ISSN 1993-5056 (Print) ISSN 2587-8247 (Online) **VOL. XVI & TOM XVI & 3/2021 ENGINEERING GEOLOGY WORLD**

При поддержке:







ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Международный научный журнал

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Излается с мая 2006 г Выходит 4 раза в год.

ISSN: 1993-5056 (Print), ISSN: 2587-8247 (Online) Префикс DOI: 10.25296

В журнале публикуются статьи ведущих специалистов в различных отраслях инженерной и экологической геологии. Основные темы история. теория и методология инженерной и экологической геологии. грунтоведение, инженерная геодинамика, региональная инженерная геология, механика грунтов, техническая мелиорация грунтов, инженерная геология криолитозоны, гидрогеологические исследования, инженерная геофизика, сохранение памятников культуры и многие другие вопросы.

УЧРЕДИТЕЛЬ

000 «Геомаркетинг», 115088, РФ, Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

ИЗДАТЕЛЬСТВО

000 «Геомаркетинг», 115088, РФ. Москва, ул. Машиностроения 1-ая, д. 5

РЕДАКЦИЯ

Кондратьева Екатерина Андреевна Генеральный директор

Звонарева Наталия Викторовна Заместитель генерального директора

Аверкина Татьяна Ивановна Литературный редактор

Кашкина Марина Сергеевна Отдел рекламы и отдел подписки

АДРЕС РЕДАКЦИИ

000 «Геомаркетинг» 107076, РФ, Москва, ул. Электрозаводская, д. 60 Тел. +7 495 210-63-90. +7 495 210-63-06 E-mail: info@geomark.ru http://geomark.ru

ИП Гилманов М.А. Допечатная подготовка, дизайн и верстка

ТИПОГРАФИЯ

000 «Медиаколор», 127273, РФ, Москва, Сигнальный проезд, д. 19, стр. 1

Свидетельство о регистрации средства массовой информации: ПИ № ФС77-48918 от 12 марта 2012 г.

Подписка может быть оформлена в редакции, через Агентство «Роспечать», ГК «Урал-Пресс», ООО «Информнаука» (подписной индекс 36611).

Электронная версия: www.geomark.ru/our_journal/inzhenernaya-geologiya/

https://elibrary.ru/title_about.asp?id=28249

Подписано в печать 30.09.2021.

Формат издания 50х70/8. Бумага матовая. Печать офсетная.

Тираж 1 500 экз.

В статьях представлена точка зрения авторов, которая может не совпадать с мнением редакции журнала.

За содержание рекламных материалов редакция ответственности не несет

© 000 «Геомаркетинг», 2021

Фото на обложке: https://www.uecrus.com/upload/iblock/c5a/1-1.jpg

ИСТОРИЯ, ТЕОРИЯ И МЕТОДОЛОГИЯ

Королев В.А. История использования и изучения глин, глинистых грунтов и минералов Калинин Э.В. Из истории исследования напряженнодеформированного состояния массивов горных пород методами математического моделирования ГРУНТОВЕДЕНИЕ Большаков И.Е.

Изменение состава и свойств вулканогенных пород на Верхнем термальном поле вулкана Бурлящий (Большой Семячик, п-ов Камчатка)

40

6

26

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОДИНАМИКА

Кропоткин М.П., Орлова Н.А. Схематизация оползневого участка «Воробьевы горы» в г. Москве с учетом положения кровли келловейских и каменноугольных отложений

52

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ КРИОЛИТОЗОНЫ

Петров Б.В., Стрелецкая И.Д., Рогов В.В., Курбатов А.С.

Динамика температурного режима многолетнемерзлых пород Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения

66

Перечень научных специальностей с указанием соответствующих им отраслей науки, которым соответствует основное содержание рецензируемого научного издания:

05.23.19 – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства (технические науки); 05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки) 25.00.03 - Геотектоника и геодинамика (геологоминералогические науки); 25.00.07 – Гидрогеология (геологоминералогические науки): 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (географические науки); 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геологоминералогические науки); 25.00.08 – Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (технические науки):

25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (геолого-минералогические науки); 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (физикоматематические науки); 25.00.10 – Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых (технические науки): 25.00.20 – Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика (технические науки): 25.00.31 – Гляциология и криология Земли (географические науки): 25.00.36 - Геоэкология (по отраслям) (геологоминералогические науки); 25.00.36 – Геоэкология (по отраслям) (технические науки).

HISTORY, THEORY AND METHODOLOGY

Korolev V.A.

The history of the use and study of clays, clay soils and minerals

Kalinin E.V.

The history of the stress-strain state of rock mass investigation experience by methods of mathematical modeling

SOIL SCIENCE

Bolshakov I.E.

The composition and properties changes of volcanogenic rocks in the Upper thermal field of Burlyashchiy volcano (Bolshoy Semyachik, Kamchatka Peninsula)

ENGINEERING GEODYNAMICS

Kropotkin M.P., Orlova N.A.

Schematization of the "Vorobyovy Gory" landslide site in Moscow, taking into account the top position of Callovian and Carboniferous deposits

ENGINEERING GEOLOGY OF PERMAFROST

Petrov B.V., Streletskaya I.D., Rogov V.V., Kurbatov A.S. Permafrost temperature regime dynamics of the Yamburg gas field



Cover photo: https://www.uecrus.com/upload/iblock/c5a/1-1.jpg

ENGINEERING GEOLOGY WORLD

The journal is included in the Russian List of peer-reviewed scientific publications, which should publish the main scientific results of dissertations for the degree of Candidate of Science and Doctor of Science.

Published since May 2006. Issued 4 times a year.

6

26

ISSN: 1993-5056 (Print), ISSN: 2587-8247 (Online) Prefix DOI: 10.25296

The journal publishes articles of leading experts in the field of engineering and ecological geology. The main topics are history, theory and methodology of engineering and ecological geology, soil science, engineering

geodynamics, regional engineering geology, soil mechanics, technical melioration of soils, engineering geology of cryolithozones, hydrogeological investigations, engineering geophysics, preservation of cultural monuments and many other issues.

FOUNDER

Geomarketing LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

PUBLISHER

Geomarketing LLC, 115088, Russian Federation, Moscow, Mashinostroyeniya 1st St., Bld. 5

40 JOURNAL EDITORING

Ekaterina A. Kondratieva General Director

Nataliya V. Zvonaryova Deputy General Director

Tatyana I. Averkina Literary Editor

Marina S. Kashkina Advertising Department and Subscription Department

CONTACTS

52

Geomarketing LLC 107076, Russian Federation, Moscow, Elektrozavodskaya St., 60 Tel. +7 495 210-63-90, +7 495 210-63-06 E-mail: info@geomark.ru http://geomark.ru

Individual entrepreneur Gilmanov M.A. Prepress, Design and Layout

ropross, Dosign and Edyour

PRINTING HOUSE

Mediacolor LLC; 127273, Russian Federation, Moscow, Signalnyy Proyezd, Bld. 19, Pde 1

Certificate of registration of mass media: PI № ФС77-48918 12 March 2012.

Subscription can be issued in the editorial board, through Rospechat agency, Ural-Press Group of Companies, and the Informnauka LLC (subscription index 36611)

Electronic version: www.geomark.ru/our_journal/inzhenernaya-geologiya/

https://elibrary.ru/title_about.asp?id=28249

Signed in print 30 September 2021.

