

УДК 551.345

СТРОЕНИЕ, ГАЗСОДЕРЖАНИЕ И ТЕРМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ МНОГОЛЕТНИХ БУГРОВ ПУЧЕНИЯ (БУЛГУННЯХОВ) В ДОЛИНЕ р. ВАСЬ-ЮГАН (ОКРЕСТНОСТИ г. САЛЕХАРД, ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

© 2022 г. Н.Э. Демидов¹*, А.Ю. Гунар², Е.И. Балихин², В.Е. Гагарин², А.В. Гузева^{1,3},
А.А. Дежникова², В.С. Казанцев⁴, А.В. Кошульников², А.И. Нарижная⁴

¹ Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт»,
г. Санкт-Петербург, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет,
г. Москва, Россия

³ Институт озероведения РАН – Санкт-Петербургский федеральный
исследовательский центр РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, г. Москва, Россия

* e-mail: nikdemidov@mail.ru

Поступила в редакцию 20.06.2022 г.; после доработки 01.08.2022 г.
Принята к публикации 02.08.2022 г.

Аннотация. Изучены два многолетних бугра пучения (булгунняхов) в долине р. Вась-Юган (окрестности г. Салехард, Западная Сибирь). Высота булгунняхов Вась-Юган 1 и Вась-Юган 2 составляет 2 и 4.5 м, а диаметр – 55 и 100 м соответственно. Ядра перекрываются мелким песком и представлены переслаиванием льда и суглинка общей мощностью 5–6 м. Основание ядер заморожено; бугры закончили стадию роста. В процессе роста бугров стадии сегрегационного льдовыделения чередовались с инъекционными. Под воздействием гидроразрыва в сформированный крупнокристаллический лед по трещинам поступала вода с суглинком, формируя вторичные минеральные включения. Малое количество пузырьков в ледяных кернах, результаты лабораторных определений CH_4 в кернах и измерений концентрации газов в устье скважины в процессе бурения говорят о том, что в породах, слагающих булгунняхов, нет повышенных концентраций газов. По результатам наблюдений в оборудованной на одном из бугров термометрической скважине глубина нулевых амплитуд температуры – 5.5 м. Такое небольшое ее значение объясняется наличием торфяного покрова мощностью 0.3 м. Среднегодовая температура на глубине нулевых амплитуд составляет -0.5°C , что близко к температуре начала оттаивания грунтов. Из-за наличия массивных льдонасыщенных ядер изученные булгунняхов при продолжающемся потеплении климата могут подвергнуться деградации по сценарию термокараста, но не представляют опасности с точки зрения выброса газов.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, булгунняхов, пинго, метан в мерзлоте, Западная Сибирь, Салехард.

DOI: <https://doi.org/10.21455/GPB2022.3-4>

Цитирование: Демидов Н.Э., Гунар А.Ю., Балихин Е.И., Гагарин В.Е., Гузева А.В., Дежникова А.А., Казанцев В.С., Кошульников А.В., Нарижная А.И. Строение, газосодержание и термическое состояние многолетних бугров пучения (булгунняхов) в долине р. Вась-Юган (окрестности г. Салехард, Западная Сибирь) // Геофизические процессы и биосфера. 2022. Т. 21, № 3. С. 27–38. <https://doi.org/10.21455/GPB2022.3-4>

ВВЕДЕНИЕ

Феномен многолетних бугров пучения, формирующихся при промерзании подошвенных таликов и известных в отечественной литературе под термином «булгунняхов» (в англоязычной – «пинго»), на севере Западной Сибири изучен значительно меньше по сравнению с другими районами Арктики (Шпицберген, Гренландия, Канада, Аляска). Со времен первого обзора, касающегося распространения и возможных механизмов образования булгунняхов на севере Западной Сибири, сделанного В.И. Андреевым в 1936 г. [Андреев,

1936], эти формы рельефа не привлекали значительного внимания исследователей. В качестве примеров немногих работ по булгунняхам данного района необходимо привести статьи [Васильчук, Буданцева, 2010; Чижова, Васильчук, 2018], посвященные изучению времени формирования и изотопного состава многолетнего бугра пучения Песцовое на Тазовском полуострове, а также работу [Богоявленский и др., 2019], авторами которой на п-ове Ямал выделено 7185 многолетних бугров пучения.

Внимание к ямальским булгунняхам значительно возросло после высказанного предположения [Сизов,

2015; *Buldovicz et al.*, 2018] о связи кратеров газового выброса со взрывами булгунняхов. Актуальность изучения булгунняхов обусловлена и тем, что в условиях потепления климата наличие массивного ледяного ядра делает их одними из наиболее подверженных быстрой деградации мерзлотными формами рельефа. В последние годы было также сделано предположение, что многолетние бугры пучения могут служить каналом для существенного в масштабе земных биогеохимических циклов попадания метана и углекислого газа из недр в атмосферу [*Hodson et al.*, 2019].

Очевидно, что решение обозначенных вопросов, связанных с булгунняхами, должно опираться, в том числе, на данные их сквозного бурения, которые до сих пор весьма ограничены. Данная работа ставит своей целью восполнение этого пробела на примере результатов исследования булгунняхов в долине р. Вась-Юган в окрестностях г. Салехард. В наши задачи входило изучение их внутреннего строения, газосодержания и термического состояния. В качестве объектов были выбраны два относительно небольших бугра пучения, находящихся рядом с термокарстовыми озерами. Ранее было показано, что такие бугры могут взрываться с образованием воронок [*Сизов*, 2015].

ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследованные булгунняхи располагаются в 5.5 км к северо-востоку от г. Салехард на отметках около 85 м над ур. моря в нижнем течении р. Обь в долине ее небольшого правого притока р. Вась-Юган. Терраса р. Обь, на которой находятся бугры, покрыта кустарничково-мохово-лишайниковым редколесьем. Бугры и гряды многолетнего пучения высотой до 5 м распространены в окрестностях двух термокарстовых озер (длина озер – около 100 и 300 м, глубины – до 2 м). Для анализа тенденций изменения климата в районе исследований был построен график хода среднегодовой температуры воздуха и среднегодовой суммы осадков в

г. Салехард с 1883 по 2021 г. (рис. 1) по данным открытого архива метеоданных [*Будыгина*, 2008]. Как видно, на протяжении последних 140 лет наблюдается рост температуры воздуха и количества осадков. В настоящее время среднегодовая температура составляет около -4.3°C , а годовая сумма осадков – около 500 мм, тогда как в начале метеонаблюдений эти величины составляли -8.2°C и 180 мм соответственно. За период с 1990 по 2021 г. величина линейного тренда составила $+0.06^{\circ}\text{C}/\text{год}$, по осадкам – $+2.08\text{ мм}/\text{год}$.

