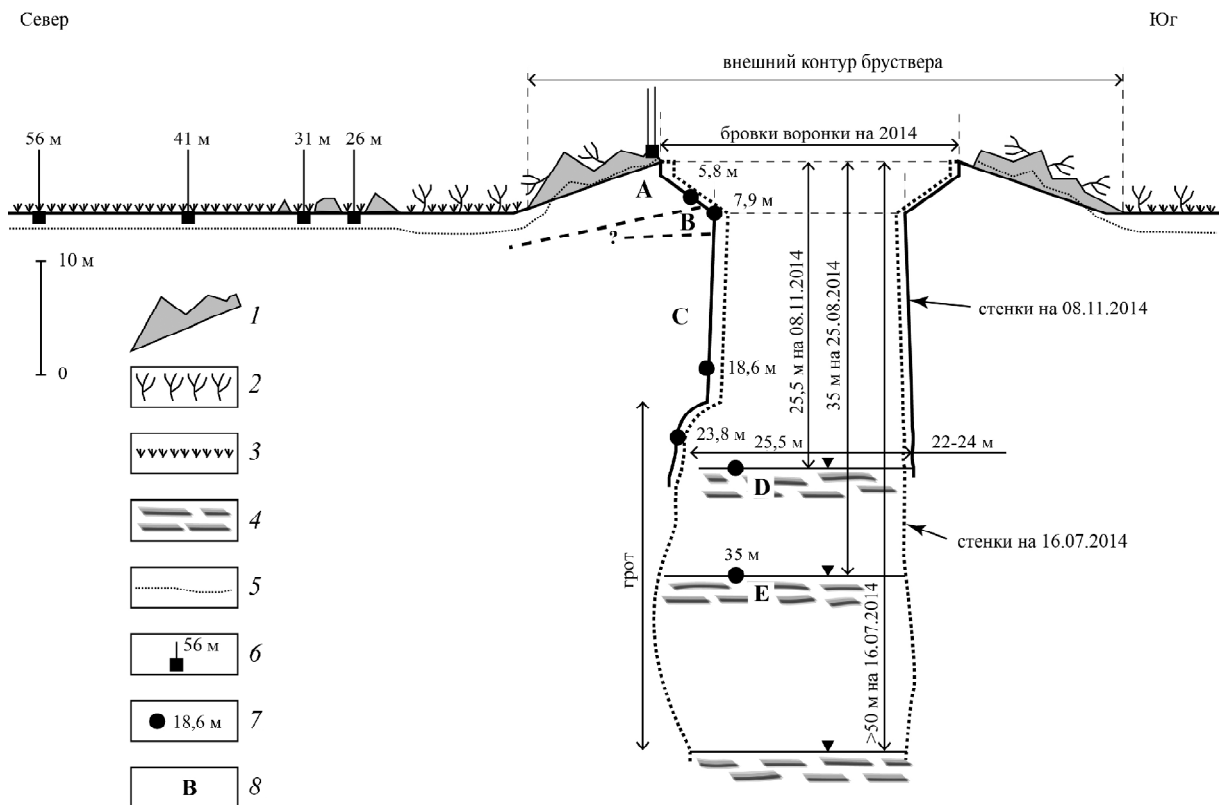


Рис. 2. Принципиальная схема строения воронки в 2014 г. и точки отбора образцов. Условные обозначения: 1 – выброшенный из воронки материал, 2 – кусты ивы, 3 – травяная растительность, 4 – вода озера в воронке, 5 – подошва сезонно-талого слоя, 6 – точки отбора проб пород из закопшек и расстояние от бровки воронки в июле 2014 г., 7 – точки и глубина отбора проб льда из стенки воронки и воды из озера в воронке в ноябре 2014 г., 8 – горизонты льда (A, B, C) и уровень воды в кратере: D – август 2014 г.; E – ноябрь 2014 г.

Fig. 2. Principal scheme of the crater structure and sampling points: 1 – emitted material, 2 – willow shrubs, 3 – grass vegetation, 4 – lake water in the crater, 5 – bottom of the seasonally melting layer, 6 – sampling points (July 2014) and the distance from the crater edge, 7 – sampling points (November 2014) and the depth of ice sampling from the crater wall and water sampling from the crater lake, 8 – ice layers (A, B, C) and water levels in the crater: D – August 2014, E – November 2014

значений стабильных изотопов кислорода и водорода воды из расплавов льда и озерной воды, для определения количества метана, заключенного в пузырьках во льду и воздухе.

Первая коллекция образцов была собрана при посещении объекта в июле 2014 г. Образцы пород и почв слоя сезонного оттаивания отбирались из шурфов на бруствере вокруг кратера и на расстоянии 26,0; 31,0; 41,0 и 56,0 м от воронки. Анализ шести образцов пород проведен в Центре лабораторного анализа и технических измерений по Уральскому Федеральному округу Национального центра изучения Арктики (г. Салехард, Тюменская область). В ноябре 2014 г. исследовалась стенка воронки и вода из озера внутри воронки. По характеру включений, слоистости и цвету льда, стенка воронки была разделена сверху вниз на несколько горизонтов от поверхности: от 0,5 до 7,0 м (слой А), от 7,0 до 10,0 м (слой В), от 10,0 до 20,5 м (слой С), от 20,5 до 25,5 м (слой D). На глубинах 5,8, 7,6, 18,6 и 23,8 м отобраны монолиты льда (рис. 2). Часть образцов льда хранилась и транспортировалась в виде монолитов, а часть – в виде талой воды. Вода из озера, расположенного на глубине 35 м от края ВГВ, была отобрана в августе 2014 г., и на глубине 25,5 м от края ВГВ в ноябре 2014 г. (рис. 2, D, E). В третье посещение в августе-сентябре 2015 г. исследовался состав воды из небольших озер в районе ВГВ и еще раз отобрана вода из озера на глубине около 6 м от края воронки.

