

Активизация криогенных процессов на территории Центрального Ямала как следствие региональных и локальных изменений климата и теплового состояния пород

Е. А. Бабкина*, М. О. Лейбман*^{*, **},
Ю. А. Дворников*, Н. Ю. Факащук*,
Р. Р. Хайруллин*, А. В. Хомутов*^{*, **}

Для объяснения причин активизации криогенных процессов на территории Центрального Ямала рассмотрены различные климатические параметры (средняя годовая, зимняя и летняя температура воздуха, количество зимних и летних атмосферных осадков) и их изменчивость во времени. Проанализировано влияние колебаний этих параметров на глубину протаивания и температуру пород. Проведен регрессионный анализ для реконструкции температуры пород в более ранние периоды времени за годы, предшествовавшие активизации термоденудации и появлению воронок газового выброса.

Ключевые слова: Центральный Ямал, криогенные процессы, воронка газового выброса, термоцирк, глубина сезонного протаивания, температура многолетнемерзлых пород.

1. Введение

Аномальные условия погоды последних лет привели к резкой активизации на территории Центрального Ямала криогенных процессов, обусловленных вытаиванием подземных льдов [23]. В частности, термоденудация связана со значительным увеличением мощности сезонного слоя и с достижением сезонным протаиванием кровли пластовых льдов. В этой работе под процессом термоденудации понимается комплекс гравитационных и эрозионных процессов, совместно развивающихся на склонах при протаивании многолетнемерзлых отложений и ведущих к выколаживанию склона [2, 3, 5]. В результате образовались термоцирки — специфические отрицательные формы рельефа (амфитеатровидные углубления в склоне [20]), формирующиеся в результате сноса материала вниз по склону и обнажения стенок с подземными льдами, — индикаторы существенного теплового воздействия положительных трендов температуры воздуха на тепловое состояние многолетнемерзлых пород даже в зоне их сплошного распространения [9]. Аномалии погоды привели также к возникновению ново-

* Институт криосферы Земли Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук; e-mail: ea_pereval@mail.ru.

** Тюменский государственный университет.

го природного феномена — воронок газового выброса (ВГВ), которые, по мнению авторов, образовались в результате высвобождения метана в верхних горизонтах многолетнемерзлых пород [6, 25].

Изменения во времени глубины протаивания и температуры пород служат базовыми показателями для полной оценки динамики многолетнемерзлых пород. Подход к оценке вероятной активизации криогенных процессов и факторов, влияющих на нее в исследуемом районе севера Западной Сибири, связан с наличием в геологическом разрезе подземных пластовых льдов, засоленных глинистых пород и газонасыщенности как пород, так и пластового льда [7, 13, 16]. Авторы исходили из предположения, что термоцирки образовались при резком увеличении глубины сезонноталого слоя теплым летом 2012 г. и активно развивались вследствие продолжающегося углубления этого слоя и в более поздние годы (в 2013 и 2016 гг.). Воронки газового выброса образовались вследствие высвобождения метана из мерзлых пород и подземного льда, видимо, частично или полностью посредством разложения реликтовых газовых гидратов под действием направленного изменения температуры многолетнемерзлых пород [25]. Проблема активизации криогенных процессов (термоденудации и образования воронок газового выброса) как результата изменения теплового состояния пород требует ответа на следующие вопросы.

1. Как изменяются основные параметры, характеризующие тепловое состояние многолетнемерзлых пород (глубина сезонноталого слоя и температура пород)?
2. Каким образом влияют колебания различных климатических параметров (летней, зимней и средней годовой температуры воздуха, количества летних и зимних атмосферных осадков, а также внутригодового хода и сочетания перечисленных параметров) на глубину сезонноталого слоя и температуру пород?
3. Каким образом динамика показателей теплового состояния многолетнемерзлых пород влияет на активизацию исследуемых криогенных процессов?

2. Район работ и объекты исследования

В статье рассматриваются криогенные явления на территории Центрального Ямала: появившиеся начиная с 2012 г. воронки газового выброса и резко активизировавшиеся термоцирки.

Исследуемый район находится в биоклиматической зоне тундры, подзоне типичных тундр. Территория представляет собой сочетание поверхностей разной высоты (равнин и террас с абсолютной высотой от 5 до 55 м), интенсивно расчлененных озерами и ручьями. Основные объекты исследования расположены в границах стационара “Васькины Дачи” или на небольшом расстоянии от него, поэтому для анализа основных параметров сезонноталого слоя и многолетнемерзлых пород анализируются данные мониторинга на экспериментальных площадках стационара (рис. 1). Для ключевого участка рассчитаны климатические параметры по данным метеостанции Марре-Сале [21, 22], расположенной менее чем в 100 км к западу от стационара и в 50 км к западу от воронки газового выброса ВГВ-1.

