

УДК 550.361

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ И ПРОГНОЗ ГЕОКРИОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В ГУБЕ БЕЗЫМЯННОЙ АРХ. НОВАЯ ЗЕМЛЯ (ОСТРОВ ЮЖНЫЙ)

Д.С. Никитин¹, М.Д. Хуторской¹, А.Р. Кириллин², М.А. Сивцев², О.С. Самсонова¹¹ Геологический институт Российской Академии наук. Россия, г. Москва; e-mail: ndsnomination@mail.ru² Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова Сибирского отделения Российской академии наук. Россия, г. Якутск

Аннотация. Исследована геокриологическая обстановка на территории Павловского месторождения (остров Южный архипелага Новая Земля). Измерены температуры в буровых скважинах, определена теплопроводность горных пород, дисперсных грунтов из разрезов скважин. Установлена суперпозиция влияния природных и техногенных процессов на температурный режим многолетнемерзлых грунтов. Приведены данные режимных температурных наблюдений в инженерно-геологических скважинах. Предложен прогноз температурного режима грунта на 2040 год по трем сценариям: с сохранением настоящих климатических условий; по сценарию климатической модели глобального потепления Representative Concentration Pathway с повышением среднегодовой температуры воздуха с трендом 0,8 °C / 10 лет и 1,4 °C / 10 лет.

Ключевые слова. Новая Земля, Южный остров архипелага Новая Земля, губа Безымянная, река Безымянная, месторождение Павловское, теплопроводность горных пород, глобальное потепление.

TEMPERATURE REGIME AND THE GEOCRYOLOGICAL SITUATION FORECAST IN THE BEZYMIANNY BAY OF NEW LAND ARCHIPELAGO (SOUTHERN ISLAND)

D.S. Nikitin¹, M.D. Khutorskoi¹, A.R. Kirillin², M.A. Sivzev², O.S. Samsonova¹¹ RAS Geological Institute. Moscow; e-mail: ndsnomination@mail.ru² Permafrost Institute named after P.I. Melnikov, RAS Siberian Branch, Yakutsk

Abstract. The geocryological situation on the Pavlovsky deposit territory (Southern Island of New Land archipelago) was investigated. Temperatures in boreholes were measured, the rocks and dispersed soils thermal conductivity from well sections was determined. The influence of natural and man-made processes on the temperature regime of permafrost soils has been established. The regime temperature observations data in engineering-geological wells are presented. The forecast of the soil temperature regime for 2040 is proposed according to three scenarios: with the preservation of the present climatic conditions; according to the global warming climate model scenario of the Representative Concentration Pathway with an increase in the average annual air temperature with a trend of 0.8°C/10 years and 1.4°C/10 years.

Key words. New Land, Southern Island of New Land archipelago, Bezymianny bay, Bezymianny river, Pavlovsky deposit, thermal conductivity, the global warming climate.

ВВЕДЕНИЕ. Освоение арктического региона (строительство морских портов, железных дорог, газопроводов, разработка месторождений, возведение промышленно-гражданских объектов и т.д.) сопровождается большим объемом инженерно-геологических изысканий, включающих буровые работы. Уверенное прогнозирование устойчивости грунтов в этих регионах осложняется влиянием прогрессирующего потепления климата и обусловленной этим явлением деградации многолетнемерзлой толщи. Для количественной оценки степени геокриологического риска и моделирования состояния мерзлых грунтов привлекаются данные о литологии, гидрогеологии, грунтоведении, неотектоники и различные модификации геофизических измерений потенциальных полей.

В работе рассматриваются результаты проведения комплексных геотермических работ на территории Павловского месторождения, остров Южный архипелага Новая Земля, включивших геотемпературные измерения в скважинах с целью определения мощности многолетнемерзлых пород, измерения теплопроводности и коэффициента тепловой неоднородности пород керна методом оптического сканирования, а также дан прогноз температурного режима грунтов до 2040 года.

Свинцово-цинковое оруденение в бассейне р. Безымянная на Южном острове Новой Земли было выявлено геологами Западно-Арктической поисково-съёмочной партии ФГУНПП ПМГРЭ Каленичем А.П., Павловым Л.Г. и Загайным А.К. в 1991 г. при производстве опережающих работ по подготовке геохимической основы для ГСР-50 (1990–1992 гг.) [9]

В период с 2000 по 2002 гг. на Павловском рудном поле выполнены поисковые и поисково-оценочные работы (заказчик работ – ОАО «Первая горнорудная компания», исполнитель – ФГУНПП ПМГРЭ). В результате было открыто серебросодержащее свинцово-цинковое месторождение Павловское, в составе которого выделено три блока: Восточный, Центральный и Западный. По экспертным оценкам месторождение «Павловское» занимает пятое место в России по запасам цинка и свинца.