Геологический разрез района исследований представлен мезозойскими отложениями, перекрытыми сверху пачкой неоген-четвертичных песчано-глинистых отложений мощностью около 150 м [*Грязнов*, 2014]. Поверхность площади пучения сложена озерно-аллювиальными отложениями третьей надпойменной террасы р. Обь, датированными верхним звеном неоплейстоцена. С точки зрения мерзлотных условий, район относится к зоне сплошного развития многолетней мерзлоты с редкими островами талых пород [Геокриологическая..., 1997; *Грязнов*, 2014]. Мощность мерзлых пород в районе работ значительно варьирует, изменяясь от 20 до 100 м. Среднегодовая температура мерзлых пород на территории колеблется в пределах от -3 до 0°C [*Грязнов*, 2014].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения булгунняхов нами использовались следующая аппаратура и методики.

Бурение осуществлялось малогабаритной установкой УКБ-12/25 (Россия) «всухую» и сопровождалось фотодокументацией кернов, отбором мерзлых образцов, отбором проб для дегазации метана методом «head space», описанием литологических особенностей и криотекстур. Образцы с массивной криогенной текстурой отбирались точечным способом, пробы из грунтов со слоистой и сетчатой (неполносетчатой) криогенной текстурой – методом бороздки. Влажность грунтов

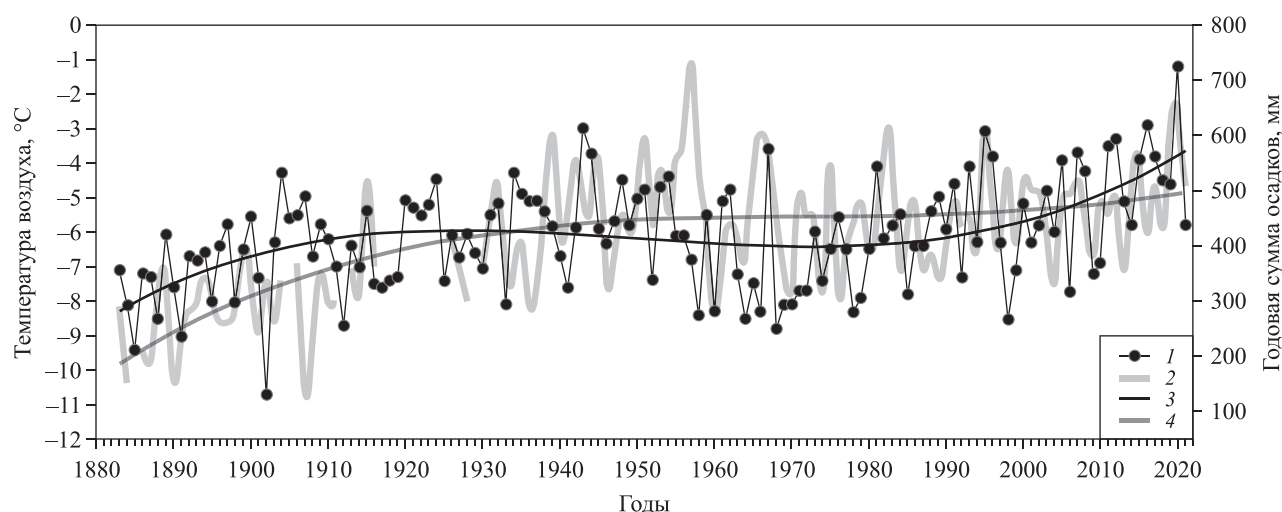


Рис. 1. Ход среднегодовой температуры воздуха (1) и годовой суммы осадков (2) в г. Салехард с 1883 по 2021 г. 3, 4 – полиномиальные тренды 3-й степени для температуры и осадков соответственно

определялась методом высушивания до постоянной массы (ГОСТ 5180-2015). Также выполнялось определение влажности грунта между ледяными включениями. Концентрация углеводородов, SO_2 и H_2S в устье скважин отслеживалась в процессе бурения проточным газоанализатором ГАНК-4РБ (Россия). Внутри прибора для измерения концентраций углеводородов установлен фотоионизационный датчик, для сероводорода и диоксида серы используются электрохимические датчики. Анализ концентраций метана в газовых пробах из мерзлых кернов проводился в трехкратной повторности на газовом хроматографе Кристалл-5000.2 (Россия) с пламенно-ионизационным детектором.

Петрографические исследования льда проводилось по методикам П.А. Шумского [1955] и включали в себя макро- и микроскопическое текстурное и структурное описание. Подготавливались и изучались в поляризованном свете шлифы льда, ориентированные в двух направлениях – перпендикулярно и параллельно стволу скважины. Проводилось описание размера, формы и пространственного взаимоотношения кристаллов льда в породе. Изучались формы, размеры и характер

пространственного распределения воздушных включений и примесей.

Цифровая модель рельефа (ЦМР) бугров построена фотограмметрическим способом по результатам аэрофотосъемки с помощью квадрокоптера DJI Mini (Китай). Координатная привязка снимков проводилась с помощью встроенного в квадрокоптер GPS-приемника. Снимки выполнялись с минимальным перекрытием в 60 %, после чего весь отснятый материал загружался в специализированное программное обеспечение для построения ортофотоплана и цифровой модели рельефа местности (Agisoft Photoscan, Россия).

Для измерений температуры в скважинах использовались термокосы ООО «МГУ-Геофизика» (Россия). Электроразведочные работы методом зондирования становлением поля в ближней зоне (ЗСБ) осуществлялись аппаратным комплексом Цикл-7 (Россия). В качестве источника и приемника электромагнитного поля применялись квадратные петли: сторона генераторной петли составляла 25 м, приемной – 23 м. Обработка полученных данных ЗСБ проводилась в программе ZondTem1D (Россия).