Динамика глубины протаивания анализируется для выявления причин активизации термоденудации. Наблюдения за динамикой глубины протаивания

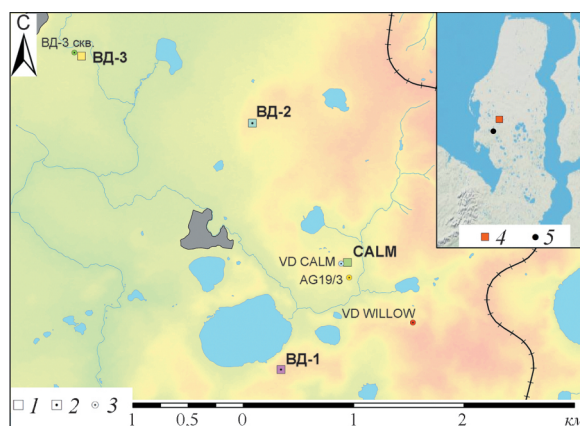


Рис. 1. Местоположение ключевого участка стационара “Васькины Дачи”, воронки газового выброса ВГВ-1 и экспериментальных площадок стационара.

1, 2 — площадки мониторинга глубины сезонноталого слоя без скважины (1) и со скважиной (2); 3 — отдельные скважины; на врезке: 4 — стационар “Васькины Дачи”; 5 — ВГВ-1.

вания проводятся многими исследователями достаточно давно. Этому, в частности, способствует Международная программа циркумполярного мониторинга сезонноталого слоя (Circumpolar Active Layer Monitoring, CALM) [8, 11, 18, 27]. Динамика глубины протаивания исследована в пределах геокриологического стационара “Васькины Дачи” на Центральном Ямале. Мониторинг глубины сезонноталого слоя на Центральном Ямале проводится ежегодно в конце теплого сезона. В статье использованы данные четырех площадок ключевого участка “Васькины Дачи” (см. рис. 1, [24]), которые характеризуются различными ландшафтными условиями: площадка CALM размером 100 × 100 м (121 точка) и площадки ВД-1, ВД-2, ВД-3 размером 50 × 50 м (по 55 точек каждая). Наблюдения на площадке CALM, включенной в международную программу мониторинга [17], начались в 1993 г., площадки ВД-1—3 были заложены в 2007 г. Длительный ряд наблюдений позволяет установить закономерности динамики глубины протаивания, в том числе в условиях климатических изменений последних лет.

Для решения проблем образования воронок газового выброса анализируются данные о температуре пород. Мониторинг температуры пород проводится в рамках международной программы Termal State of Permafrost (TSP) [17, 26].

Наблюдения за температурой пород производятся с помощью термометрических кос, оснащенных логгерами, на разной глубине (от 0,9 до 10 м на глубинах от 0—6 см (под растительным покровом, и ниже с шагом 0,5 м), в скважинах, находящихся в различных геоморфологических, ландшафтных и геологических условиях. Ввиду нестабильной работы логгеров не во всех скважинах получен непрерывный ряд наблюдений на всех уровнях за полный год, что осложняет определение средних годовых значений. По-

Таблица 1

Метаданные термометрических скважин с наиболее полными рядами наблюдений

Скважина	Глубина заложения датчиков температуры, м	Период наблюдений
AG19-3	0; 0,10; 1,00	2008—2017
VD Willow	0; 0,40; 0,90; 1,40	2014—2017
CALM	0,03; 0,50; 1,00; 1,50	2008—2017
CALM_10 м	0; 0,50; 1,00; 1,50; 10,00	2012—2017
ВД-1	0; 0,25; (0,50; 0,90)	2008—2017 (2014—2017)
ВД-2	0,03; 0,25; (0,50; 1,00)	2008—2017 (2011—2017)
ВД-3	0; (0,25; 0,50); 1,00	2008—2017 (2008—2016)

этому для анализа выбраны скважины, показанные на карте, и уровни с наиболее полными рядами наблюдений (см. рис. 1, табл.1). В ландшафтном отношении район ВГВ-1 в наибольшей степени совпадает со скважиной VD Willow, расположенной в оползневом цирке. Здесь поверхность так же, как и в окрестностях ВГВ-1, поросла высокоствольной ивой. В разрезе преобладают глинистые отложения, а в сезонноталом слое описаны засоленные глины.