Гидрохимический анализ 16-ти образцов льда и воды был выполнен в лаборатории физико-химических исследований ВСЕГИНГЕО (п. Зеленый, Московская область). Определения значений изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и дейтерия (δD) расплава льда (37 образцов) и озерной воды (51 образец) были выполнены в Институте Полярных и Морских исследований им. А. Вегенера (Потсдам, Германия). Для 21-го дубликата образцов контрольные определения значений изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и дейтерия (δD) выполнены в Лаборатории изотопных и ядерных методов ВСЕГИНГЕО (п. Зеленый, Московская область). Результаты изотопных исследований в двух независимых лабораториях показали хорошую сходимость, разница в значениях изотопов кислорода не превышала 0,5‰, а дейтерия 1‰.

Концентрация метана в воздухе определялась в кратере с помощью портативного газоанализатора во время первого посещения воронки 16.07.2014 г. Для определения содержания метана в мерзлых стенках воронки и фоновых значений метана в воздухе был проведен пробоотбор в ноябре 2014 г. Газ из пузырьков льда выделялся и консервировался методом «Headspace» (Alperin, Reeburgh, 1985). Определение количества метана во льду по 28 образцам выполнено с помощью газового хроматографа ХПМ-4 с пламенно-ионизационным детектором в Институте физико-химических и биологических проблем почвоведения (г. Пушкино, Московская область).

Результаты лабораторных анализов. Породы бруствера и окрестностей ВГВ. Результаты комплексного химического анализа образцов пород се-

зонно-талого слоя бруствера и по профилю от кратера воронки по 13-ти компонентам показало практически неизменные их значения. Существенные вариации значений установлены только для иона хлора. Содержание хлор-иона в породах, слагающих бруствер, изменялось от 16,4 до 23,3 мг/кг, а в отложениях верхней части сезонно-талого слоя сначала увеличивалось по мере удаления от воронки до 81,8 мг/кг на расстоянии 26 м, а дальше уменьшалось до 55,8 мг/кг на расстоянии 41 м и до 31,4 мг/кг на расстоянии 56 м от ВГВ.

Строение стенок воронки. На момент опробования разрез стенок воронки выглядел следующим образом. В «раструбе» ВГВ (горизонт А) вскрывались субвертикально ориентированные прослойки льда толщиной 1,0–3,0 см с включениями блоков минеральных частиц размером 2–4 мм, чередовавшиеся с прослоями чистого льда толщиной 0,5–1,0 см. С глубины 7 м, в перегибе стенки к цилиндрической части залегала линза льда горизонта В мощностью до 3 м с большим количеством пузырьков воздуха и редкими тонкими (толщиной около 1 см) прослоями мутного за счет минеральных включений льда. Лед цилиндрической части (горизонт С) на глубинах от примерно 10 до 25 м представлял собой вертикально-слоистую толщу: лед с минеральными включениями чередовался с прослоями чистого льда толщиной от 0,5–1 до 2 см. Пузырьки газа во льду практически отсутствовали.

Изотопный состав льда ВГВ и воды из озер. Значения содержания изотопов $\delta^{18}\text{O}$ (‰) во льду стенок воронки изменяются от –22,5 до –18,4, δD от –172,0 до –142,0, а дейтериевый эксцесс (d_{exc}) от 5,7 до 10,7 (таблица). Для воды из озера внутри воронки значения содержания изотопов от 25 августа 2014 г. составляли для $\delta^{18}\text{O}$ –19,9‰ (слой E), а через несколько месяцев, 9 ноября 2014 г. – –19,7‰ (слой D), то есть мало изменились. Значения содержания изотопов воды тундровых озер в районе воронки изменялись в большей степени для $\delta^{18}\text{O}$ (‰) от –14,5 до –11,5, для δD от –111,2 до –89,6, среднее значение d_{exc} составило 3,5.

Изотопный состав льда стенок грота на глубине 23,8 м (слой С) и лед слоя А характеризовались близкими значениями, лед слоя В отличался более легким составом и наибольшим дейтериевым эксцессом (среднее значение d_{exc} составило 10,5‰).

Ионный состав воды и льда воронки. Лед стенок воронки и вода из озера пресные и практически не содержат солей при рН 6,5–7,1. Минерализация льда слоя А не превышает 0,18 г/л, с глубины 6,0 м (слои В и С) минерализация льда меньше и составляет 0,01–0,1 г/л. Вода из озера имеет минерализацию в 2 раза больше – 0,29 г/л (слой D).