Рис. 2. Вид булгунняхов Вась-Юган 1 (а) и Вась-Юган 2 (б) на местности. Аэрофотосъемка с квадрокоптера

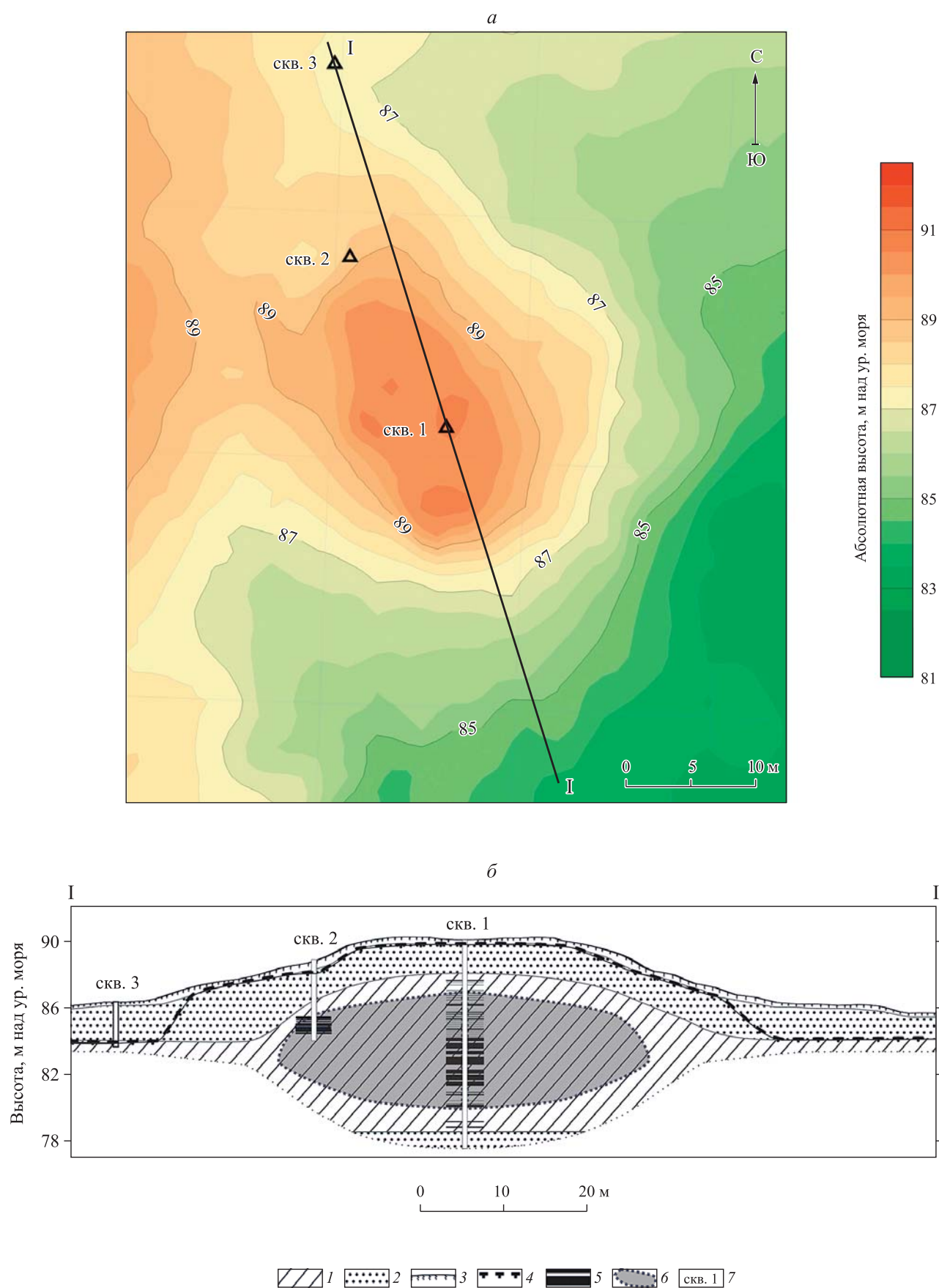


Рис. 3. Булгуннях Вась-Юган 1. Карта высот (*a*) и геологический разрез (*б*)

б. 1 – суглинок пылеватый; 2 – песок мелкий; 3 – торф; 4 – верхняя граница многолетнемерзлых пород; 5 – линзы и прослои льда; 6 – ледогрунтовое ядро; 7 – скважина и ее номер

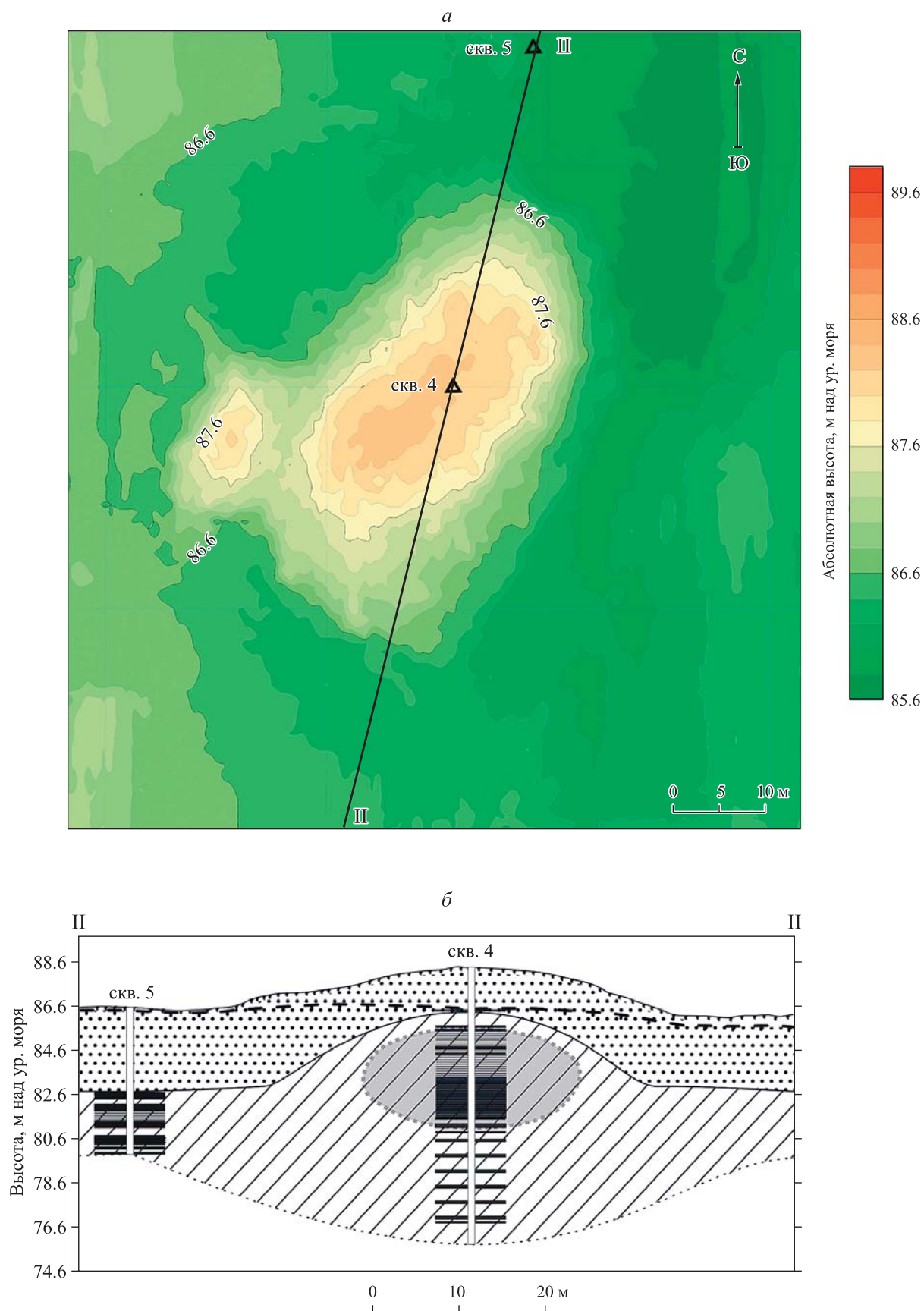


Рис. 4. Булгуннях Вась-Юган 2. Карта высот (*a*), геологический разрез (*б*) и результаты определения содержания метана по профилю (*в*)