Edition format 50x70/8. Matte paper. Offset printing.

Edition 1 500 psc.

The article presents the authors' point of view, which may not coincide with the opinion of the editorial board.

une opinion of the editorial board.

The editorial board is not responsible for the content of advertising materials. © Geomarketing LLC, 2021

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ЯМБУРГСКОГО НЕФТЕГАЗОКОНДЕНСАТНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ



ПЕТРОВ Б.В.*

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, borya.petrov.2016@list.ru Адрес: ул. Ленинские горы, д. 1, г. Москва, 119991, Россия ООО «Газпром добыча Ямбург», пос. Ямбург, Ямало-Ненецкий автономный округ, Тюменская обл., Россия Адрес: пос. Ямбург, Ямало-Ненецкий автономный округ, Тюменская обл., 629740, Россия

СТРЕЛЕЦКАЯ И.Д.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, irinastrelets@gmail.com

РОГОВ В.В.

000 «Газпром добыча Ямбург», пос. Ямбург, Ямало-Ненецкий автономный округ, Тюменская обл., Россия, v.roqov@yamburg.gazprom.ru

КУРБАТОВ А.С.

000 «Газпром добыча Ямбург», пос. Ямбург, Ямало-Ненецкий автономный округ, Тюменская обл., Россия, as.kurbatov@yamburg.gazprom.ru

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 21.07.2021 / Принята к публикации 25.09.2021 / Дата публикации 30.09.2021 © 000 «Геомаркетинг», 2021

Аннотация

В данной работе впервые представлены результаты длительных наблюдений за температурным режимом многолетнемерзлых пород (ММП) в пределах Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождение (НГКМ) на Тазовском п-ове. В работе использованы материалы геотемпературных измерений с 2006 по 2020 гг. по 12 термометрическим скважинам глубиной 20 м и архивные данные по разведочным скважинам глубиной до 80 м, пробуренным в 1979, 1985, 1996–1998 гг. Термометрические скважины расположены в пределах южнотундровой зоны в различных как зональных, так и азональных ландшафтах. Была поставлена цель – установить современное состояние и динамику изменения температурного режима верхней части ММП в пределах Ямбургского НГКМ. Выявлено, что средняя температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд в пределах Ямбургского месторождения составила в 2020 г. в среднем –2,1°C. Рост значений температуры воздуха по району исследования — 0,23°C в год (1986–2020 гг.). Температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд в пределах месторождения близки к наблюдаемым по сопредельным территориям севера Западной Сибири. В различных ландшафтно-геологических условиях темпы растепления варьируют в широких пределах (от 0,02 до 0,09°C в год). Выявлено существенное влияние рельефа и мощности мохово-горфяного покрова на температурный режим ММП. Обозначены возможные риски при дальнейшем растеплении ММП для газопромысловой инфраструктуры в различных ландшафтно-геологических условиях.

Ключевые слова:

температурный режим; растепление многолетнемерзлых пород; рост температур; геокриологический мониторинг; Тазовский п-ов; нефтегазоконденсатное месторождение

Ссылка для цитирования:

Петров Б.В., Стрелецкая И.Д., Рогов В.В., Курбатов А.С., 2021. Динамика температурного режима многолетнемерзлых пород Ямбургского нефтегазоконденсатного месторождения. Инженерная геология, Том XVI, № 3, с. 66–77, https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-3-66-77.

PERMAFROST TEMPERATURE REGIME DYNAMICS OF THE YAMBURG GAS FIELD

VITALY V. ROGOV

ALEXEY S. KURBATOV

Gazprom Dobycha Yamburg LLC, Yamburg, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Tyumen Region, Russia; v.rogov@yamburg.gazprom.ru

Gazprom Dobycha Yamburg LLC, Yamburg, Yamalo-Nenets Autonomous

Okrug, Tyumen Region, Russia; as.kurbatov@yamburg.gazprom.ru

BORIS V. PETROV*

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; borya.petrov.2016@list.ru Address: Bld. 1, Leninskie Gory, 119991, Moscow, Russia Gazprom Dobycha Yamburg LLC, Yamburg, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Tyumen Region, Russia Agpec: Yamburg, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Tyumen Region, 629740, Russia

IRINA D. STRELETSKAYA

Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; irinastrelets@gmail.com

Original paper Received 21 July 2021 / Accepted 25 September 2021 / Published 30 September 2021 © Geomarketing LLC, 2021

Abstract

This paper presents for the first time the results of long-term permafrost temperature regime observations within the Yamburg gas field on the Tazovsky Peninsula. Geotemperature measurement data from 2006 to 2020 for 12 thermometric boreholes with a depth of 20 m and archived data on exploration boreholes up to 80 m deep drilled in 1979, 1985, 1996–1998 were used in this study. Thermometric boreholes are located within a southern tundra zone in a various zonal and azonal landscapes. The goal was to define the current state and dynamics of upper permafrost temperature regime change within the Yamburg gas field. It was revealed that the average permafrost temperature at the depth of zero annual amplitudes within the Yamburg gas field averaged –2.1°C in 2020. The increase in air temperature values in the study area is 0.23°C per year (1986–2020). The permafrost temperature at a zero annual amplitudes depth increases in all boreholes by an average of 0.054°C per year (during the period of continuous observations 2006–2020). The growth rates of permafrost temperature values within the gas field are close to those observed in the adjacent territories of the north of Western Siberia. In various landscape-geological conditions, the thawing rate of varies within wide limits (from 0.02 to 0.09°C per year). A significant influence of the moss-peat cover relief and thickness on the permafrost temperature regime was revealed. Possible risks in the further permafrost thawing for the gas production infrastructure in various landscape-geological conditions are indicated.

Key words:

temperature regime; permafrost degradation; temperatures rise; geocryological monitoring; Tazovsky Peninsula; gas field

For citation:

Petrov B.V., Streletskaya I.D., Rogov V.V., Kurbatov A.S., 2021. Permafrost temperature regime dynamics of the Yamburg gas field. Engineering Geology World, Vol. XVI, No. 3, pp. 66–77, https://doi.org/10.25296/1993-5056-2021-16-3-66-77.