В составе ионов водорастворимых солей во льду слоев А, В и С преобладает гидрокарбонат-ион (45–81%) (рис. 3), а в воде озера (слои D и E) гидрокарбонат-ион составляет 57%. Ионов хлора в растворах оказалось меньше, чем гидрокарбонатов, их количество не превышало 42%. Количество сульфат-иона во льду и воде озера изменяется в неболь-

Изотопный состав подземных льдов воронки газового выброса (слои А, В, С) и озерной воды (D, E). $\delta^{18}\text{O}$ – значения изотопного состава по кислороду; δD – значения изотопного состава по дейтерию; d_{exs} – дейтериевый эксцесс

Слой льда и уровень воды в озере	Глубина, м	N	$\delta^{18}\text{O}$			δD			d_{exs}		
			min	mean	max	min	mean	max	min	mean	max
			‰								
A	5,8	9	-21,3	-20,9	-20,6	-165,0	-161,7	-159,0	6,4	7,7	8,2
B	7,6	9	-22,5	-22,2	-21,7	-172,0	-167,0	-163,0	10,0	10,5	10,7
C	18,6	18	-20,6	-19,1	-18,4	-157,0	-146,5	-142,0	5,7	6,7	8,6
C	23,8	9	-20,6	-20,4	-20,1	-160,0	-156,1	-153,7	7,3	8,0	8,6
D	25,5	10	-19,9	-19,7	-19,3	-150,2	-149,2	-147,0	8,6	9,4	10,3
E	35,0	3	-19,9	-19,9	-19,8	-150,2	-149,7	-149,6	9,1	9,4	9,6

Примечание: N – количество образцов.

шом диапазоне от 9 до 13% (слои В, С, D), во льду слоя А сульфат-иона еще меньше – 5%. Количество ионов натрия меняется от 28 до 70%. Во льду (слои А, С) и воде (D) ионы натрия преобладают над остальными, но для льда горизонта В среди катионов преобладает кальций-ион, его почти в два раза больше (44%), чем натрий-иона (28%). В остальных образцах льда количество кальций-иона не превышало 13%, а в воде озера ионов кальция было еще меньше – 5%. Во льду слоя С количество ионов кальция изменялось от 3 до 23% в образцах, отобранных из одного монолита. Количество ионов магния во льду и воде озера изменялось в диапазоне от 20 до 33% и максимальных своих значений достигало на глубине 23,8 м.

Содержание метана в воздухе и в воздушных пузырьках во льду. Показания портативного газоанализатора, настроенного на определение содержания метана в атмосфере, в июне 2014 г. увеличивались с глубиной от 0,3–2,8% до 9,6–9,8% (26 000–98 000 ppmV) при измерении от поверхности до придонного воздуха в ВГВ. В ноябре 2014 г. значения содержания метана в воздухе в ВГВ составляли 8–16 ppmV по двум образцам, что во много раз меньше. В то же время метана в воздухе ВГВ оставалось в несколько раз больше, чем в атмосфере, для которой среднее значение метана составляет 2 ppmV.

Во льду больше всего метана обнаружено в слое А, где количество метана в пузырьках воздуха составляло от 683,5 до 1794,5 ppmV, в среднем 1286,5 ppmV. Ниже, соответственно в слоях В и С, количество метана в воздушных пузырьках по разрезу почти в 50 раз меньше и незначительно меняется по глубине, в среднем составляя 19,0 ppmV. Количество метана в пузырьках льда с одной и той же глубины (18,6 м) на расстоянии 2 м менялось на 10 ppmV в зависимости от количества включенных пузырьков и минеральных примесей во льду. Более чистый стекловидный лед содержал 28,4 ppmV (в среднем по шести образцам), а лед с суммарно большим количеством минеральных включений только 19,6 ppmV (в среднем по пяти образцам). Содержание метана в воздушных пузырьках во льду стенок воронки превышает его значения в воздухе ВГВ.

Обсуждение результатов. Льды, наблюдавшиеся в стенках ВГВ в разное время, отличались на первых этапах исследования вертикальной слоистостью, свидетельствующей о деформации изначально горизонтальной слоистой толщи, вмещающей лед. Это подтвердилось, когда деформированные слои оттаяли, воронка частично заполнилась водой и в верхней части стенки обнажились пластовые льды с субгоризонтальной слоистостью. Материалы региональных исследований по пластовым льдам и поверхностным водам Центрального и Западного Ямала позволяют по характеру слоистости и расположению минеральных включений во льду стенок ВГВ отнести их к группе ранее описанных пластовых льдов Ямала [Стрелецкая с соавт., 2006; 2013; Крицук, 2010; Leibman et al., 2011].

Минерализация льда стенок воронки 0,01–0,18 г/л, как и у большинства пластовых залежей Ямала не превышает 0,3 г/л по 168 пробам [Фотиев, 1999] и соответствует минерализации слоистого пластового льда в районе полярной станции Марре-Сале (0,04–0,18 г/л) [Стрелецкая с соавт., 2013]. В составе ионов водорастворимых солей во льду воронки, как и в целом для ультрапресных пластовых льдов Ямала, половина анионов приходится на гидрокарбонат-ион (рис. 3, а, б). Количество хлор-иона (14–42%) и сульфат-иона (5–13%) во льду стенок воронки такое же или несколько меньше, чем в пластовых льдах Ямала (в среднем 37 и 13% соответственно). Магний-иона во всех образцах льда стенки воронки было столько же, сколько в слоистых пластовых льдах в районе Марре-Сале, и столько же ионов натрия и калия (54–70%), но в 2 раза меньше ионов кальция. Исключение составляет лед слоя В: количество кальций-иона в нем достигает 44%, что является косвенным свидетельством участия атмосферных вод в формировании этого ледяного тела.