В настоящее время в границах лицензионного участка для обеспечения строительства и эксплуатации месторождения проектируется портовый комплекс. Район проектирования находится в 2–18 км к западу от месторождения, в районе губы Безымянная (эстуарий р. Безымянная) (рис. 1).



Рис. 1
Обзорная карта района исследований:

- 1 – контур схемы расположения района исследований;
- 2 – расположение гидрометеорологических станций, действовавших на арх. Новая Земля со стороны Баренцева моря;
- 3 – расположение гидрометеорологических станций, действовавших на арх. Новая Земля со стороны Карского моря;
- 4 – скважины с термометрическими наблюдениями;
- 5 – скважины на акватории

Губа Безымянная расположена на Южном острове архипелага Новая Земля, в его юго-западной части, между мысом Нордершельда и находящимся в 6 км к СВ от него мысом Крутой. Южный берег губы на участке длиной 4 мор. мили от мыса Нордершельда образован скалистыми обрывами. Вглубь местности от береговых обрывов тянется терраса; за ней круто поднимаются горы высотой 250–380 м. К востоку от этого участка склоны гор становятся более пологими. Северный берег губы скалистый и обрывистый. Вблизи береговой линии местность заболоченная, а затем рельеф плавно повышается, и в глубине суши поднимаются отроги горы Первоусмотренная. Южный и северный берега губы из-

резаны небольшими бухтами, которые разделены мысами, выступающими в губу на незначительное расстояние. На западном краю губы расположен скалистый полуостров Лебедь с обрывистыми берегами в сторону р. Безымянная и Залива Кут Захара. В вершине губы имеется несколько скальных выходов (малый и большой). В эстуарии реки Безымянная появление песчано-галечных островов обусловливается особенностями гидрологического режима и фазами приливно-отливных течений. Берега залива низкие, заболоченные, покрытые тундровой растительностью. В трех км от восточного берега поднимается гора Захара высотой 443 м с крутыми склонами. Южный и северный берега губы приглу-

бы, но окаймлены множеством надводных, осыхающих камней, вершина ее отмеляя. От средней части северного берега губы на 5,3 км к северу отходит отмель с глубинами менее 10 м, в южной части которой наблюдаются буруны [6].

Геологическое строение

В региональном плане исследуемая площадь входит в состав Пайхойско-Новоземельской складчатой системы, формирование которой относится к ранним фазам киммерийского тектогенеза (конец триаса – начало юры). На территории представлены все системы палеозоя – от кембрийской до пермской, включительно.

Они сложены разнообразными по составу и фациальным особенностям осадочными морскими отложениями, а также вулканогенными и вулканогенно-осадочными формациями, играющими подчиненную роль в общем разрезе палеозойских толщ. Видимых угловых несогласий в размещении палеозойских отложений не установлено. Стратиграфические перерывы наблюдаются на границах кембрия и ордовика, а также среднего и верхнего девона. В первом случае из разреза выпадают отложения среднего и верхнего ордовика, во втором – зафиксировано залегание пород верхнего девона на различных горизонтах средне- и нижнедевонских отложений. Интрузивные породы (преимущественно основного состава) представлены двумя разновозрастными комплексами: верхнедевонским и мезозойским. [6].

Геокриологические условия района исследования во многом определяются рельефом и речной сетью. Современный рельеф исследуемой территории формировался в течение MZ-KZ под влиянием эндогенных и экзогенных факторов. Ведущим фактором морфогенеза являются новейшие тектонические блоковые движения различного знака и амплитуды с общей тенденцией воздымания, происходившие на фоне резких колебаний уровня моря и температурного режима, с наложенным воздействием агентов выветривания (экзарация, нивация, эрозия, абразия).