3. Результаты исследования и обсуждение**3.1. Динамика глубины сезонного протаивания и активизация термоденудации**

Поскольку термоденудация с формированием термоцирков развивается на участках склонов под действием силы тяжести, следует более детально рассматривать динамику глубины протаивания именно на поверхностях склонов, сопоставляя ее с вершинными поверхностями, для которых есть более длинные ряды данных наблюдений. В пределах площадки CALM выделяется несколько типов поверхностей, которые можно объединить в две основные группы: вершинную и склоновую, отличающиеся как уклоном, так и степенью задернованности. Породы сезонноталого слоя меняются от песчаных на вершине до супесчано-суглинистых и глинистых на склоне. Площадки ВД-1 и ВД-2 представляют собой задернованные вершинные поверхности с супесчано-глинистыми породами в сезонноталом слое, площадка ВД-3 — слабозадернованная плоская поверхность террасы с песчаными породами. Таким образом, исследованиями охвачены основные типы местности. Межгодовая изменчивость средней по площадке глубины протаивания для двух основных групп типов местности приведена на рис. 2а.

Как видно на рисунке, наибольшая глубина протаивания наблюдается на песчаных поверхностях площадок “CALM Вершина” и ВД-3, для них же характерна наибольшая межгодовая амплитуда. В то же время полностью задернованные вершинные поверхности площадок ВД-1, ВД-2 и склоновая “CALM Склон” отличаются и меньшей глубиной протаивания, и меньшим диапазоном изменений в разные годы. Тем не менее, в 2012 и 2013 гг. все типы поверхностей характеризуются значительным увеличе-

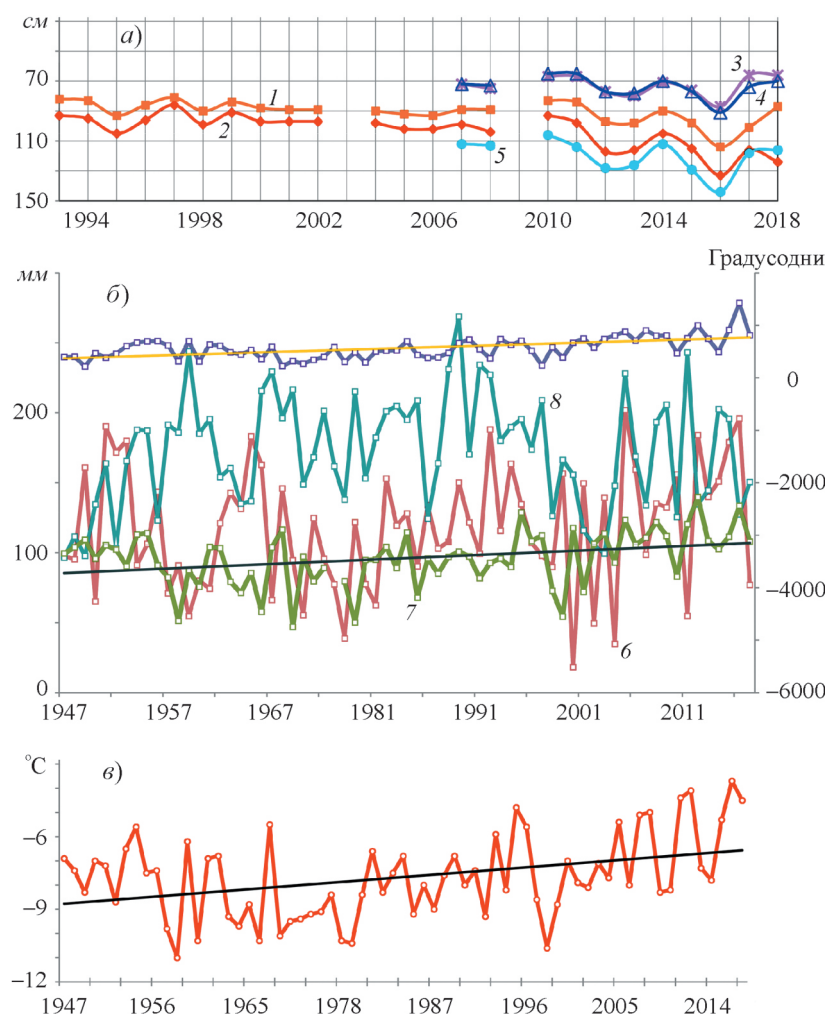


Рис. 2. Межгодовая динамика глубины протаивания на склоне (1) и плоских вершинах (2), на площадках ВД-1 (3) и ВД-2 (4) на суглинистых породах (задернованные) и ВД-3 (5) на песчаных породах (слабо задернованная) (а), а также межгодовая динамика климатических характеристик (б, в) по данным метеостанции Марре-Сале: б) осадки летние (6) и зимние (7); сумма отрицательных (8) и положительных (9) температур; в) среднегодовая температура воздуха; прямые — линейный тренд.