Значения изотопного состава льда стенок воронки и воды из озера в воронке сопоставлены с значениями изотопного состава подземных льдов района Марре-Сале и глобальной линией метеорных вод (рис. 4). Значения стабильных изотопов льда стенки воронки и в слоистых пластовых льдах в районе Марре-Сале оказалось в близком диапазоне (рис. 4, III), как и значения дейтериевого эксцесса. Однако льды

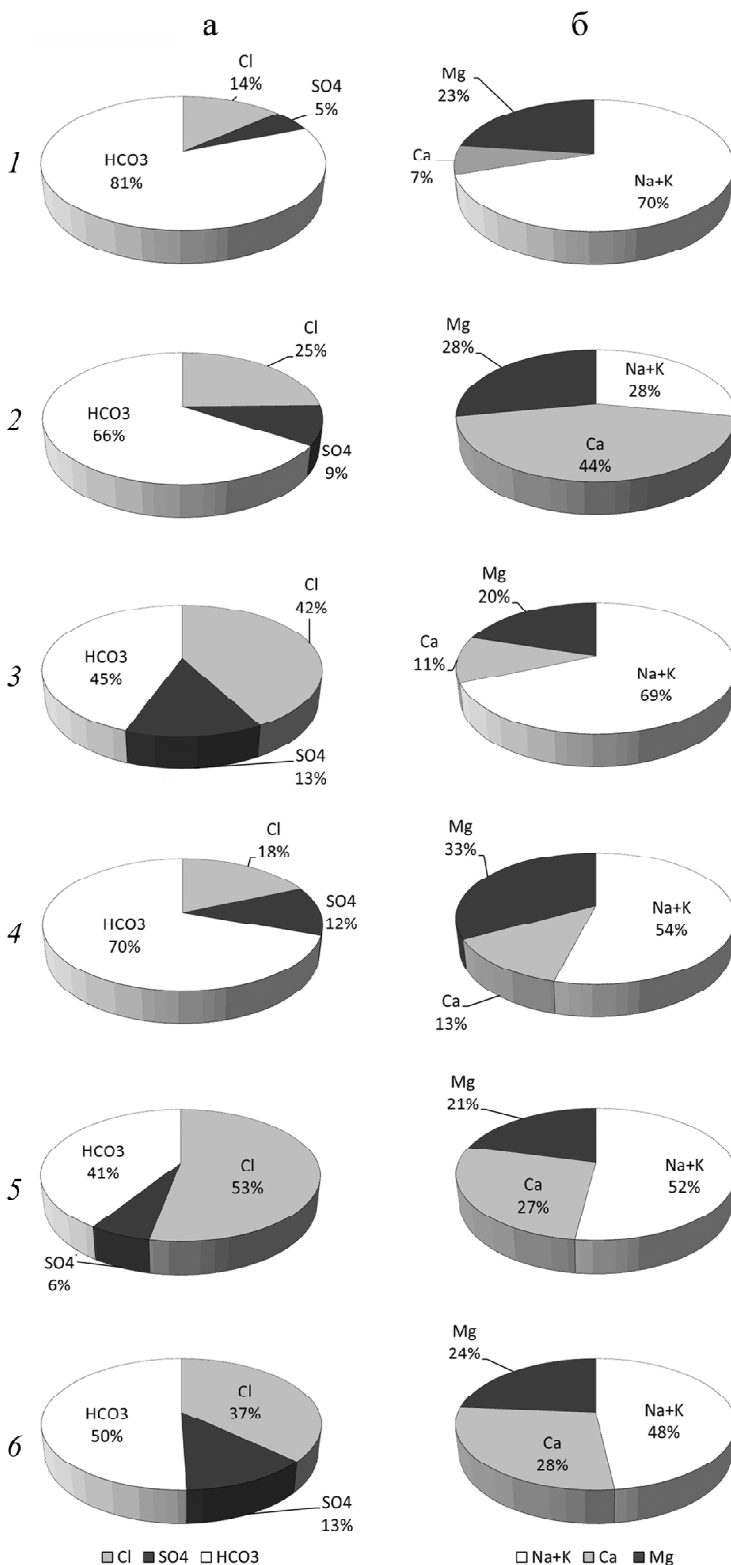


Рис. 3. Средний ионно-солевой состав льда стенок воронки и пластовых льдов Ямала. а – анионы, б – катионы. Условные обозначения: лед из воронки: 1 – горизонт А (глубина 5,8 м); 2 – горизонт В (глубина 7,9 м); 3 – горизонт С (глубина 18,6 м); 4 – горизонт С (глубина 23,8 м); 5 – ледо-грунтовая толща, Марре-Сале; 6 – пластовые льды Западного Ямала (по С.М. Фотиеву, 1999)

Fig. 3. Mean ion-salt composition of ice from the crater walls and the massive ice of the Yamal Peninsula: а – anions, б – cations; crater ice: 1 – A layer (5,8 m), 2 – B layer (7,9 m), 3 – C layer (18,6 m), 4 – D layer (23,8 m); 5 – ice-ground layer, Marre-Sale; 6 – massive ice of the Yamal Peninsula (after S.M. Fotiev, 1999)

стенок ВГВ отличаются от стекловидных пластовых льдов (рис. 4, V), перекрытых засоленными морскими глинами, и от полигонально-жильных льдов голоценового и верхнеплейстоценового возраста (рис. 4, I и IV). Значения стабильных изотопов кислорода и дейтерия льда стенок воронки хорошо коррелируют с данными, полученными по неглубоко залегающим пластовым залежам в толще третьей террасы р. Сеяха (Мутная) в районе Бованенковского месторождения, но отличаются от пластовых льдов с глубины 28 м, перекрытых морскими глинами в том же районе [Васильчук с соавт., 2009].