Введение

В настоящее время в научной среде широко освещается проблема деградации многолетнемерзлых пород (ММП) в условиях потепления климата [1, 8–13, 15–17]. Этот процесс приводит к изменениям арктических ландшафтов, росту выбросов парниковых газов в атмосферу, изменению условий природопользования в зоне распространения ММП. Особое значение деградация ММП имеет в регионах с развитой нефтегазодобывающей инфраструктурой. Ямбургское нефтегазоконденсатное месторождение (НГКМ) играет важную роль в российской экономике, обладая огромными запасами природного газа, газоконденсата и нефти. В его пределах обустроена обширная инфраструктура, необходимая для добычи, обработки и транспортировки углеводородов, а также для проживания обслуживающего персонала. Быстро меняющиеся климатические условия являются серьезной проблемой для будущего развития этого региона. Антропогенное воздействие на природную среду, связанное со

строительством и эксплуатацией инфраструктуры, оказывает заметное влияние на теплофизические свойства ММП. Эти нарушения ожидаемы и учитываются при надлежащем инженерном проектировании. В то же время быстро меняющиеся климатические условия в ранней инженерной практике не учитывались в полной мере. Текущие темпы роста глобальных значений температуры требуют непрерывного и длительного геокриологического мониторинга. Изменение геокриологических условий приводит к деформациям оснований зданий и сооружений и создает риск возникновения аварий, в т.ч. с утечкой углеводородов в природную среду. В данной работе приведены результаты наблюдений за температурой ММП на глубине нулевых годовых амплитуд в различных естественных ландшафтных условиях в пределах Тазовского п-ова. Глубина, на которой были приняты для анализа значения температур ММП, выбрана как усредненная между всеми скважинами величина среднемноголетних значений глубины нулевых годовых амплитуд и равна 11 м. Цель исследования — установить современное состояние и динамику изменения температурного режима верхней части ММП в пределах Ямбургского НГКМ. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи: 1) собрать и проанализировать имеющиеся данные по фоновым измерениям температуры ММП на территории Ямбургского НГКМ; 2) выявить закономерности текущего состояния и динамики температурного состояния ММП на месторождении в зависимости от различных характерных для территории ландшафтно-геологических условий; 3) разделить данные ландшафтно-геологические условия по степени восприимчивости к климатическому потеплению.

Район исследований

Район исследований расположен на севере Западно-Сибирской низменности в юго-западной части Тазовского полуострова в зоне южной тундры.

Большая часть территории представляет собой низменную слабодренированную заболоченную равнину. Более 80% ее площади приходится на верхненеоплейстоценовые морские и прибрежно-морские равнины. Это водораздельные поверхности с абсолютными отметками 30–50 м (данные технического отчета, подготовленного ООО «Институт ЮЖНИИГИПРОГАЗ» в 2011 г. по инженерным изысканиям на стадии проектной документации по объекту: «Реконструкция и техперевооружение объектов Ямбургского ГКМ. 2-й этап реконструкции»).

Территория существенно переработана различными эндогенными и экзогенными процессами, которые включают эрозионное расчленение бровок террас и краевых частей равнин, интенсивное заболачивание, формирование бугров пучения на плоских заозеренных междуречьях, спуск озер и образование хасыреев. Данные процессы привели к развитию участков с озерно-болотным, хасырейным, пологоволнистым, линейно-грядовым типами рельефа. Растительность в пределах водоразделов на возвышенных и хорошо дренируемых участках преимущественно кустарничково-моховая и травяно-моховая. Менее дренированные участки заняты кочкарными тундрами из пушицы, кустарников и мхов. Слабодренированные центральные части плоских междуречных поверхностей заняты плоскобугристыми болотами. Почвы — тундровые арктические и тундровые глеевые с участками торфяно-болотных и перегнойно-торфяно-болотных. При относительно бедном видовом составе почвенный покров тундр отличается пестротой и сложной структурой.

Согласно климатическому районированию по классификации Б.П. Алисова район инженерно-геологических изысканий находится в субарктическом поясе. Высокоширотное расположение территории, значительная удаленность от теплых воздушных и водных масс Атлантического и Тихого океанов, равнинный рельеф, открытый для вторжения воздушных масс с Арктики в летнее время и континентальных масс зимой, определяют суровый континентальный климат (по данным технического отчета ООО «Институт ЮЖНИИГИПРОГАЗ»). Для территории характерны резкие колебания температур воздуха. Особенно неустойчива погода в начале зимы (ноябрь-декабрь) и весной (май). Летом преобладают циклоны с северо-запада, зимой антициклоны с северо-востока (Сибирский антициклон), реже — с севера (Арктический антициклон) или с юга (Казахский антициклон).

Зима холодная, длится около восьми месяцев. Минимальные температуры опускаются до –59°С. Самым холодным месяцем является январь. Лето короткое, умеренно прохладное. Наиболее теплый период — конец июляавгуст, в это время температура может подняться до +30°С (согласно данным технического отчета ООО «Институт ЮЖНИИГИПРОГАЗ»).

Среднемноголетняя температура воздуха за период с 1986 по 2020 гг. составляет -7,1°С. Продолжительность холодного периода 220–250 сут. Годовая сумма осадков 400–700 мм. Распределение снега на поверхности неравномерно: от 0,2–0,5 м на плоских тундровых участках, до 1,0–1,5 м в оврагах и логах. Средняя толщина снежного покрова в период его устойчивого залегания (ноябрь–апрель) составляет 0,44 м (по данным полевых измерений Ямбургской лаборатории мерзлоты филиала «Инженерно-технический центр» ООО «Газпром добыча Ямбург» (далее — ЯЛМ ИТЦ ГДЯ) с 2000 по 2020 гг.). Зимой преобладают южные ветра, летом — северные.

Территория Ямбургского НГКМ расположена в зоне сплошного распространения ММП. Мощность мерзлых толщ на водораздельных пространствах изменяется от 300 до 400 м. На более низких геоморфологических уровнях мощность их может сокращаться до 150–250 м, а на поймах крупных рек — до 20–80 м. Двухслойное строение ММП отмечается в пределах промерзающих хасыреев, а также в долинах крупных рек. Мощность верхнего слоя мерзлых пород в хасыреях – 5–20 м, а кровля второго слоя залегает на глубине 10–40 м (технический отчет ООО «Институт ЮЖНИИГИПРОГАЗ»). Несквозные талики существуют в субаквальных условиях и под крупными производственными объектами.

Криогенное строение грунтов во многом определяется их литологическим составом и влажностью. У глинистых толщ оно отличается большим разнообразием: шлиры льда располагаются горизонтально, косо, вертикально. Частослоистые тонкошлировые криотекстуры преобладают в верхней части разреза, с глубиной толщина шлиров растет, и расстояние между ними увеличивается. В нижней части разреза преобладает горизонтальная слоистость. Пески твердомерзлые в основном с массивной криотекстурой с элементами линзовидной и слоистой по горизонтальным и косым прослоям глинистых отложений.

Значения температур ММП изменяются в широких пределах — от -0,5 до -4° С. Глубина нулевых годовых амплитуд достигает 10–13 м. Глубина сезонного протаивания от 0,3–0,6 м на торфяниках до 1,5–2,2 м в заболоченных участках. В долинах крупных рек кровля ММП погружается на 2,5 м и ниже (по данным технического отчета ООО «Институт ЮЖНИИГИПРОГАЗ»). Льдистость толщ достигает максимума в верхней части разреза — 0,7–0,8 (торф) и 0,3–0,35 (пески, супеси) и обычно понижается до 0,10–0,15 ниже 2–3 м.

По территории исследования повсеместно развиты процессы сезонного пучения [7]. Размеры сезонных бугров пучения составляют 0,8–1,2 м. Миграционные бугры пучения достигают высоты 1–5 м, ширины 50–150 м, наблюдаются в днищах хасыреев, по берегам термокарстовых озер, на заболоченных участках водоразделов по всей территории исследования в пределах торфяников [6]. Инъекционные бугры пучения имеют высоту 5–7 м, реже 15– 20 м [18], ширину от 60–80 до 250–300 м, располагаются они преимущественно в днищах хасыреев.