нием глубины протаивания по сравнению с предыдущим периодом 1993—2011 гг. (от 12% на склоне и площадках ВД-1 и ВД-2 до 20% на вершинной поверхности площадки CALM). А в 2016 г. произошло еще более резкое увеличение глубины протаивания — на 24—37% относительно периода 1993—2011 гг. Такие изменения связаны в основном с повышением температуры воздуха летом (рис. 2б), а также с увеличением количества летних осадков (в 2012 и 2016 гг. отмечены как самые высокие суммы положительных температур, так и самые большие суммы летних осадков).

Таким образом, существенное увеличение глубины протаивания вследствие потепления в 2012 г. привело к активному развитию криогенных

процессов, связанных с вытаиванием верхней части залежи подземного льда и образованием отрицательных форм рельефа — термоцирков. Минимальная глубина залегания пластовых льдов, вскрывающихся в стенках термоцирков, по нашим наблюдениям, составляет 2 м, и при определенных условиях на склонах, в частности в условиях морозобойного растрескивания поверхности, сезонное протаивание в наиболее теплые годы может достичь этой глубины. Скорость развития процесса термоденудации, еще возросшая летом 2016 г. [23], подтверждает значимость фактора глубины протаивания в активизации и развитии этого процесса.

3.2. Возникновение воронок газового выброса и динамика температуры пород

Для оценки влияния динамики температурного поля пород на формирование воронок газового выброса рассмотрен ход температуры на разной глубине, а также предпринята попытка определить температуру пород на глубине, соответствующей известному положению дна ВГВ-1, на предполагаемую дату начала образования бугра — предшественника воронки [1] и флуктуации температуры пород до даты появления ВГВ-1 в 2013 г.

Для расчета средней годовой температуры пород и воздуха принят условный “гидрологический” год с началом 1 сентября (дата является ближайшей к датам фактически измеренной глубины протаивания, которая одновременно близка к максимальному протаиванию), например, для 2009 г. за гидрологический год принят период с 1 сентября 2008 г. по 31 августа 2009 г.

Анализ температурных рядов в скважинах стационара “Васькины Дачи” показывает следующее. Наблюдается положительный тренд средней годовой температуры воздуха за период с 1947 г. (предполагаемый год начала высвобождения газа из мерзлых пород и роста бугра) (рис. 2в): за период между началом роста бугра и датой образования воронки (66 лет) она выросла на $1,7^{\circ}\text{C}$ (скорость изменения $0,03^{\circ}\text{C}/\text{год}$).

На температуру пород большее влияние оказывают зимняя температура воздуха и сумма зимних осадков (рис. 2б). За период с 1947 г. прослеживается тренд увеличения суммы отрицательных температур к 2013 г. с наибольшим значением в 2012 г.; тренда суммы зимних осадков не наблюдается, т. е. роль снежного покрова в формировании тренда температуры пород сводится только к различным условиям перераспределения снега в зависимости от рельефа и микрорельефа [4].

Также по всей глубине сезонноталого слоя можно наблюдать повышение температуры пород в наиболее теплые 2012 и 2016 гг. Это подтверждается данными о температуре пород в термометрических скважинах глубиной от 0,9 до 1,5 м (рис. 3а—ж).

В скважине CALM (рис. 3з) можно отметить постоянное повышение средней годовой температуры на глубине 10 м, начиная с момента заложения скважины в 2011 г. (ее рост за 5 лет наблюдений составил $0,5^{\circ}\text{C}$). Хорошо видно, что самый теплый за время наблюдения 2016 г. привел к значительному повышению температуры пород на глубине 10 м в 2017 г.