1–7 – см. на рис. 3

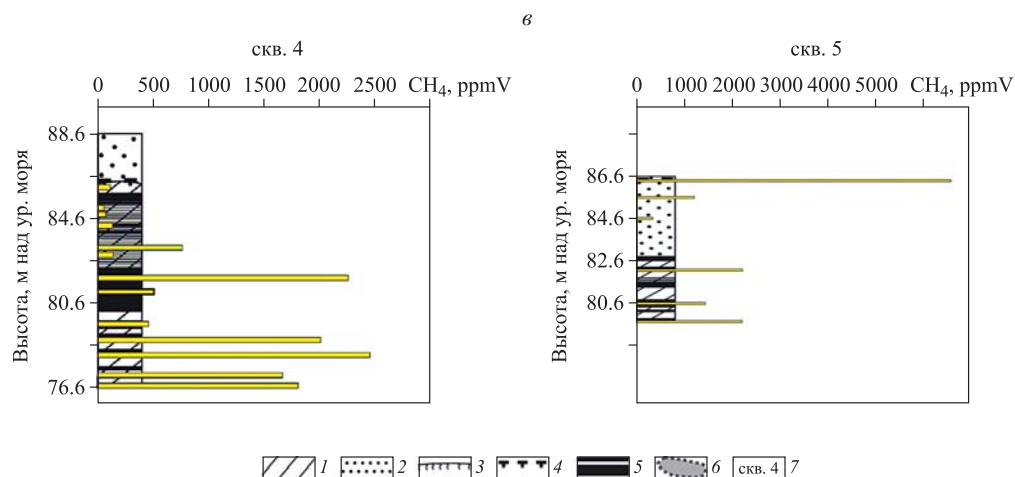


Рис. 4 (окончание)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам обработки ЦМР определены следующие морфометрические характеристики булгунняхов. Булгуннях Вась-Юган 1 имеет округлую в плане форму диаметром 100 м, его высота – 4.5 м (рис. 2, а, рис. 3). Булгуннях Вась-Юган 2 в плане имеет ярко выраженную овальную форму, протяженность длинной оси – 55 м (рис. 2, б, рис. 4). Высота бугра составляет 2 м. К основному бугру с востока примыкает бугор диаметром около 10 м. На последнем была обнаружена буровая ложка советского времени и обсадная труба, наклоненная в сторону озера под углом 45°.

По результатам бурения булгунняхи Вась-Юган 1 и Вась-Юган 2 характеризуются схожим криолитолическим строением. В скважинах, пробуренных в центре бугров, в верхней части выделяется слой торфа мощностью 0.3 м. Под торфом был вскрыт слой мелкого

оторфованного песка с включениями щебня: в момент бурения, в сентябре, – талый до глубины 0.5 м, а ниже – мерзлый с массивной криогенной текстурой. На глубинах 4–10 м в булгуннях Вась-Юган 1 и глубинах 3–8 м в булгуннях Вась-Юган 2 было вскрыто льдистое ядро, состоящее из чередующихся слоев пылеватого суглинка, ледогрунта и линз чистого льда, мощностью до 0.5 м (рис. 5). Под льдистыми суглинками в бугре Вась-Юган 1 были вскрыты мерзлые пылеватые пески с субгоризонтальной слоистостью и массивной криотекстурой; в бугре Вась-Юган 2 ядро подстилалось слабольдистыми пылеватыми суглинками.

По данным петрографического анализа линзы льда в булгуннях представлены в основной своей массе чистым прозрачным льдом (рис. 6, а, б). Текстура льда – стекловатая, структура – аллотриоморфно-зернистая, встречаются отдельные изометричные зерна. Размеры



Рис. 5. Характерный керн из ядра булгунняха Вась-Юган 2 – переслаивание мерзлого суглинка, ледогрунта и льда (скв. 4, глубина – 7.4–7.75 м)

кристаллов льда могут достигать 3–5 см. В отдельных местах лед разбит трещинами разнообразной ориентировки, к которым приурочены газовые и грунтовые включения, а также мелкозернистый ледяной матрикс (рис. 6, в, г). Газовых включений крайне мало, представлены они отдельными пузырьками сферической формы размером до 0.5 мм, а в отдельных случаях – до 5 мм. Грунтовые включения состоят из пылеватого суглинка.

Оценка мощности многолетнемерзлых пород на участке исследований выполнялась по результатам электроразведки методом ЗСБ. В результате обработки измеренных кривых ЗСБ было получено распределение удельного электрического сопротивления до глубины около 75 м по профилю через булгуннях Вась-Юган 1 (рис. 7).

Согласно результатам годового цикла температурных наблюдений, в центральной скважине глубиной 12.5 м

в булгуннях Вась-Юган 1 (рис. 8) глубина нулевых годовых амплитуд составляет всего 5.5 м. Среднегодовая температура на глубине нулевых годовых амплитуд равна -0.5°C . Влажность песчаных грунтов находится в диапазоне 21–32 %, влажность суглинка между ледяными включениями – 28–36 %, влажность льдистой части разреза – от 57 до 650 %.

Результаты определения концентраций метана в кернах показаны на рис. 4, в. Среднее содержание метана по скв. 4, пробуренной на вершине булгуннях составляет 1232 ppmV, а в скв. 5, пробуренной вне бугра, – 2327 ppmV. Наблюдения за концентрацией газов в устье скважины в процессе бурения показали лишь незначительное по сравнению с атмосферным фоном превышение по углеводородам – на 10 ppm, что можно связать с высвобождением метана из мерзлоты при бурении. Концентрации SO_2 и H_2S находились в пределах атмосферного фона.