Повсеместно развиты процессы морозобойного растрескивания пород, сопровождающиеся ростом полигонально-жильных льдов. Морозобойное растрескивание наблюдается практически на всех элементах рельефа, за исключением крутых склонов и пляжей. Полигональные формы рельефа в целом выражены слабо, размеры полигонов различные, в среднем 12–20 м. Мощность ледяных жил небольшая — около 3–4 м.

Относительно высокая льдистость приповерхностных отложений и широкое развитие полигонально-жильных льдов обуславливают проявление процессов термокарста и заболачивания. Также этому способствует небольшая абсолютная высота поверхности, невысокая степень расчлененности рельефа в центральных частях водоразделов. Наиболее активно термокарстовые процессы развиты в пределах II и III аллювиально-морских террас. В западной части Ямбургского месторождения термокарст проявляется меньше, чем на остальной территории. Это связано с тем, что с поверхности здесь залегают слабольдистые пески мощностью до 3-5 м. Кроме того, в этой части месторождения наиболее активны эрозионные процессы, что способствует хорошему дренажу поверхности. Отсутствие в разрезе мощных пластовых льдов обуславливает развитие преимущественно неглубоких термокарстовых форм. Глубина термокарстовых озер в среднем изменяется от 2,0-2,5 до 4,0-5,0 м (из данных технического отчета ООО «Институт ЮЖНИИГИПРОГАЗ»). Площадь таких озер достигает нескольких сотен квадратных метров, наиболее крупных — до 2-5 км². На склоновых участках процесс термокарста проявляется совместно с термоэрозионными процессами. Обычно развитие термоэрозионных форм происходит по полигонально-жильным льдам. При зарастании таких форм часть талых и дождевых вод сбрасывается по грунтовой поверхности, другая — внутри сезонно-талого слоя. При этом водными потоками выносятся мелкодисперсные частицы — развивается термосуффозия.

Исходные материалы и методы исследований

Мониторинг температуры ММП в естественных условиях осуществляется сотрудниками ЯЛМ ИТЦ ГДЯ с 2006 г. по настоящее время. Измерения ведутся по 12 термометрическим скважинам глубиной 20 м (рис. 1). Стратиграфо-генетические подразделения на рис. 1 выделены согласно фондовой Карте инженерно-геокриологических условий Ямбургского ГКМ, подготовленной О.В. Лахтиной с соавторами в 1991 г. Скважины оборудованы обсадными металлическими колоннами диаметром 89 мм. В качестве измерительного оборудования используются информационнорегистрирующие комплексы (ИРК) «KrioLab». Пределы погрешности данных приборов ±0,1°С при температурах $+20^{\circ}C \div -50^{\circ}C$. Данные по скважинам считываются дважды в год (зимний и летний период) в ручном режиме. Внесение данных в персональный компьютер осуществляется также вручную. Используемые ИРК отличаются надежностью, простотой в эксплуатации и точностью измерений в сложных погодных условиях. Массив данных накапливается в специальном программном обеспечении (ПО) «Лаборатория мерзлоты», разработанном в ООО «Газпром добыча Ямбург». Обработка материалов, построение графиков осуществляется в ПО Microsoft Excel.

При анализе геотемпературных данных дополнительно использовались материалы инженерно-геологических изысканий института ПНИИИС Госстроя СССР (1979 г.), ООО «ТюменНИИГипрогаз» (1985 г.) и ООО «Подземгазпром» (1996–1998 гг.) (см. рис. 1).





Fig. 2. Dynamics of average annual, January, July air temperature values from 1986 to 2020 according to the meteorological station in Yamburg

Анализировались значения температуры на глубине нулевых годовых амплитуд. Вариации между скважинами по этой величине были усреднены, глубина нулевых годовых амплитуд для рассматриваемых скважин была принята на 11 м.

Геотемпературные данные были сопоставлены с температурой воздуха по метеостанции в п. Ямбург ЯНАО Тюменской области.

Результаты измерений

Среднемноголетняя температура воздуха за период с 1986 по 2020 гг. по метеостанции в п. Ямбург составляет -7,1°С. Минимальная среднегодовая температура воздуха -10,9°С была зафиксирована в 1998 г. Максимальная среднегодовая температура -3,1°С наблюдалась в 2016 г. С 1986 г. по настоящее время отмечается тренд на повышение среднегодовых значений температуры воздуха около 0,1°С в год (рис. 2). В 2020 г. она составляла -2,4°С. Анализ динамики среднемесячных значений температуры показал, что наибольший рост приходится на июнь. Согласно тренду, за период с 1986 по 2020 гг. среднемесячные июньские значения повышаются на 0,23°С в год.

По результатам инженерно-геологических изысканий, проведенных институтом ПНИИИС Госстроя СССР в 1979 г., получены данные по температурам ММП в 1 км к северо-востоку от п. Ямбург. Измерения, выполненные по трем термометрическим скважинам на глубине от 8 до 11 м, показали, что температура ММП на глубине нулевых амплитуд составила –5,2 ÷ –2,9°С, а в среднем –4,4°С.

Специалисты ООО «ТюменНИИГипрогаз» в 1985 г. на площадке строительства в 1 км к западу от берега Обской губы произвели замеры температуры ММП по четырем скважинам, пробуренным до глубины 50–80 м. Согласно полученным данным, температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд изменялась в диапазоне –4,6 ÷ –3,7°С, в среднем имела значение –4,1°С.

При аналогичных работах, выполненных ООО «Подземгазпром» в 1996–1998 гг., температуры ММП измерены по 20 термометрическим скважинам с глубиной замеров от 8 до 36 м на трех отдельно стоящих площадках в окрестностях п. Ямбург. По данным скважин, температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд составила $-3.9 \div -1.1^{\circ}$ С, в среднем -2.9° С.

С 2006 г. по настоящее время динамика среднегодовой температуры ММП непрерывно отслеживается ЯЛМ ИТЦ ГДЯ по 12 термометрическим скважинам (табл.). По каждой из них наблюдается рост значений температуры ММП. Темпы роста варьируют от 0,016 до 0,089°С/год, в среднем оцениваются в 0,054°С/год. Средняя температура ММП на глубине нулевых годовых амплитуд в 2006–2020 гг. составляет –2,8°С. В начале непрерывных наблюдений в 2006 г. значения фиксировались в интервале –4,3 ÷ –1,3°С, в среднем –3,1°С. В 2020 г. температура ММП составила –3,3 ÷ –0,5°С, в среднем –2,1°С.

Наблюдаемый рост значений температуры ММП по всей исследуемой территории обуславливает риск развития опасных криогенных процессов, характер и интенсивность которых определяется ландшафтно-геологическими условиями, а также динамикой изменения температур ММП.

В пределах заболоченных ложбин стока и регулярно заливаемых приозерных понижений распространена разнотравная влаголюбивая растительность, мохово-торфяной слой мощностью 0,25-0,60 м. Отложения верхней части разреза представлены верхненеоплейстоценовыми морскими, верхненеоплейстоцен-голоценовыми озерноаллювиальными и голоценовыми аллювиальными песками мелкими, пылеватыми, а также супесями. Криотекстуры пород в основном массивные, но в супесях встречаются слоистые тонкошлировые (рис. 3, *a*). Отложения отличаются высоким содержанием льда в верхней части разреза: в песчаных разрезах в первую очередь в виде прослоев под мохово-торфяным горизонтом, в супесчаных разрезах льдистость $I_i = \leq 0,3$.