По значениям изотопного состава воды из озера воронки можно предположить, что воронка заполняется водой и отражает смесь из тающих слоев льда стенок с различным изотопным составом. Значения стабильных изотопов вод озер, расположенных недалеко от воронки, резко отличаются от воды из озера воронки.

Концентрация метана во льду стенки воронки в немногих проанализированных образцах на порядок меньше, чем в слоистых пластовых льдах в районе Марре-Сале, [Васильев с соавт., 2015]. Высокое содержание метана в пластовых льдах является результатом его миграции из вмещающих пород и концентрирования в ледяном теле. В случае ВГВ метан, видимо, концентрировался и заполнял полость, которая фиксируется по наличию «грота» (рис. 2) внутри ледяного тела. При образовании воронки метан полностью вышел на поверхность и смешался с воздухом. О том, что в воронке находился газ, в том числе метан, свидетельствуют большие значения концентрации газа, зафиксированные газоанализатором при первом посещении воронки в августе 2014 г., и повышенное содержание метана в воздухе внутри воронки, установленное в ноябре 2014 г. В пузырьках воздуха во льду слоя А метана было во много раз больше, чем в атмосфере. По нашим данным, лед слоя А и лед из стенки грота на глубине 28,3 м (слой С) имеют близкий изотопный и химический состав, что позволяет предполагать их общий генезис. Слой А – это перемещенный при взрыве воронки слой льда с глубины. Об этом свидетельствует и то, что эта линза льда полностью исчезла при отступании стенок воронки, то есть существовала только в границах предшествовавшего воронке бугра. На то, что из воронки фонтанировала смесь газа, льда и минерализованной воды, свидетельствует повышенное содержание ионов хлора, зафиксированное на расстоянии 26,0–41,0 м от воронки, в радиусе максимального выброса породы.

Выводы:

– полученные результаты позволили: (1) сопоставить результаты исследования льда стенок ВГВ с результатами исследований под-

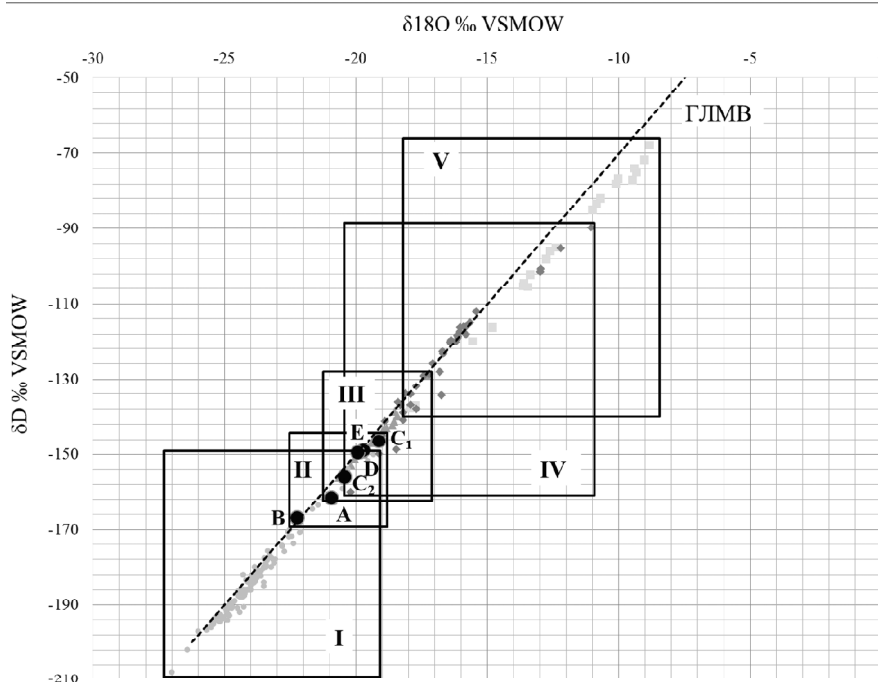


Рис. 4. Изотопный состав подземных льдов в районе метеостанции Марре-Сале, подземных льдов воронки газового выброса и озерной воде в воронке. Диапазоны значений изотопного состава: I – полигонально-жильные льды неоплейстоценового возраста, Марре-Сале, II – пластовый лед из стенок воронки, III – слоистый пластовый лед, Марре-Сале, IV – полигонально-жильные льды голоценового возраста, Марре-Сале, V – пластовый стекловидный лед, Марре-Сале. Черными точками показаны значения изотопного состава льда стенок воронки и воды в озере. Буквы соответствуют горизонтам льда (A, B, C) и уровням воды в кратере: D – август 2014 г.; E – ноябрь 2014 г. (см. табл. и рис. 1). ГЛМВ – глобальная линия метеорных вод

Fig. 4. Isotope composition of the ground ice in the Marre-Sale area, the ground ice of the gas-emission crater and the lake water in the crater. Range of the isotope composition values: I – Neo-Pleistocene polygonal ice wedges, Marre-Sale, II – massive ice from the crater walls, III – layered massive ice, Marre-Sale, IV – Holocene polygonal ice wedges, Marre-Sale, V – massive glassy ice, Marre-Sale. Black dots are for the isotope composition values in the ice from the crater walls and the lake water. Letters indicate the ice layers (A, B, C) and water levels in the crater: D – August 2014, E – November 2014. GMWL – Global Meteoric Water Line

земных льдов, поверхностных и атмосферных вод Ямала; (2) установить место концентрации газа; (3) объяснить различие между объемом воронки и объемом выброшенного материала; (4) оценить вероятность возникновения подобного процесса в будущем;