Современная температура многолетнемерзлых пород в районе ВГВ-1 составляет от -1 до -5°C [19]. Температура пород на глубине 10 м в сква-

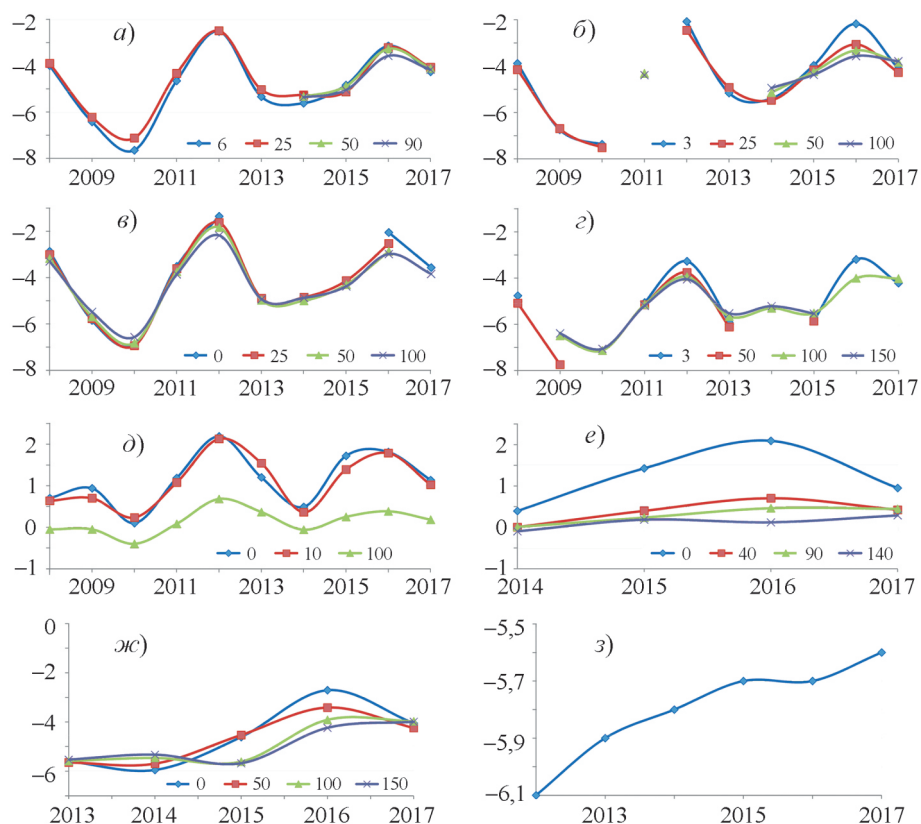


Рис. 3. Межгодовая изменчивость средней годовой температуры пород в скважинах на площадках: а) ВД-1; б) ВД-2; в) ВД-3; г) “Вершина CALM”; д) AG19-3 (в кустарнике); е) VD Willow (в кустарнике); ж) “CALM_10 м” (в пределах сезонноталого слоя); з) “CALM_10 м” (на глубине 10 м).

В обозначениях кривых на рисунках а—ж указана глубина (см).

жинах в районе ВГВ-1, измеренная в августе 2015 г., составила от $-4,3^{\circ}\text{C}$ на задернованном привершинном склоне до $-2,7^{\circ}\text{C}$ на хасырее, $-1,6^{\circ}\text{C}$ на берегу термокарстового озера и $-1,2^{\circ}\text{C}$ в непосредственной близости от бровки воронки. Она сопоставлена со средней годовой температурой пород на подошве сезонноталого слоя по данным измерений в скважинах стационара “Васькины Дачи” за тот же год (исходя из соображений, что температурный градиент не превышает $0,2^{\circ}\text{C}$ на 10 м, и принимая во внимание точность измерения температуры $0,1^{\circ}\text{C}$, можно отождествить температуру пород на подошве сезонноталого слоя и на глубине 10 м), которая составила: для скважин AG19 и Willow $0,2^{\circ}\text{C}$, для скважины CALM $-5,5^{\circ}\text{C}$, для ВД-1 $-5,1^{\circ}\text{C}$, для ВД-2 и ВД-3 $-4,4^{\circ}\text{C}$.