Скважины, расположенные в данных ландшафтно-геологических условиях (№ 1, 5, 6), характеризуются

Таблица Table

Общие сведения и динамика значений среднегодовой температуры ММП по термометрическим скважинам (2006–2020 гг.)

General information and dynamics of mean annual permafrost temperature values for thermometric boreholes (2006–2020)

№ TC	Координаты	Высота, м н.у.м.	Мощность торфа, см	Состав отложений	Возраст и генезис отложений	<i>Т_{ммп}</i> , 2006, °С	<i>Т</i> _{ммп} , 2020, °С	Изменение	<i>R² T</i> _{MMII} (2006–2020)
1	67°52'56,00" с.ш. 75°29'3,40" в.д.	34,6	0,25	песок мелкий и пылеватый	m,pmIII ₃	-2,0	-1,20	0,72	0,17
1B	67°52'49,90" с.ш. 75°44'38,30" в.д.	40,4	0	песок мелкий, супесь, песок пылеватый	m,pmIII ₃	-4,3	-3,30	1,04	0,80
2	67°57'59,16" с.ш. 75°25'32,48" в.д.	37,0	0,40	песок мелкий, суглинок, супесь	m,pmIII ₃	-3,4	-2,65	0,38	0,11
2B	67°55'14,70" с.ш. 76°6'41,60" в.д.	28,9	0,30	суглинок, песок мелкий, супесь	a,laIII ₃₋₄	-4,2	-2,85	1,10	0,68
3	68°1'50,70" с.ш. 75°38'7,50" в.д.	28,5	0	песок мелкий, супесь	m,pmIII ₃	-3,0	-2,00	1,34	0,24
3B	67°57'1,70" с.ш. 75°31'41,30" в.д.	38,9	0,45	песок мелкий, супесь	a,laIII ₃₋₄	-3,6	-2,35	1,04	0,53
4	68°7'9,20" с.ш. 75°45'38,80" в.д.	41,9	0,80	песок мелкий, супесь	m,pmIII ₃	-3,5	-2,85	0,38	0,01
4A	68°17'41,10" с.ш. 75°49'51,90" в.д.	47,7	0,20	суглинок, супесь	m,pmIII ₁	-3,8	-2,30	1,12	0,73
5	67°55'32,20" с.ш. 75°42'35,10" в.д.	29,6	0,25	песок мелкий, супесь	a,laIII ₃₋₄	-2,0	-1,15	0,64	0,56
6	67°58'52,70" с.ш. 75°59'9,80" в.д.	17,5	0,60	песок мелкий	aIV_4	-1,3	-0,45	0,74	0,27
7	68°4'29,00" с.ш. 76°8'58,90" в.д.	20,2	0	песок мелкий, глина	a,laIII ₃₋₄	-2,8	-2,25	0,24	0,01
8	67°48'16,60" с.ш. 75°25'36,40" в.д.	36,1	0,30	песок мелкий, супесь	$aIII_4$	-3,4	-2,20	1,04	0,54

сравнительно высокими значениями температуры ММП — в 2020 г. в среднем $-0,9^{\circ}$ С (от -0,5 до $-1,2^{\circ}$ С), низкими темпами растепления мерзлых пород — в среднем 0,047°С в год (от 0,042 до 0,049°С в год), небольшими ежегодными отклонениями значений температуры от многолетнего тренда — в среднем 0,16°С (от 0,11 до 0,26°С) (рис. 4).

Слабодренированные периодически заливаемые участки, примыкающие к ложбинам стока и озерным понижениям, покрыты разнотравной влаголюбивой растительностью, мохово-торфяной покров практически отсутствует. Отложения представлены морскими верхненеоплейстоценовыми и верхненеоплейстоцен-голоценовыми озерно-аллювиальными песками мелкими с прослоями глин и супесей. Криотекстуры пород преимущественно массивные, по супесям и глинам встречаются слоистые (см. рис. 3, *b*). Отложения в верхних горизонтах песчаных разрезов имеют льдистость $I_i = 0,1$ и более, встречаются ледогрунты, в глинах льдистость может достигать $I_i = 0,3-0,4$.

Скважины, расположенные в данных ландшафтно-геологических условиях (№ 3, 7), характеризуются средними значениями температуры ММП в 2020 г. –2,0°С и –2,3°С, различными темпами растепления пород — 0,015 и 0,089°С в год, значительными ежегодными отклонениями значений температуры от заданного тренда 0,27 и 0,36°С (рис. 5). Плоские дренированные участки с развитым мохово-торфяным слоем (мощность 0,4–0,8 м) покрыты кустарничково-мохово-разнотравной растительностью. Отложения представлены морскими верхненеоплейстоценовыми песками мелкими, перекрытыми до глубины 1,5– 2,0 м супесчаными и суглинистыми грунтами. Криотекстуры в песках массивные, по супесям и суглинкам слоистые тонко- и среднешлировые (см. рис. 3, *c*). Отложения в верхней части разреза, представленные супесями и суглинками, льдистые — $I_i = 0,25-0,35$.

Скважины, расположенные в данных ландшафтно-геологических условиях (№ 2, 4), характеризуются низкими значениями температуры ММП — в 2020 г. –2,7°С и –2,9°С, низкими темпами растепления пород — 0,026°С в год (рис. 6).

В пределах плоских дренированных участков с маломощным мохово-торфяным слоем (мощность 0– 0,45 м) распространена кустарничково-мохово-лишайниковая растительность. Отложения представлены морскими и прибрежно-морскими верхнечетвертичными, аллювиальными и озерно-аллювиальными верхненеоплейстоценголоценовыми песками мелкими с прослоями песков пылеватых, супесей, суглинков, а также суглинками с отдельными прослоями супесей и песков мелких. Криотекстуры пород преимущественно массивные, в супесчаных и су-





Рис. 4. Динамика температуры воздуха в п. Ямбург и ММП на глубине нулевых годовых амплитуд в термометрических скважинах TC № 1, TC № 5, TC № 6 в пределах заболоченных ложбин стока и регулярно заливаемых приозерных понижениях

Fig. 4. Dynamics of air temperature in Yamburg and permafrost at a zero annual amplitudes depth in thermometric wells TC No. 1, TC No. 5, TC No. 6 within swampy runoff troughs and regularly flooded lakeside depressions



термометрических скважинах TC № 3, TC № 7 в пределах слабодренированных периодически заливаемых участков, примыкающих к ложбинам стока и озерным понижениям

Fig. 5. Dynamics of air in Yamburg and permafrost at a zero annual amplitudes depth in thermometric boreholes TC No. 3, TC No. 7 within poorly-drained periodically flooded areas near runoff troughs and lake depressions

глинистых отложениях слоистые тонко- и среднешлировые, а также линзовидные (см. рис. 3, d). Отложения отличаются высоким содержанием льда в верхней части разреза: в песчаных разрезах в первую очередь в виде прослоев ледогрунтов под мохово-торфяным горизонтом, в супесчаных и суглинистых разрезах льдистость $I_i = 0,2-0,5$.