- мощные, залегающие неглубоко от поверхности, линзы пресного пластового льда – характерная особенность четвертичного разреза полуострова Ямал, в том числе и для района ВГВ;

- так как изотопный состав льда стенок воронки значительно легче, чем озерная вода Ямала, то современные озерные воды не могли быть источником воды при формировании льда воронки;

- существование и форма «грота» на глубине 20 м, имеющего больший диаметр, чем жерло воронки, свидетельствует о полости, в которой мог накапливаться газ и находиться минерализованная вода, криопэг. Метан находился в полости воронки до

ее разрушения, об этом свидетельствуют его высокое содержание в воздухе внутри кратера воронки в июле 2014 г. и резкое уменьшение этого показателя в ноябре 2014 г. О накоплении метана во льду на глубине свидетельствует и высокое его содержание в воздушных пузырьках самого верхнего слоя льда (A), который был поднят на поверхность при взрыве и локализовался в границах бугра, разрушающегося сейчас на поверхности;

- о существовании линзы минерализованной воды и ее излиянии на поверхность при взрыве свидетельствует повышенная концентрация хлор-иона в породах сезонно-талого слоя на расстоянии 26,0 м от воронки;

- предположительно, именно процесс формирования, расширения и заполнения воронок, активность которого относится к наиболее теплomu периоду голоцена (примерно 10–8 тыс. лет назад), отвечает за формирование части озер Ямала, имеющих округлую форму и аномальную глубину.

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за ценные советы и замечания. Авторы признательны Российскому центру освоения Арктики (Салехард) за организацию полевых исследований на воронке и частичное финансирование лабораторных работ, Институту полярных и морских исследований им. А. Вегенера (Потсдам, Германия) за изотопные анализы воды и расплавов льда, Институту физико-химических и биологических проблем почвоведения (Пушино) за определения количества метана во льду и воздухе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ (№ 16-17-10203). Данные по пластовым льдам Марре-Сале получены в рамках проекта РФФИ № 16-05-00612 А, НИР ГЗ 1.5. «Изменение криосферы Земли под влиянием природных факторов и техногенеза».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Ананьева Г.В. Особенности инженерно-геокриологических условий северного отрезка проектируемой трассы железной дороги Обская-Бованенково // Итоги фундаментальных исследований криосферы Земли в Арктике и Субарктике. Мат-лы между. конф. Пушино, 23–26 апреля 1996 г., Новосибирск: Наука, Сиб. отд. РАН, 1997. С. 116–123.

Бондарев В.Л., Миротворский М.Ю., Зверева В.Б., Облеков, Г.И., Шайдуллин Р.М., Гудзенко В.Т. Газогеохимическая характеристика надсеноманских отложений полуострова Ямал (на примере Бованенковского нефтеконденсатного месторождения) // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2008. № 5. С. 22–34.

Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Мельников В.П., Облогов Г.Е. Метан в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях Западного Ямала // Докл. Академии наук. 2015. Т. 465. № 5. С. 604–607.

Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н., Папеш В., Подборный Е.Е., Сулержицкий Л.Д. Изотопно-кислородная и дейтериевая индикация генезиса пластовых льдов и их C^{14} возраст (Бованенково, Центральный Ямал) // Докл. Академии наук. 2009. Т. 428. № 5. С. 675–681.

Инженерно-геологический мониторинг промыслов Ямала. В 2-х т. Т. 2. Геокриологические условия освоения Бованенковского месторождения. Тюмень: ИПОС СО РАН, 1996. 240 с.

Кизяков А.И., Сониюшкин А.В., Лейбман М.О., Зимин М.В., Хомутов А.В. Геоморфологические условия образования воронки газового выброса и динамика этой формы на Центральном Ямале // Криосфера Земли. 2015. Т. IX. № 2. С. 15–25.

Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал. Т. 2. Криосфера Бованенковского нефтеконденсатного месторождения / Под общ. ред. Ю.Б. Баду, Е.А. Гафарава, Е.Е. Подборного. М.: ООО «Газпром эксп», 2013. 424 с.

Крицук Л.Н. Подземные льды Западной Сибири. М.: Научный мир, 2010, 352 с.

Лейбман М.О., Кизяков А.И. Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. М.: Институт криосферы Земли СО-РАН, 2007. 206 с.

Лейбман М.О., Кизяков А.И., Плеханов А.В. Ямальская воронка газового выброса: результаты предварительного обследования // Холодок. 2014. № 2(12). С. 9–15.

Оленченко В.В., Синицкий А.И., Антонов Е.Ю., Ельцов И.Н., Кушнаренко О.Н., Плотников А.Е., Потапов В.В., Эпов М.И. Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования «Ямальский кратер» // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX. № 4. С. 94–105.

Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Матюхин А.Г. Изотопный состав подземных льдов Западного Ямала (Марре-Сале) // Лед и снег. 2013. № 2 (122). С. 83–92.

Стрелецкая И.Д., Каневский М.З., Васильев А.А. Пластовые льды в дислоцированных четвертичных отложениях западного побережья Ямала // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 2. С. 68–78.

Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопэггов и вмещающих их отложений Центрального Ямала // Криосфера Земли. 2002. Т. VI. № 3. С. 15–24.

Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения / Отв. ред. Е.М. Чувилин. М.: ГЕОС, 2007. 137 с.

Фотиев С.М. Закономерности формирования ионно-солевого состава природных вод Ямала // Криосфера Земли. 1999. Т. III. № 2. С. 40–65.

Якушев В.С. Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. М.: ВНИИГАЗ, 2009. 192 с.