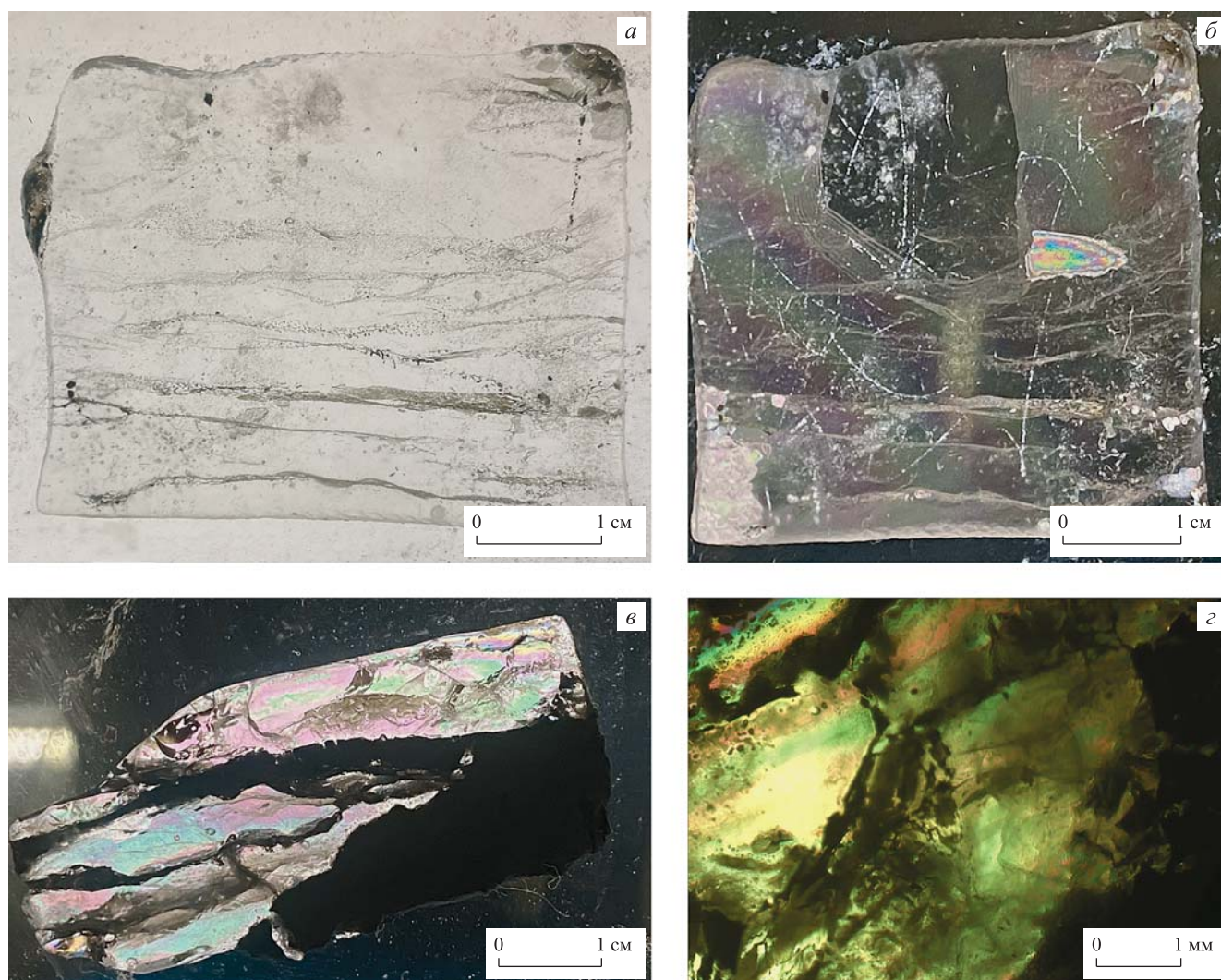


Рис. 6. Характерные примеры шлифов сегрегационного и инъекционного льда в срезах, параллельных стволу скважины из ядра булгуннях Вась-Юган 2

а, б – шлифы сегрегационного льда в проходящем (а) и поляризационном (б) свете; в, г – шлифы инъекционного льда в поляризационном (в) и проходящем (г) свете