Скважины, расположенные в данных ландшафтно-геологических условиях (№ 1В, 2В, 3В, 4А, 8), характеризуются низкими значениями температуры ММП в 2020 г. — в среднем –2,6°С (от –2,2 до –3,3°С), высоким темпами растепления пород — в среднем 0,071°С в год (от 0,069 до 0,075°C в год), средними ежегодными отклонениями значений температуры от заданного тренда — в среднем 0,24°C (от 0,17 до 0,42°C) (рис. 7).

Обсуждение результатов

Темпы роста значений температуры ММП в районе исследования весьма близки к характерным для региона величинам. Так, наблюдаемые средние темпы роста значений температуры ММП — 0,054°С в год за 2006–2020 гг. или 0,056°С в год за 1979–2020 гг. (прерывистые наблюдения до 2006 г.) несколько ниже или равны наблю-



Рис. 6. Динамика температуры воздуха в п. Ямбург и ММП на глубине нулевых годовых амплитуд в термометрических скважинах TC № 4, TC № 2 в пределах плоских дренированных участков с развитым мохово-торфяным слоем

Fig. 6. Dynamics of air in Yamburg and permafrost at a zero annual amplitudes depth in thermometric boreholes TC No. 4, TC No. 2 within flat well-drained areas with a thick moss-peat layer



термометрических скважинах ТС № 1В, ТС № 4А, ТС № 8, ТС № 2В, ТС № 3В в пределах плоских дренированных участков с маломощным мохово-торфяным слоем

Fig. 7. Dynamics of air temperatures in Yamburg and permafrost at a zero annual amplitudes depth in thermometric boreholes TC No. 1B, TC No. 4A, TC No. 8, TC No. 2B, TC No. 3B mean annual ground temperatures of permafrost within flat well-drained areas with a thin moss-peat layer

даемым на стационаре Марре-Сале (типичная тундра, около 400 км к северо-западу от исследуемой территории) — 0,056°С за 1978–2018 гг., но выше, чем на стационаре Северный Уренгой (южная тундра, около 60 км к юго-востоку от исследуемой территории) — 0,05°С за 1975–2018 гг. (прерывистые наблюдения до 2006 г.) [2].

Температурный режим ММП в различных ландшафтно-геологических условиях существенно отличается. Дренированные, плоские участки, как правило, имеют более низкие значения температуры ММП по сравнению с заболоченными понижениями. Это может быть связано с небольшим снегонакоплением в их пределах. Вместе с тем, в общем случае, приуроченность к плоским сухим участкам способствует лучшему теплообмену с атмосферой и, соответственно, более высоким темпам растепления ММП, что подтверждается исследованиями на стационаре Северный Уренгой [14]. Однако существенную роль на таких участках играет мощность мохово-торфяного слоя: наличие большого слоя замедляет рост значений температуры ММП. Регулярно заливаемые понижения, где имеющийся мохово-торфяной слой в летнее время постоянно находится в увлажненном состоянии, что снижает его теплоизолирующие свойства, имеют более высокие значений температуры ММП, чем периодически заливаемые, где мохово-торфяной слой отсутствует. Это указывает на существенную отепляющую роль водного покрова, который выступает в роли теплоносителя, воздействующего на подстилающие мерзлые породы.

В различных ландшафтно-геологических условиях рост значений температуры ММП ведет к развитию различных опасных геокриологических процессов и создает риски деформаций зданий и сооружений на исследуемой территории.

В пределах ложбин стока и регулярно заливаемых приозерных понижений дальнейшее растепление ММП приведет к формированию перелетков, понижению кровли ММП. Это снизит несущую способность оснований линейных объектов, пролегающих через подобные участки: газопроводов, автомобильных дорог, линий электропередач.

Периодически заливаемые слабодренированные участки, примыкающие к ложбинам стока и озерным понижениям, как правило, отличаются льдистостью и широким распространением полигонально-жильных льдов. На таких участках при дальнейшем росте значений температуры ММП вероятны термокарстовые процессы по полигонально-жильным льдам. Развитию термокарста на склоновых участках будут способствовать термоэрозионные процессы по морозобойным трещинам, солифлюкция. Интенсификация термокарстовых и термоэрозионных процессов в непосредственной близости от линейных объектов ведет к их обводнению, потере несущей способности оснований в результате их размыва, деформациям, связанным с осадкой фундаментов, со всплытиями газопроводов подземной прокладки. Геокриологические процессы изначально естественного происхождения в районе промышленных площадок часто приобретают антропогенных характер, угрожая устойчивости фундаментов добывающих скважин и сооружений установок комплексной и предварительной подготовки газа, других производственных сооружений, жилых зланий.

На плоских дренированных участках при наличии достаточного мохово-торфяного слоя мерзлые породы устойчивы к потеплению климата. Однако нарушение поверхностного слоя ведет к резкой активизации термокарстовых процессов. На нарушенных участках и на участках с небольшим мохово-торфяным слоем быстрый рост значений температуры ММП ведет к заболачиванию поверхности, развитию термокарстовых процессов. Данные территории наиболее привлекательны для строительства, но активизация опасных геокриологических процессов, ухудшение показателей свойств пород усложняет и ведет к удорожанию строительства, реконструкции и эксплуатации зданий и сооружений.

Заключение

Анализ результатов многолетнего мониторинга геокриологических условий Ямбургского НГКМ позволяет сделать следующие выводы.

Среднегодовые значения температуры воздуха в районе исследования растут. С 1986 по 2020 гг. они повысились на 3,7°С и в 2020 г. составили –2,4°С.

Рост значений температуры воздуха ведет к растеплению ММП, что согласуется с результатами наблюдений в сопредельных районах [2–5, 8, 12, 15]. С 1979 по 2020 гг. среднегодовая температура ММП повысилась в среднем на 2,3°С и составила –2,1°С в 2020 г.

Рост значений температуры ММП отмечается во всех естественных ландшафтно-геологических условиях. Наиболее высокие текущие значения температуры ММП ($-0,9^{\circ}$ С) и низкие темпы растепления пород ($0,047^{\circ}$ С в год) наблюдаются в пределах заболоченных ложбин стока и регулярно заливаемых приозерных понижений. Наиболее низкие текущие значения температуры ММП ($-2,6^{\circ}$ С) и высокие темпы растепления пород ($0,071^{\circ}$ С в год) фиксируются в пределах плоских дренированных участков с льдистыми отложениями в верхней части разреза.