Чтобы оценить температуру на поверхности пород (под растительным покровом) и на подошве сезонноталого слоя на период предположительного образования бугра-предшественника, был проведен регрессионный анализ с помощью программного комплекса Statistica 10.0. Для этого в качестве зависимых переменных взяты средние годовые значения температуры пород в имеющихся скважинах, в качестве независимых переменных —

средние годовые значения температуры воздуха и суммы отрицательных температур. Регрессионный анализ был проведен с достоверностью 0,05 с получением линейной модели связи между переменными. Выявлены высокие прямые корреляционные связи температуры пород на подошве сезонноталого слоя с суммами отрицательных температур воздуха (коэффициент корреляции $r = 0,80—0,92$) и на поверхности со средними годовыми температурами воздуха ($r = 0,80—0,93$) со статистически значимым уровнем достоверности $p < 0,05$. Коэффициенты детерминации $R^2 = 0,64—0,90$ для температуры на подошве сезонноталого слоя и $R^2 = 0,64—0,85$ для температуры на поверхности также показывают достаточную корректность использования примененной модели для прогноза зависимой переменной (температуры пород). Наименьший коэффициент детерминации $R^2 = 0,64$ для скважин на площадках AG19-3 и VD Willow, покрытых кустарником, свидетельствует о влиянии мощного удерживаемого кустарником снежного покрова.

С помощью регрессионного анализа были реконструированы средние годовые температуры пород начиная с 1947 г. для каждого года до даты начала наблюдений в скважинах. По линии линейного тренда с 1947 по 2013 г. вычислено повышение температуры многолетнемерзлых пород в каждой скважине за период с начала роста бугра до даты образования ВГВ-1. Результаты регрессионного анализа приведены в табл. 2.

Скважины ВД-1 и VDWillow, к сожалению, имеют самый короткий ряд натурных наблюдений (2014—2017 гг.), и для них регрессионные модели наименее достоверны.

Для скважин на поверхностях, покрытых кустарником, наблюдается наименьший тренд увеличения температуры пород — $0,2—0,3^{\circ}\text{C}$ с 1947 г. ($0,003—0,005^{\circ}\text{C}/\text{год}$). Наибольший тренд ($1,1$ и $0,02^{\circ}\text{C}/\text{год}$) отмечается в скважине ВД-3, которая расположена на слабозадернованной песчаной поверхности и в наибольшей степени коррелирует с колебаниями температуры воздуха, распространению которых не препятствует теплоизолирующий растительный покров.

Можно отметить, что годовой тренд температуры пород за период наблюдений 2008—2017 гг. ($0,04—0,20^{\circ}\text{C}/\text{год}$) существенно больше годового

Таблица 2

Средняя температура пород на подошве сезонноталого слоя за разные периоды и тренды температуры за эти периоды по результатам регрессионного анализа

Скважина	$T_{\text{пор}}$ за период наблюдений 2008—2017 гг. (2014—2017 гг.), $^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{пор}}$ за расчетный период 1947—2013 гг., $^{\circ}\text{C}$	Тренд за период наблюдений 2008—2017 гг. (2014—2017 гг.), $^{\circ}\text{C}$	Тренд за расчетный период 1947—2013 гг., $^{\circ}\text{C}$
AG19-3	0,1	–0,2	0,4	0,3
VD Willow	(0,3)	0,0	(0,4)	0,2
CALM	–5,2	–6,2	2,2	0,7
ВД-1	(–4,5)	–5,4	(1,1)	0,7
ВД-2	–4,2	–4,8	0,8	0,5
ВД-3	–4,2	–5,6	0,9	1,1

тренда за весь расчетный период 1947—2013 гг. ($0,003—0,020^{\circ}\text{C}/\text{год}$), это обусловлено существенным повышением температуры пород в 2012 и 2016 гг.

Исходя из предположения, что в районе наблюдается температурный градиент в многолетнемерзлых породах около $2,3^{\circ}\text{C}$ на 100 м [14], на глубине формирования повышенного давления в воронке (более 50 м , возможно до 70 м [10]) температура многолетнемерзлых пород составляет от $-3,8^{\circ}\text{C}$ на холодных вершинах до $0,2^{\circ}\text{C}$ на покрытых кустарником склонах. Однако, учитывая, что в районе воронки мощность многолетнемерзлых пород по геофизическим данным сейчас достигает 190 м [12], здесь температурный градиент меньше (от -1°C на глубине 10 м до 0°C на глубине 190 м) и составляет примерно 1°C на 100 м , и тогда температура на глубине 70 м составит $-0,5^{\circ}\text{C}$. Поскольку регрессионный анализ показал, что средняя годовая температура многолетнемерзлых пород на покрытых кустарником участках с 1947 г. повысилась примерно на $0,4^{\circ}\text{C}$ (см. табл. 2), в 1947 г. температура на глубине 70 м была близка к -1°C , что соответствует, по нашим наблюдениям, сохранению ледяных включений в засоленной глине. Повышение температуры многолетнемерзлых пород в глине до значений $-0,5^{\circ}\text{C}$, видимо, и спровоцировало увеличение содержания незамерзшей воды, проницаемости глинистых пород для мигрирующих газов и скопления газа ниже подошвы пластового льда.