Alperin M.J., Reeburgh W.S. Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Appl. Environ. Microbiol. 1985. V. 50. P. 940–945.

Leibman M.O., Kizyakov A.I., Plekhanov A.V., Streletskaia I.D. New permafrost feature – deep crater in Central Yamal, West Siberia, Russia, as a response to local climate fluctuations // Geography, environment, sustainability. 2014. V. 7(4). P. 68–80.

Leibman M.O., Perednya D.D., Kizyakov A.I., Lein A.Y., Savvichev A.S., Vanshtein B.G. Sulfur and carbon isotopes within atmospheric, surface and ground water, snow and ice as indicators of the origin of tabular ground ice in the Russian Arctic // Permafrost and Periglacial processes. 2011. V. 22(1). P. 39–48. DOI: 10.1002/ppp.716.

Поступила в редакцию 19.07.2016

Принята к публикации 09.12.2016

I.D. Streletskaia¹, M.O. Leibman², A.I. Kizyakov³,
G.E. Oblogov⁴, A.A. Vasiliev⁵, A.V. Khomutov⁶,
Y.A. Dvornikov⁷

GROUND ICE AND ITS ROLE IN THE FORMATION
OF GAS-EMISSION CRATER IN THE YAMAL PENINSULA

The results of hydro-geochemical and isotopic studies of tabular ground ice and crater-lake water from the gas-emission crater in the Yamal Peninsula are analyzed. These data are compared with the results of similar studies of tabular and ice-wedge ice, as well as surface and atmospheric waters of the Yamal Peninsula. Similarity in the isotopic and ionic composition of the crater tabular ground ice and stratified tabular ice of Marre-Sale area was found, in contrast to the ionic and isotopic composition of surface and atmospheric waters, as well as polygonal ice wedges in the region.

Key words: Gas-emission crater, ground ice, stable isotopes, chemical composition, methane.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Department of Cryolithology and Glaciology, Associate Professor, Senior Research Scientist; *e-mail:* irinastrelets@gmail.com

² Earth Cryosphere Institute, SB RAS, Tyumen State University, Tyumen, Leading Research Scientist; *e-mail:* moleibman@mail.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Moscow, Department of Cryolithology and Glaciology, Senior Research Scientist; *e-mail:* akizyakov@mail.ru

⁴ Earth Cryosphere Institute, SB RAS, Tyumen State University, Tyumen, Senior Research Scientist; *e-mail:* oblogov@mail.ru

⁵ Earth Cryosphere Institute, SB RAS, Tyumen State University, Tyumen, Leading Research Scientist; *e-mail:* al.a.vasiliev@gmail.com

⁶ Earth Cryosphere Institute, SB RAS, Tyumen State University, Tyumen, Leading Research Scientist; *e-mail:* akhomutov@gmail.com

⁷ Earth Cryosphere Institute, SB RAS, Tyumen State University, Tyumen, Research Scientist; *e-mail:* ydvornikov@gmail.com

Acknowledgements. The authors are grateful to the Russian center of Arctic development (Salekhard) for the organization of field research and partial financing of laboratory analyses, to the Vegener Institute of Polar and Marine Studies (Potsdam, Germany) for isotope analyses of water and melted ice, and to the Institute of physical-chemical problems of soil science (Pushhino) for analyses of methane concentrations in ice and air.

The study was financially supported by the Russian Science Foundation (№16-17-10203). Data on the ground ice in Marre-Sale were obtained in the framework of the Russian Foundation for Basic Research project № 16-05-00612 A and NIR GZ 1.5. «Cryosphere changes under the influence of natural factors and technogenesis».