Полученные актуальные данные о темпах растепления ММП могут быть применены проектными институтами ПАО «Газпром» для прогноза изменений инженерно-геокриологических условий при строительстве и реконструкции зданий и сооружений в пределах Ямбургского НГКМ, а также при освоении новых месторождений на Тазовском п-ове. Приведенная типизация различных ландшафтно-геологических условий по текущему состоянию и динамике значений температуры ММП позволяет детализировать прогноз до уровня элементарных ландшафтных единиц, повышая его точность. Негативное влияние повышения значений температуры ММП сказывается в первую очередь на отдельных кустах газовых скважин и трассах линейных сооружений, построенных на участках, где значения температуры ММП составляют −2 ÷ 0°С. В их пределах повышение значений температуры пород ведет к существенному увеличению глубины сезонного протаивания, опусканию кровли ММП и снижению несущей способности свайных фундаментов. Подобные участки требуют детального геотехнического мониторинга для своевременной разработки мероприятий по снижению рисков возникновения аварийных ситуаций. 📎

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Анисимов О.А., Шерстюков А.Б., 2016. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России. Криосфера Земли, Том XX, № 2, с. 90–99.
- 2. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С., Коростелев Ю.В., Малкова Г.В., Облогов Г.Е., Пономарева О.Е., Сатуртдинов М.Р., Стрелецкая И.Д., Стрелецкий Д.А., Устинова Е.В., Широков Р.С., 2020. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе российской Арктики. Криосфера Земли, Том XXIV, № 2, с. 15–30, https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2 (15-30).
- 3. Васильев А.А., Дроздов Д.С., Москаленко Н.Г., 2008. Динамика температуры многолетнемерзлых пород Западной Сибири в связи с изменениями климата. Криосфера Земли, Том XII, № 2, с. 10–18.

- 4. Васильчук А.К., Васильчук Ю.К., 2015. Инженерно-геологические и геохимические условия полигональных ландшафтов острова Белый (Карское море). Инженерная геология, № 1, с. 50–65.
- 5. Васильчук А.К., Васильчук Ю.К., 2015. Инженерно-геологические и геохимические условия полигональных ландшафтов в районе устья реки Тамбей (север полуострова Ямал). Инженерная геология, № 4, с. 36–54.
- 6. Васильчук Ю.К., Васильчук А.К., Буданцева Н.А., Чижова Ю.Н., 2012. Миграционные бугры пучения на севере Западной Сибири: южный и северный пределы ареала и современная динамика. Инженерная геология, № 3, с. 62–78.
- 7. Евсеев В.П., 1976. Миграционные бугры пучения северо-востока европейской части СССР и Западной Сибири. Проблемы криолитологии, № 5. Изд-во Московского университета, Москва, с. 95–159.
- Малкова Г.В., Коростелев Ю.В., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Д., Царев А.М., 2018. Современные климатические изменения и температурный режим многолетнемерзлых пород Европейского Севера. Актуальные проблемы геокриологии, Сборник докладов расширенного заседания Научного совета по криологии Земли РАН, Том 1, Москва, 2018, с. 98–104.
- 9. Павлов А.В., 1997. Мерзлотно-климатический мониторинг России: методология, результаты наблюдений, прогноз. Криосфера Земли, Том I, № 1, с. 47–58.
- 10. Романовский В.Е., 2006. Температурный режим вечной мерзлоты Аляски последних 20 лет. Теория и практика оценки состояния криосферы Земли и прогноз ее изменений, Материалы Международной конференции, Том 1, Тюмень, 2006, с. 96–101.
- Abramov A., Kholodov A., Kraev G., Lupachev A., Ostroumov V., Rivkina E., Shmelev D., Sorokovikov V., Veremeeva A., Davydov S., Zimov S., Ivashchenko A., Karelin D., Maslakov A., Tregubov O., Zamolodchikov D., 2019. Two decades of active layer thickness monitoring in northeastern Asia. Polar Geography, pp. 1–17, https://doi.org/10.1080/1088937X.2019.1648581.
- 12. Biskaborn B.K., Smith S.L., Cable W.L., Diekmann B., Grosse G., Lantuit H., Smith S.L., Noetzli J., Phillips M., Vieira G., Streletskiy D.A., Schoeneich P., Romanovsky V.E., Kholodov A., Yoshikawa K., Lewkowicz A.G., Abramov A., Allard M., Christiansen H.H., Delaloye R., Drozdov D., Malkova G., Moskalenko N., Vasiliev A., Etzelmüller B., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen T., Isaksen K, Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Lanckman J.P., Kaverin D., Konstantinov P., Skryabin P., Zheleznyak M., Kröger T., Lambiel C., Luo D., Wu Q., Meiklejohn I., Oliva M., Ramos M., Sannel A.B.K., Sergeev D., Seybold C., 2019. Permafrost is warming at a global scale. Nature Communications, Vol. 10, No. 1, pp. 1–264, https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4.
- 13. Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyanov D., Langer M., Lange S., Bornemann N., Morgenstern A., Schreiber P., Wille C., Chadburn S., Gouttevin I., Kutzbach L., 2018. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River Delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote sensing data and land surface, snow, and permafrost models. Earth System Science Data, Vol. 11, pp. 261–299, https://doi.org/10.5194/essd-2018-82.
- 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., Vasiliev A.A., 2010. Thermal state of permafrost in Russia. Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 21, pp. 136–155, https://doi.org/10.1002/ppp.683.
- Smith S.L., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Burn C.R., Allard M., Clow G.D., Yoshikawa K., Throop J., 2010. Thermal state of permafrost in North America: a contribution to the international polar year. Permafrost and Periglacial Processes, Vol. XXI, No. 2, pp. 117–135, https://doi.org/10.1002/ppp.690.
- Streletskiy D., Anisimov O., Vasiliev A., 2015. Permafrost degradation. Snow and ice-related hazards, risks and disasters. Elsevier, New York, NY, USA, pp. 303–344.
- 17. Streletskiy D.A., Sherstiukov A.B., Frauenfeld O.W., Nelson F.E., 2015. Changes in the 1963–2013 shallow ground thermal regime in Russian permafrost regions. Environmental Research Letters, Vol. 10, pp. 125005.
- Vasilchuk Yu.K., Lawson D.E., Yoshikawa K., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N., Podborny Ye.Ye., Vasilchuk A.C., 2016. Stable isotopes in the closed-system Weather Pingo, Alaska and Pestsovoye Pingo, northwestern Siberia. Cold Regions Science and Technology, Vol. CXXVIII, pp. 13–21, https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.05.001.

REFERENCES

- Anisimov O.A., Sherstyukov A.B., 2016. Evaluating the effect of environmental factors on permafrost in Russia. Earth's Cryosphere, Vol. XX, No. 2. pp. 90–99. (in Russian)
- Vasiliev A.A., Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A., Drozdov D.S., Korostelev Yu.V., Malkova G.V., Oblogov G.E., Ponomareva O.E., Sadurtdinov M.R., Streletskaya I.D., Streletskiy D.A., Ustinova E.V., Shirokov R.S., 2020. Permafrost degradation: results of the longterm geocryological monitoring in the western sector of Russian Arctic. Earth's Cryosphere, Vol. XXIV, No. 2, pp. 15–30, https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30). (in Russian)
- Vasiliev A.A., Drozdov D.S., Moskalenko N.G., 2008. Permafrost temperature dynamics of West Siberia in context of climate changes. Earth's Cryosphere, Vol. XII, No. 2, pp. 10–18. (in Russian)
- 4. Vasilchuk A.K., Vasilchuk Yu.K., 2015. Engineering-geological and geochemical conditions of polygonal landscapes on the Belyy Island (the Kara Sea). Inzhenernaya Geologiya, No. 1, pp. 50–65. (in Russian)
- Vasilchuk A.K., Vasilchuk Yu.K., 2015. Engineering-geological and geochemical conditions of polygonal landscapes in the area of the Tambey River mouth (the north of the Yamal Peninsula). Inzhenernaya Geologiya, No. 4, pp. 36–54. (in Russian)
- Vasilchuk Yu.K., Vasilchuk A.K., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N., 2012. Palsas in the north of Western Siberia: the southern and northern limits of the areal and the modern dynamics. Inzhenernaya Geologiya, No. 3, pp. 62–78. (in Russian)