4. Выводы

Выявлено, что в исследуемом районе Центрального Ямала с 2012 г. произошло увеличение глубины протаивания в среднем на 20% по сравнению с предыдущим периодом наблюдений (1993—2011 гг.), а особенно значительное увеличение глубины сезонноталого слоя зафиксировано летом чрезвычайно теплого 2016 г. (до 37% относительно предыдущего периода). Связано это с повышением температуры воздуха летом в 2012 и 2016 гг., а также с отмечавшимся в эти же годы самым большим количеством летних осадков за весь период наблюдений.

Установлено, что увеличение глубины протаивания в 2012 и 2013 гг. послужило причиной активизации термоденудации, связанной с достижением сезонным протаиванием кровли пластовых льдов с формированием термоцирков. В 2016 г. рост термоцирков ускорился. Таким образом, повышение сумм положительных температур воздуха оказало влияние на формирование термоцирков через увеличение глубины протаивания.

Отмечено резкое увеличение в 2012 и 2016 гг. средней годовой температуры в сезонноталом слое, а также существенное увеличение температуры пород на глубине 10 м в 2017 г. как результат повышения температуры воздуха в 2016 г. Кроме того, по результатам регрессионного анализа получено, что средняя годовая температура пород с 1947 по 2013 г. повысилась на $0,2—0,3^{\circ}\text{C}$ на участках, покрытых кустарником, и на $1,1^{\circ}\text{C}$ на песчаных слабозадержанных площадках.

Видимо, наличие газовых скоплений в толще многолетнемерзлых пород в связи с повышением с 1947 г. их средней температуры на всех глубинах предопределило высвобождение газа, образовавшегося при разложении газовых гидратов, с образованием воронки газового выброса.

Дальнейшие исследования, включающие анализ влияния температурного поля пород и распространения температурных волн, помогут определить глубину и скорость проникновения тепловых колебаний, наблюдаемых в верхних горизонтах пород. А рассмотрение такого фактора, как толщина снежного покрова и его перераспределение по различным ландшафтам, позволит более детально оценить изменение теплового состояния многолетнемерзлых пород.

Работа выполнена по госзаданию согласно плану НИР Тюменского научного центра Сибирского отделения Российской академии наук на 2018—2020 гг., протокол № 2 от 8.12.2017 г. (Приоритетное направление IX.135. Программа IX.135.2. Проект: IX.135.2.2.), а также в рамках проектов CALM и TSP. Сведения о ВГВ-1 получены при финансовой поддержке РНФ (грант 16-17-10203). Экспедиции в 2014—2018 гг. организованы при поддержке Межрегионального экспедиционного центра “Арктика” и Российского центра освоения Арктики.

Литература

1. **Арефьев С. П., Хомутов А. В., Ермохина К. А., Лейбман М. О.** Дендрохронологическая реконструкция процесса формирования газового бугра на месте Ямальской воронки. — Криосфера Земли, 2017, т. 21, № 5, с. 107—119.
2. **Арз Ф. Э.** Термоабразия морских берегов. — М., Наука, 1980, 159 с.
3. **Воскресенский К. С., Совершаев В. А.** Роль экзогенных процессов в динамике арктических побережий. /В сб.: Динамика арктических побережий России. — М., МГУ, 1998, с. 35—48.
4. **Дворников Ю. А., Хомутов А. В., Мулла-нуров Д. Р., Ермохина К. А.** Моделирование распределения водного эквивалента снежного покрова в тундре с использованием ГИС и данных полевой снегомерной съемки. — Лед и снег, 2015, т. 55, № 2, с. 68—80.
5. **Жигарев Л. А.** Термоденудационные процессы и деформационное поведение протаивающих грунтов. — М., Наука, 1975, 110 с.
6. **Кизяков А. И., Сонюшкин 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. 19, № 2, с. 13—22.
7. **Криосфера** Бованенковского нефтегазозаконденсатного месторождения. /Под ред. Ю. Б. Баду, Н. А. Гафарова, Е. Е. Подборного. — М., ООО “Газпром экспо”, 2013, 424 с.
8. **Лейбман М. О.** Динамика слоя сезонного оттаивания пород и методика измерения его глубины в различных ландшафтах Центрального Ямала. — Криосфера Земли, 2001, т. 5, № 3, с. 17—24.
9. **Лейбман М. О., Кизяков А. И.** Криогенные оползни Ямала и Югорского полуострова. — М., Россельхозакадемия, 2007, 206 с.
10. **Лейбман М. О., Плеханов А. В.** Ямальская воронка газового выброса: результаты предварительного обследования. — Холодок, 2014, т. 2, № 12, с. 9—15.
11. **Мельников Е. С., Васильев А. А., Лейбман М. О., Москаленко Н. Г.** Динамика сезонного слоя в Западной Сибири. — Криосфера Земли, 2005, т. 9, № 2, с. 23—32.
12. **Оленченко В. В., Синицкий А. И., Антонов Е. Ю., Ельцов И. Н., Кушнарченко О. Н., Плотников А. Е., Потапов В. В., Эпов М. И.** Результаты геофизических исследований территории геологического новообразования “Ямальский кратер”. — Криосфера Земли, 2015, т. 19, № 4, с. 94—106.
13. **Стрелецкая И. Д., Лейбман М. О., Кизяков А. И., Облогов Г. Е., Васильев А. А., Хомутов А. В., Дворников Ю. А.** Подземные льды и их роль в формировании воронки газового выброса на полуострове Ямал. — Вестник МГУ, 2017, т. 2, с. 91—99.