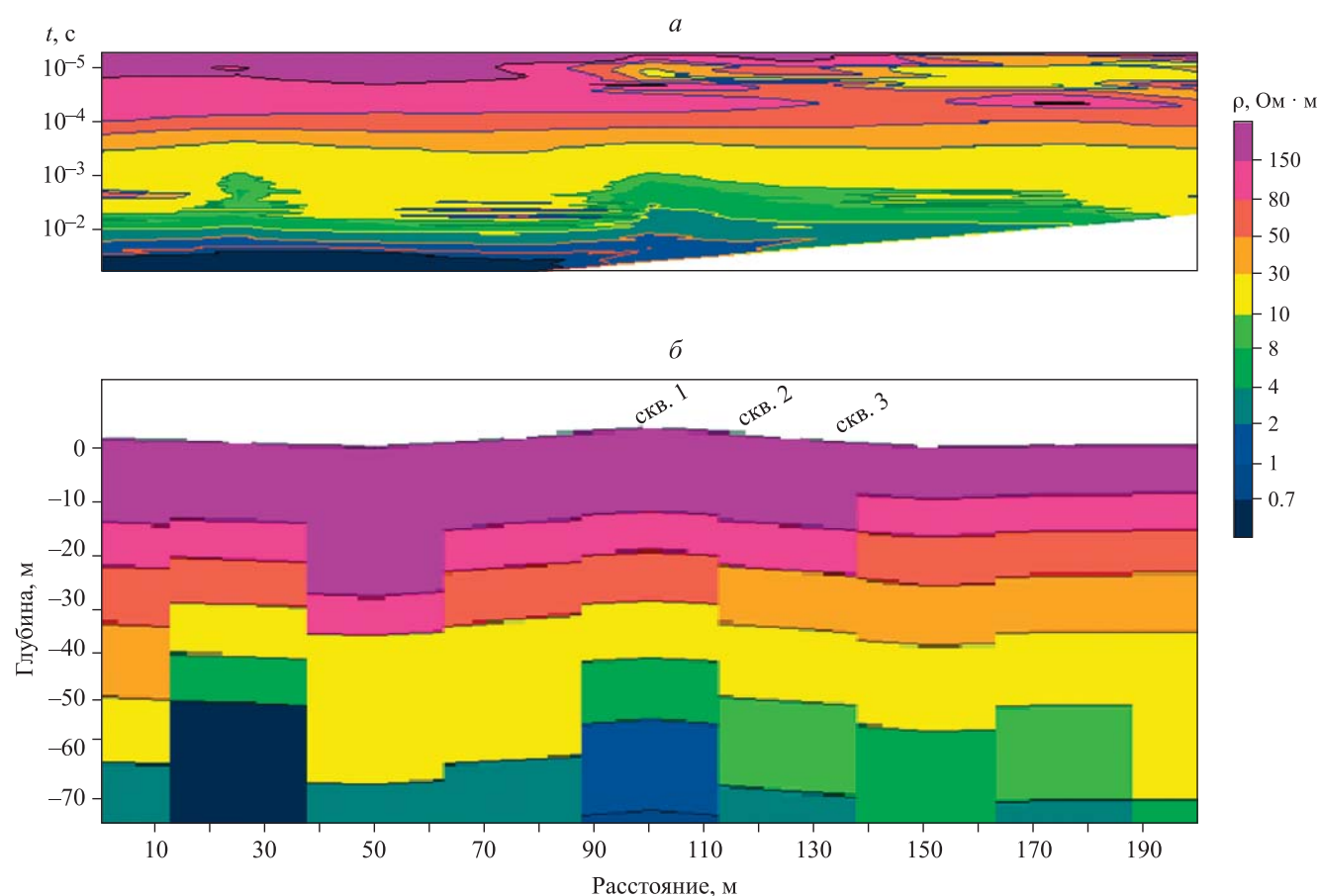


Рис. 7. Результаты электроразведочных работ методом зондирования становления поля в ближней зоне булгуннях Вась-Юган 1

а – разрез кажущихся сопротивлений (полевые данные); *б* – геоэлектрический разрез (результат численного моделирования)

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Выявленная по результатам работ картина сложения ядер бугров пучения суглинистыми отложениями с большим содержанием льда в виде прожилок, прослоев и линз отмечалась ранее в Западной Сибири [Тыртиков, 1966], в частности на правом берегу р. Надым [Андреев, 1960] и на Восточном Саяне [Алексеев и др., 2017]. Возможность сложения ядер многолетних бугров пучения как сплошными ледяными линзами, так и более или менее мощными пластами льда, чередующимися с мерзлыми породами, отмечалась ранее в работе П.А. Шумского [1955]. Различие в строении бугров с ядрами из сплошного льда или из льдистых мерзлых пород, по мнению П.А. Шумского, связано с соотношением между скоростью внедрения воды и скоростью промерзания.

«Если успевает замерзнуть только часть поступающей воды, то под замерзающим слоем постоянно находится водяная линза, в результате замерзания которой образуется чистый лед. Если же соотношение скоростей указанных процессов меняется во времени, то после замерзания водяной линзы следует промерзание водоносной породы в основании, за ним очередное внедрение воды и т.д., в результате чего возникает чередование

инъекционных ледяных шпиров с льдистыми породами» [Шумский, 1955. С. 236].

Выявленное по результатам петрографического анализа наличие как чистого льда, так и льда, разбитого трещинами с газовыми и грунтовыми включениями, вероятно, свидетельствует о том, что в процессе роста бугра стадии сегрегационного льдовыделения чередовались с инъекционными. Можно предположить следующую последовательность процессов, которые объясняют обнаруженные структурные особенности. На первой стадии формирования бугра пучения, вероятнее всего за счет сегрегационного механизма, происходило формирование крупных кристаллов льда. Возникшее за счет промерзания гидростатическое давление могло приводить к гидроразрыву и образованию под слоем льда водяной линзы. Ее промерзание в условиях замкнутого пространства вызывало увеличение давления и образование трещин в ранее сформировавшемся слое льда. Вода с минеральными и газовыми примесями проникала по трещинам и, замерзая, формировала выявленные вторичные структуры. К аналогичному выводу о чередовании стадий сегрегационного и инъекционного льдовыделения пришли авторы изучения бугров пучения на Восточном Саяне [Алексеев и др., 2017]. Ядра этих бугров, как и в случае вась-юганских,

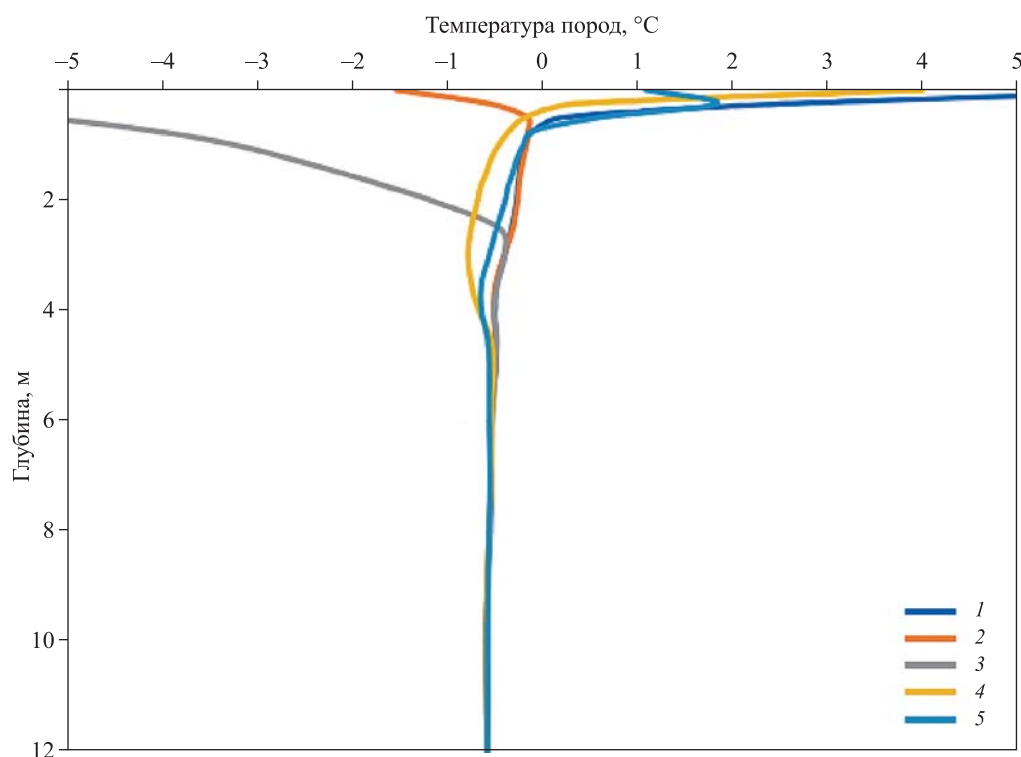


Рис. 8. Результаты годового цикла термометрических наблюдений в скв. 1 (вершина булгуннях Вась-Юган 1)

1–5 – даты наблюдений: 1 – 01.09.2022 г.; 2 – 01.12.2020 г.; 3 – 01.03.2021 г.; 4 – 01.06.2021 г.; 5 – 01.09.2021 г.

представлены переслаиванием суглинков и линз льда. Важным отличием саянских бугров от вась-юганских является присутствие во льду первых значительного количества газовых включений.