- Evseev V.P., 1976. Migrational palsas distribution in the northeast of the European part of the USSR and Western Siberia. Problems of Cryolithology, No. 5. Publishing house of the Moscow University, Moscow, pp. 95–159. (in Russian)
- Malkova G.V., Korostelev Yu.V., Sadurtdinov M.R., Skvortsov A.D., Tsarev A.M., 2018. Contemporary climate change and thermal regime of Permafrost at European North. Actual problems of Geocryology, Reports of the scientific Council session on Cryology of the Earth, Russian Academy of Sciences, Vol. 1, Moscow, 2018, pp. 98–104. (in Russian)
- Pavlov A.V., 1997. Permafrost-climate monitoring of Russia: methodology, results of observation and forecast. Earth's Cryosphere, Vol. I, No. 1, pp. 47–58. (in Russian)
- 10. Romanovsky V.E., 2006. Temperature regime of permafrost in Alaska for the last 20 years. Theory and practice of assessing the state of the Earth's cryosphere and forecasting its changes, Materials of the International Conference, Vol. 1, Tyumen, 2006, pp. 96–101. (in Russian)
- Abramov A., Kholodov A., Kraev G., Lupachev A., Ostroumov V., Rivkina E., Shmelev D., Sorokovikov V., Veremeeva A., Davydov S., Zimov S., Ivashchenko A., Karelin D., Maslakov A., Tregubov O., Zamolodchikov D., 2019. Two decades of active layer thickness monitoring in northeastern Asia. Polar Geography, pp. 1–17, https://doi.org/10.1080/1088937X.2019.1648581.
- 12. Biskaborn B.K., Smith S.L., Cable W.L., Diekmann B., Grosse G., Lantuit H., Smith S.L., Noetzli J., Phillips M., Vieira G., Streletskiy D.A., Schoeneich P., Romanovsky V.E., Kholodov A., Yoshikawa K., Lewkowicz A.G., Abramov A., Allard M., Christiansen H.H., Delaloye R., Drozdov D., Malkova G., Moskalenko N., Vasiliev A., Etzelmüller B., Guglielmin M., Ingeman-Nielsen T., Isaksen K, Ishikawa M., Johansson M., Johannsson H., Joo A., Lanckman J.P., Kaverin D., Konstantinov P., Skryabin P., Zheleznyak M., Kröger T., Lambiel C., Luo D., Wu Q., Meiklejohn I., Oliva M., Ramos M., Sannel A.B.K., Sergeev D., Seybold C., 2019. Permafrost is warming at a global scale. Nature Communications, Vol. 10, No. 1, pp. 1–264, https://doi.org/10.1038/s41467-018-08240-4.
- 13. Boike J., Nitzbon J., Anders K., Grigoriev M., Bolshiyanov D., Langer M., Lange S., Bornemann N., Morgenstern A., Schreiber P., Wille C., Chadburn S., Gouttevin I., Kutzbach L., 2018. A 16-year record (2002–2017) of permafrost, active layer, and meteorological conditions at the Samoylov Island Arctic permafrost research site, Lena River Delta, northern Siberia: an opportunity to validate remote sensing data and land surface, snow, and permafrost models. Earth System Science Data, Vol. 11, pp. 261–299, https://doi.org/10.5194/essd-2018-82.
- 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., Vasiliev A.A., 2010. Thermal state of permafrost in Russia. Permafrost and Periglacial Processes, Vol. 21, pp. 136–155, https://doi.org/10.1002/ppp.683.
- Smith S.L., Romanovsky V.E., Lewkowicz A.G., Burn C.R., Allard M., Clow G.D., Yoshikawa K., Throop J., 2010. Thermal state of permafrost in North America: a contribution to the international polar year. Permafrost and Periglacial Processes, Vol. XXI, No. 2, pp. 117–135, https://doi.org/10.1002/ppp.690.
- Streletskiy D., Anisimov O., Vasiliev A., 2015. Permafrost degradation. Snow and ice-related hazards, risks and disasters. Elsevier, New York, NY, USA, pp. 303–344.
- 17. Streletskiy D.A., Sherstiukov A.B., Frauenfeld O.W., Nelson F.E., 2015. Changes in the 1963–2013 shallow ground thermal regime in Russian permafrost regions. Environmental Research Letters, Vol. 10, pp. 125005, https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/125005.
- Vasilchuk Yu.K., Lawson D.E., Yoshikawa K., Budantseva N.A., Chizhova Ju.N., Podborny Ye.Ye., Vasilchuk A.C., 2016. Stable isotopes in the closed-system Weather Pingo, Alaska and Pestsovoye Pingo, northwestern Siberia. Cold Regions Science and Technology, Vol. CXXVIII, pp. 13–21, https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.05.001

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

ПЕТРОВ БОРИС ВЯЧЕСЛАВОВИЧ

Аспирант кафедры криолитологии и гляциологии географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия; Инженер 2 категории Ямбургской лаборатории мерзлоты филиала «Инженернотехнический центр» ООО «Газпром добыча Ямбург», п. Ямбург, Ямало-Ненецкий автономный округ, Тюменская обл., Россия

СТРЕЛЕЦКАЯ ИРИНА ДМИТРИЕВНА

И.о. заведующего кафедрой криолитологии и гляциологии географического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, к.г.-м.н., г. Москва, Россия

РОГОВ ВИТАЛИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

Ведущий инженер Ямбургской лаборатории мерзлоты филиала «Инженерно-технический центр» ООО «Газпром добыча Ямбург», п. Ямбург, Ямало-Ненецкий автономный округ, Тюменская обл., Россия

КУРБАТОВ АЛЕКСЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

Ведущий инженер Ямбургской лаборатории мерзлоты филиала «Инженерно-технический центр» ООО «Газпром добыча Ямбург», п. Ямбург, Ямало-Ненецкий автономный округ, Тюменская обл., Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

BORIS V. PETROV

Postgraduate Student of the Department of Cryolithology and Glaciology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia; Engineer of the 2nd category of the Yamburg Permafrost Laboratory, Branch "Engineering and Technical Center", Gazprom Dobycha Yamburg LLC; Yamburg, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Tyumen Region, Russia

IRINA D. STRELETSKAYA

PhD (Geology and Mineralogy), Acting Head of the Department of Cryolithology and Glaciology, Faculty of Geography, Lomonosov Moscow State University; Moscow, Russia

VITALY V. ROGOV

Leading Engineer of the Yamburg Permafrost Laboratory, Branch "Engineering and Technical Center", Gazprom Dobycha Yamburg LLC; Yamburg, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Tyumen Region, Russia

ALEXEY S. KURBATOV

Leading Engineer of the Yamburg Permafrost Laboratory, Branch "Engineering and Technical Center", Gazprom Dobycha Yamburg LLC; Yamburg, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug, Tyumen Region, Russia