14. **Строение и свойства пород криолитозоны южной части Бованенковского газоконденсатного месторождения.** /Под ред. Е. М Чувилина. — М., ГЕОС, 2007, 137 с.
15. **Чувилин Е. М., Якушев В. С., Перлова Е. В., Кондаков В. В.** Газовая компонента толщ мерзлых пород в пределах Бованенковского газоконденсатного месторождения (полуостров Ямал). — Доклады АН, 1999, т. 369, № 4, с. 522—524.
16. **Якушев В. С.** Природный газ и газовые гидраты в криолитозоне. — М., ВНИИГАЗ, 2009, 192 с.
17. **Biskaborn B. K., Lanckman J. P., Lantuit H., et al.** The new database of the Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). — *Earth Syst. Sci. Data.*, 2015, vol. 7, No. 2, pp. 245—259.
18. **Brown J., Hinkel K. M., and Nelson F. E.** The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: Research designs and initial results. — *Polar Geogr.*, 2000, vol. 24, No. 3, pp. 166—258.
19. **Buldovicz S. N., Khilimonyuk V. Z., Bychkov A. Y. et al.** Cryovolcanism on the Earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal Peninsula (Russia). — *Sci. Rep.*, 2018, vol. 8, No. 1, pp. 13534.
20. **Embleton C. and King C. A. M.** Periglacial Geomorphology. — London, 1979, 279 p.
21. <https://ib.komisc.ru/climat/viewdata.php> (дата обращения 5.10.2018).
22. http://rp5.ru/Архив_погоды_в_Матросе (5.10.2018).
23. **Khomutov A., Leibman M., Dvornikov Yu., Gubarkov A., Mullanurov D., and Khairullin R.** Activation of cryogenic earth flows and formation of thermocirques on Central Yamal as a result of climate fluctuations. /In: *Advancing Culture of Living with Landslides.* K. Mikos et al. (eds.) — Ljubljana, Springer, 2017, pp. 209—216.
24. **Leibman M. O., Khomutov A. V., Gubarkov A. A., Mullanurov D. R., and Dvornikov Yu. A.** The research station Vaskiny Dachi, Central Yamal, West Siberia, Russia — A review of 25 years of permafrost studies. — *Fennia*, 2015, vol. 193, No. 1, pp. 3—30.
25. **Leibman M. O., Kizyakov A. I., Plekhanov A. V., and Streletskaya I. D.** New permafrost feature — deep crater in Central Yamal (West Siberia, Russia) as a response to local climate fluctuations. — *Geogr. Environ. Sustain.*, 2014, vol. 7, No. 4, pp. 68—79.
26. **Romanovsky V. E., Drozdov D. S., Oberman N. G., Malkova G. V., Kholodov A. L., Marchenko S. S., Moskalenko N. G., Sergeev D. O., Ukraintseva N. G., Abramov A. A., Gilichinsky D. A., and Vasiliev A. A.** Thermal state of permafrost in Russia. — *Permafr. Periglac. Process.*, 2010, vol. 21, No. 2, pp. 136—155.
27. **Widhalm B., Bartsch A., Leibman M., and Khomutov A.** Active-layer thickness estimation from X-band SAR backscatter intensity. — *Cryosph.*, 2017, vol. 11, No. 1, pp. 483—496.