По результатам исследований методом ЗСБ с учетом данных бурения можно утверждать, что верхняя часть разреза мощностью 25–35 м с удельным электрическим сопротивлением более 50 Ом·м является мерзлой. Мерзлыми оказались и подошвы ледяных ядер обоих бугров. Это означает, что стадия роста бугров закончилась. Залегающие ниже 25–35 м слои, обладающие удельным электрическим сопротивлением в единицы и первые десятки Ом·м, вероятно, находятся в талом состоянии.

Что касается времени и скорости формирования бугров, то их пока определить не удалось. Можно предположить, что наклонная обсадная труба, обнаруженная на бугре Вась-Юган 2, имела изначально вертикальное положение и была загнута вследствие формирования бугра пучения. В этом случае возраст бугра должен находиться в диапазоне 30–80 лет. Если принять, что рост бугров был равномерным во времени, то для формирования бугров высотой 2–4,5 скорость роста должна составлять 2,5–15 см/год.

Измерения температуры в скважине показали, что состояние грунтов близко к температуре начала оттаивания. При этом незначительная глубина нулевых годовых амплитуд объясняется наличием теплоизоляционной крышки торфа. С учетом высокой льдистости разреза и близкой к 0 °C среднегодовой

температуры грунтов данные бугры могут деградировать по сценарию термокарста как в случае продолжения потепления климата, так и в случае нарушения растительного и торфяного покровов пожарами и пастбой оленей. Последнее приводит к обнажению на поверхность торфа с низким альбедо, что может вызвать необратимое растепление бугров.

Результаты определения концентраций метана в кернах показали, что породы, слагающие булгуннях, содержат меньше метана, чем породы на его периферии. Кроме того, полученные значения содержания метана не выходят за пределы фоновых концентраций, определенных ранее для мерзлых отложений на п-ове Ямал [Стрелецкая и др., 2018]. Малое содержание газов подтверждается кристаллографическими анализами ледяных включений, которые выявили крайне низкое содержание пузырьков с газом.

Отсутствие повышенных концентраций газов в булгуннях можно объяснить следующим образом. Если формирование бугров происходило в замкнутой системе над несквозным таликом, то либо талик изначально не был насыщен газами, либо создавались условия для миграции газов сквозь мерзлотную покрывку. Если же бугры сформировались над сквозным таликом, то газ мог быть отжат вниз в подмерзлотные водоносные горизонты. В любом случае факт отсутствия повышенного газосодержания в булгуннях Вась-Юган 1 и Вась-Юган 2 говорит о том, что не все бугры пучения представляют опасность в качестве источников газового выброса.

ВЫВОДЫ

В результате изучения внутреннего строения, газосодержания и термического состояния двух бугров многолетнего пучения в долине р. Вась-Юган (окрестности г. Салехард, Западная Сибирь) установлено следующее.

1. Высота булгунняхов – 2 и 4.5 м при поперечнике 55 и 100 м соответственно. Ядра представлены переслаиванием льда и суглинка общей мощностью 5–6 м. Результаты бурения и электромагнитных зондирований свидетельствуют о том, что основание ядер проморожено и бугры закончили стадию роста.

2. Результаты петрографического анализа свидетельствуют, что в процессе роста булгунняхов стадии сегрегационного льдовыделения чередовались с инъекционными. Крупные кристаллы льда размером до 5 см разбиты сетью трещин гидроразрыва, сформировавшего вторичные включения мелкокристаллического льда и глинистого материала.

3. Малое количество пузырьков в ледяных ядрах, результаты наблюдения за эманацией газов при бурении и лабораторные определения CH_4 в ядрах говорят о том, что в слагающих булгунняхи породах нет повышенного газосодержания и они не представляют опасности в плане образования воронок газового взрыва.

4. По результатам наблюдений в оборудованной на одном из булгунняхов термометрической скважине, среднегодовая температура на глубине нулевых амплитуд составила -0.5°C . Из-за наличия льдонасыщенного ядра изученные булгунняхи могут подвергнуться деградации по сценарию термокарста под воздействием потепления климата или в результате нарушения растительного и торфяного покрова.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-45-890012) и финансовой поддержке со стороны Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Светлаков А.А., Козырева Е.А., Васильчук Ю.К. Литология и строение бугров пучения в долине р. Сенца (Окинское плоскогорье, Восточные Саяны) // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 136–149.
<https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.2.23037>
- Андреев В.И. Гидролаколиты (булгунняхи) в западно-сибирских тундрах // Изв. Гос. геогр. о-ва. 1936. Т. 68, № 2. С. 186–210.
- Андреев Ю.Ф. О связи линейно-грядового рельефа с тектоническими структурами на севере Западной Сибири (в области развития многолетней мерзлоты) // Геология и геохимия. 1960. Вып. 3 (IX). С. 76–94.
- Богоявленский В.И., Сизов О.С., Богоявленский И.В., Никонов Р.А., Каргина Т.Н. Дегазация Земли в Арктике: Комплексные исследования распространения бугров

пучения и термокарстовых озер с кратерами выбросов газа на полуострове Ямал // Арктика: Экология и экономика. 2019. № 4 (36). С. 52–68.

<https://doi.org/10.25283/2223-4594-2019-4-52-68>

Булдыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (ТТТТ). 2008. (Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942). <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>

Васильчук Ю.К., Буданцева Н.А. Радиоуглеродное определение возраста булгунняха на месторождении Песцовое в северной части Западной Сибири // Инж. геология. 2010. № 2. С. 16–23.

Геокриологическая карта СССР масштаба 1 : 2 500 000 / Под. ред. Э.Д. Ершова. Винница: Картопредприятие, 1997. 16 л.

Грязнов О.Н. Инженерно-геологические условия долинных областей криолитозоны Ямало-Ненецкого автономного округа и их трансформация под воздействием техногенеза. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2014. 198 с.

Сизов О.В. Дистанционный анализ последствий поверхностных газопроявлений на севере Западной Сибири // Геоматика. 2015. Вып. 1. С. 53–68.

Стрелецкая И.Д., Васильев А.А., Облогов Г.Е., Семенов П.Б., Ваништейн Б.Г., Ривкина Е.М. Метан в подземных льдах и мерзлых отложениях на побережье и шельфе Карского моря // Лёд и Снег. 2018. Т. 58, № 1. С. 65–77.

<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-1-65-77>

Тыртиков А.П. Формирование и развитие крупнобугристых торфяников в северной тайге Западной Сибири // Мерзлотные исследования. М.: Изд-во МГУ, 1966. Вып. VI. С. 141–154.

Чиждова Ю.Н., Васильчук Ю.К. Изотопная индикация условий образования ледяного ядра булгунняхов (пинго) // Лёд и Снег. 2018. Т. 58, № 4. С. 507–523.