REFERENCES

- Alperin M.J., Reeburgh W.S.* Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Appl. Environ. Microbiol. 1985. V. 50. P. 940–945.
- Ananeva G.V.* Osobennosti inzhenerno-geokryologicheskikh usloviy severnogo otrezka proektiruemykh trassy zheleznykh dorog i permafrost conditions of the northern section of the planned route of the Obskaya-Bovanenkovo railway // Itogi fundamentalnykh issledovaniy kriosfery Zemli v Arktike i Subarktike: Materialy Mezhd. Konf., Pushchino, 23–26 aprelya 1996 g., Novosibirsk: Nauka, 1997. S. 116–123 (in Russian).
- Bondarev V.L., Mirotvorskiy M.Yu., Zvereva V.B., Oblekov G.I., Saidulin R.M., Gudzenko V.T.* Gazokhimicheskaya kharakteristika nadsenomanskikh otlozheniy poluostrova Yamal (na primere Bovanenkovskogo neftekondensatnogo mestorozhdeniya) [Geochemical characterization post-Senoman Yamal deposits (case study of deposits of the Bovanenkovo oil and condensate field)] // Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdeniy. 2008. V. 5. S. 22–34 (in Russian).
- Fotiev S.M.* Zakonomernosti formirovaniya ionno-solevogo sostava prirodnykh vod [The regularities in the formation of ionic-salt composition of natural waters, the Yamal Peninsula] // Kriosfera zemly. 1999. T. III. № 2. S. 40–65 (in Russian).
- Inzhenerno-geologicheskii monitoring promyslov Yamala [Engineering and geological monitoring of the Yamal gas fields] T. II. Geokriologicheskie usloviya osvoiniya Bovanenkovskogo mestorozhdeniya / Pod red. V.V. Baulin, V.A. Aksenov, G.I. Dubikov i dr. Tyumn: IPOS RAN, 1996. 240 s. (in Russian).
- Kizyakov A.I., Sonyushkin A.V., Leibman M.O., Zimin M.V., Khomutov A.B.* Geomorfologicheskie usloviya obrazovaniya voronki gazovogo vybrosa i dinamika etoi formy na Tsentralnom Yamale [Geomorphological conditions of the gas-emission crater and its dynamics in Central Yamal] // Kriosfera zemly. 2015. T. IX. № 2. S. 15–25 (in Russian).
- Kriosfera neftegazokondensatnykh mestorozhdeniy poluostrova Yamal [Cryosphere gas condensate fields on the Yamal Peninsula], t. 2 Kriosfera Bovanenkovskogo neftekondensatnogo mestorozhdeniya / Pod obshch. red. Yu.B. Badu, E.A. Gafarova, E.E. Podbornogo. M.: OOO «Gazprom eksp», 2013. 424 s. (in Russian)
- Kritsuk L.N.* Podzemnye ldy Zapadnoy Sibiry [Ground ice of West Siberia]. M.: Nauchnyy Mir, 2010. 352 s. (in Russian).
- Leibman M.O., Kizyakov A.I.* Kriogennyye opolzny Yamala i Yugorskogo poluostrova [Cryogenic landslides of Yamal and Yugorsky peninsular] Moskva: Institute kriosfery Zemli SO RAN, 2007. 206 s. (in Russian).
- Leibman M.O., Kizyakov A.I., Plekhanov A.V.* Yamalskaya voronka gazovogo vybrosa: rezultaty predvaritel'nogo obsledovaniya [The Yamal crater gas emissions: the results of the preliminary survey] // Kholodok. 2014. № 2(12). S. 9–15 (in Russian).
- Leibman M.O., Kizyakov A.I., Plekhanov A.V., Streletskaia I.D.* New permafrost feature - deep crater in Central Yamal, West Siberia, Russia, as a response to local climate fluctuations // Geography, environment, sustainability. 2014. V. 7(4). P. 68–80. (in Russian).
- Leibman M.O., Perednya D.D., Kizyakov A.I., Lein A.Y., Savvichev A.S., Vanshtein B.G.* Sulfur and carbon isotopes within atmospheric, surface and ground water, snow and ice as indicators of the origin of tabular ground ice in the Russian Arctic // Permafrost and Periglacial processes, V. 22 (1). 2011, P. 39–48. DOI: 10.1002/ppp.716.
- Olenchenko V.V., Sinitskiy A.I., Antonov E.Y., Eltsov I.N., Kushnarenko O.N., Plotnikov A.E., Potapov V.V., Epov M.I.* Rezultaty geofizicheskikh issledovaniy territorii geologicheskogo novoobrazovaniya «Yamalskii krater» [Results of geophysical researches of the area of new geological formation «Yamal Crater»] // Kriosfera zemly. 2015. T. XIX. № 4. S. 94–105 (in Russian).
- Streletskaia I.D., Kanevskiy M.Z., Vasiliev A.A.* Plastovye ldy v dislozirovannykh chetvertichnykh otlozheniyakh Yamala [Massive ground ice in dislocated Quaternary sediments of Western Yamal] // Kriosfera zemly. 2006. T. X. № 2. S. 68–78 (in Russian).
- Streletskaia I.D., Leibman M.O.* Kriogeokhimicheskaya vzaimosvyaz plastovykh ldov, kriopegov i bmeshchayushchikh ikh otlozheniy [Cryogeochemical interrelation of massive ground ice, cryopegs, and enclosing deposits of Central Yamal] // Kriosfera zemly. T. VI. № 3. 2002. S. 15–24 (in Russian).
- Streletskaia I.D., Vasiliev A.A., Oblogov G.E., Matyukhin A.G.* Izotopnyy sostav podzemnykh ldov Zapadnogo Yamala [Isotopic composition of ground ice in Western Yamal (Marre-Sale)] // Led i sneg. № 2(122). 2013. S. 83–92 (in Russian).
- Stroenie i svoystva porod kriolitozony yuzhnoy chaste Bovanenkovskogo gazokondensatnogo mestorozhdeniya [Structure and properties of rocks in the permafrost zone south of the Bovanenkovo gas condensate field] / Otv. red. E.M. Chuvilin. M.: GEOS, 2007. 137 s. (in Russian).
- Vasil'chuk Yu.K., Vasil'chuk A.C., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N., Papesch W., Podborny Ye., Sulerzhitskiy L.D.* Izotopno-kislородnaya i deyerievaya indikatsyya genesis plastovykh ldov i ikh C14 vozrast (Bovanenkovo, Tsentralnyy Yamal) [Oxygen Isotope and Deuterium Indication of the Origin and 14C Age of the Massive Ice, Bovanenkovo, Central Yamal Peninsula] // Doklady Akademii nauk. 2009. T. 428. № 5. P. 675–681 (in Russian).
- Vasiliev A.A., Streletskaia I.D., Melnikov V.P., Oblogov G.E.* Metan v podzemnykh ldakh i merzlykh chetvertichnykh otlozheniyakh Zapadnogo Yamala [Methane in massive ground ice and frozen Quaternary Deposits of Western Yamal] // Doklady Akademii nauk. 2015. T. 465. № 5. P. 604–607. (in Russian)
- Yakushev V.S.* Prirodnyy gaz i gazovye gidraty v kriolitozone [Natural gas and gas hydrates in permafrost]. M.: VNIIGZ, 2009. 192 s. (in Russian)

Received 19.07.2016

Accepted 09.12.2016