<https://doi.org/10.15356/2076-6734-2018-4-507-523>

Шумский П.А. Основы структурного ледоведения. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 492 с.

Buldovicz S.N., Khilimonyuk V.Z., Bychkov A.Y., Ospennikov E.N., Vorobyev S.A., Gunar A.Y., Gorshkov E.I., Chuvilin E.M., Cherbunina M.Y., Kotov P.I., Lubnina N.V., Motenko R.G., Amanzhurov R.M. Cryovolcanism on the Earth: Origin of a spectacular crater in the Yamal Peninsula (Russia) // Sci. Rep. 2018. N 8 (1). P. 13534.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-31858-9>

Hodson A., Nowak A., Redeker K., Holmlund E., Christiansen H., Turchyn A. Seasonal dynamics of methane and carbon dioxide evasion from an open system pingo: Lagoon pingo, Svalbard // Frontiers in Earth Science. 2019. N 7 (30). <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00030>

Сведения об авторах

ДЕМИДОВ Никита Эдуардович – Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт». Россия, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38. E-mail: nikdemidov@mail.ru

ГУНАР Алексей Юрьевич – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: gunar_91@mail.ru

БАЛИХИН Ермолай Игоревич – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: ermolaybalihin@mail.ru

ГАГАРИН Владимир Евгеньевич – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: gagar88@yandex.ru

ГУЗЕВА Алина Валерьевна – Государственный научный центр «Арктический и антарктический научно-исследовательский институт». Россия, 199397, г. Санкт-Петербург, ул. Беринга, д. 38; Институт озерадения РАН – Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН. Россия, 195105, г. Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9. E-mail: olina2108@mail.ru

ДЕЖНИКОВА Алена Андреевна – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: alena.dezhnikova@mail.ru

КАЗАНЦЕВ Владимир Сергеевич – Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Россия, 119017, г. Москва, Пыжёвский пер., 3. E-mail: kazantsev@ifaran.ru

КОШУРНИКОВ Андрей Викторович – Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, геологический факультет. Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1. E-mail: koshurnikov@msu-geophysics.ru

НАРИЖНАЯ Александра Игоревна – Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН. Россия, 119017, г. Москва, Пыжёвский пер., 3. E-mail: augustea@mail.ru

STRUCTURE, GAS CONTENT AND THERMAL STATE OF PERENNIAL FROST MOUNDS (PINGOS) IN THE VAS-YUGAN RIVER VALLEY (VICINITY OF SALEKHARD CITY, WESTERN SIBERIA)

© 2022 N.E. Demidov¹*, A.Yu. Gunar², E.I. Balihin², V.E. Gagarin², A.V. Guzeva^{1,3}, A.A. Dezhnikova², V.S. Kazantsev⁴, A.V. Koshurnikov², A.I. Narizhnaya⁴

¹ Federal Scientific Center «Arctic and Antarctic Research Institute», St. Petersburg, Russia

² Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty, Moscow, Russia

³ Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences – St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia

⁴ Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

* e-mail: nikdemidov@mail.ru

Abstract. Structure, gas content and thermal state of two perennial frost mounds or pingos (bulgunnyakhs in Russian) were studied in the Vasya-Yugan river valley near Salekhard, Western Siberia. Pingos are 2 and 4.5 m high with a diameter 55 and 100 m. Cores are represented by the interbedding of ice and loam with a total thickness of 5–6 m, being overlaid by fine sands. The bases of the ice cores are frozen, and pingos have completed their growth stage. During the growth of the pingos, segregated and intrusive ice formation stages alternated. Due to the influence of hydraulic fracturing, loam-enriched water penetrated into coarse-crystalline ice through cracks, forming secondary mineral inclusions. Low quantity of bubbles in the ice cores, laboratory tests of CH₄ concentration in the cores and control of gas emission from borehole during drilling demonstrate no evident increase in gas concentrations in the pingo-forming rocks. Thermometric borehole, placed on one of the pingos, showed that the depth of zero temperature amplitude is 5.5 m. Shallow position of zero amplitude depth is explained by presence of a peat layer with thickness 0.3 m on the pingo surface. Temperature at the depth of zero amplitude is –0.5 °C, which is close to the temperature at which soil begins to thaw. Taking into account the presence of massive ice, pingos may undergo degradation according to the thermokarst scenario under conditions of warming climate, but do not pose danger of gas explosion.

Keywords: permafrost, bulgunnyakh, pingo, methane in permafrost, Western Siberia, Salekhard.

About the authors

DEMIDOV Nikita Eduardovich – Federal Scientific Center «Arctic and Antarctic Research Institute». Russia, 199397, St. Petersburg, Bering st., 38. E-mail: nikdemidov@mail.ru

GUNAR Alexey Yurievich – Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty. Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1. E-mail: gunar_91@mail.ru

BALIHYN Ermolay Igorevich – Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty. Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1. E-mail: ermolaybalihin@mail.ru

GAGARIN Vladimir Evgenevich – Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty. Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1. E-mail: gagar88@yandex.ru

GUZEVA Alina Valer'evna – Federal Scientific Center «Arctic and Antarctic Research Institute». Russia, 199397, St. Petersburg, Bering st., 38; Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences – St. Petersburg Federal Research Centre of the Russian Academy of Sciences. Russia, 195105, St. Petersburg, Sevastianova st., 9. E-mail: olina2108@mail.ru

DEZHNIKOVA Alyona Andreevna – Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty. Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1. E-mail: alena.dezhnikova@mail.ru

KAZANTSEV Vladimir Sergeevich – Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences. Russia, 119017, Moscow, Pyzhovskiy pereulok, 3. E-mail: kazantsev@ifaran.ru

KOSHURNIKOV Andrey Viktorovich – Lomonosov Moscow State University, Geological Faculty. Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1. E-mail: koshurnikov@msu-geophysics.ru

NARIZHNAYA Alexandra Igorevna – Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences. Russia, 119017, Moscow, Pyzhovskiy pereulok, 3. E-mail: augustea@mail.ru

Cite this article as: Demidov N.E., Gunar A.Yu., Balihin E.I., Gagarin V.E., Guzeva A.V., Dezhnikova A.A., Kazantsev V.S., Koshurnikov A.V., Narizhnaya A.I. Structure, gas content and thermal state of perennial frost mounds (pingos) in the Vas-Yugan river valley (vicinity of Salekhard city, Western Siberia), *Geofizicheskie Protsessy i Biosfera* (Geophysical Processes and Biosphere), 2022, vol. 21, no. 3, pp. 27–38 (in Russian). <https://doi.org/10.21455/gpb2022.3-4>

English version: *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, vol. 58. ISSN: 0001-4338 (Print), 1555-628X (Online). <https://link.springer.com/journal/volumesAndIssues/11485>