Гидрография

Район работ характеризуется развитой гидросетью. Крупные реки Безымянная и Малая Безымянная имеют протяженность 60 и 30 км, соответственно. Ширина рек колеблется от 50 до 100 м (в нижнем течении р. Безымянной – до 600 м), глубина до 2–2,5 м. Скорость течения от 0,6 до 2 м/с. Горные участки рек обычно каменистые, с перекатами, порожистые. Дно рек песчано-галечниковое или каменистое, берега: то низкие пологие, то высокие обрывистые. Долины рек трогового типа имеют корытообразную форму с шириной днища от 300 м до 1,5 км. Для рек характерен подъем воды на 1–1,5 м во время весенних паводков и осенних дождей. Замерзают реки в середине ноября, а вскрываются в конце июня.

Немногочисленные озера расположены в пределах приморской равнины, в поймах рек Безымянная

и Малая Безымянная, а также в межгорных впадинах в центральной части района. Площадь озер, как правило, не превышает 10 км². Берега озер низкие, иногда заболоченные. Глубина большинства озер небольшая: 1,5–2,0 м. Озера, расположенные в межгорных впадинах, имеют большую глубину (до 30 м). Замерзают озера на 5–10 дней раньше, чем реки, а вскрываются на 1–2 недели позже.

Гидрометеорологические условия

Расположение гидрометеорологических станций, действовавших на архипелаге Новая Земля в разное время, показано на рис. 1.

В настоящее время на архипелаге расположены несколько метеорологических станций Росгидромета, которые включают:

- полярную станцию 1 разряда Малые Кармакулы (Ш -72,4 °С, Д-52,7 °В);
- полярную гидрометеорологическую станцию второго разряда (МГ-2) «Белый Нос» (находится на берегу Баренцева моря у входа в пролив Югорский Шар);
- автоматическую метеостанцию на мысе Желания (северная оконечность архипелага Новая Земля).

В целом гидрометеорологический режим района проектирования изучен недостаточно. Отсутствие регулярных метеорологических наблюдений вынуждает оценивать метеорологический режим по данным двух достаточно удаленных друг от друга метеорологических станций – Малые Кармакулы, м. Столбовой, которые являются ближайшими к району исследования.

Результаты обобщения сведений о гидрометеорологическом режиме района опубликованы в справочных пособиях, перечень которых приведен в списке литературы [1, 2, 5, 11, 12, 13]. Учитывая уровень изученности гидрометеорологического режима, представленное ниже гидрометеорологическое описание следует рассматривать, как предварительное.

Для арктической зоны характерна довольно холодная зима с большой облачностью и частыми, но не интенсивными осадками. Сильные ветры направлены преимущественно с юго-востока и северо-востока.

Поступление теплого воздуха с Атлантического океана обуславливает высокую изменчивость теплового и ветрового режима.

Температура и влажность воздуха.

Температура воздуха на ближайших к району исследования метеорологических станциях приведена в табл. 1.

В среднем в районе изысканий относительная влажность в течение всего года лежит в пределах 80–90% (табл. 2). Во время боты относительная влажность может понижаться до 25%.

Осадки и снежный покров

Сведения о среднемесечном количестве осадков на береговой станции приведены в табл. 3.

Таблица 1

Температурный режим района исследования
Русская гавань

Показатель	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год
Средняя температура, °С	-15,7	-16,3	-17,8	-13,2	-6,1	0,1	4,2	3,7	0,6	-4,4	-10,1	-14,9	-7,6
Абсолютный максимум, °С	3,0	3,0	3,0	3,0	16,0	19,0	23,0	18,0	17,0	9,0	6,0	3,0	23,0
Абсолютный минимум, °С	-43,0	-42,0	-46,0	-36,0	-30,0	-19,0	-12,0	-5,0	-16,0	-27,0	-36,0	-40,0	-46,0

Мыс Столбовой

Показатель	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год
Средняя температура, °С	-13,1	-13,8	-14,7	-10,0	-4,4	1,1	5,6	5,8	2,7	-2,1	-7,3	-11,0	-5,1
Абсолютный максимум, °С	3,0	3,0	3,0	6,0	14,0	21,0	25,0	23,0	19,0	12,0	6,0	6,0	25,0
Абсолютный минимум, °С	-40,0	-39,0	-44,0	-32,0	-23,0	-17,0	-10,0	-2,0	-13,0	-19,0	-32,0	-35,0	-44,0

Таблица 2

Средняя относительная влажность воздуха, %
Русская гавань

Показатель	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год
Средняя	78	76	76	78	79	84	86	85	81	78	78	77	80

Таблица 3

Количество осадков, мм
Мыс Столбовой

Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Год
25	23	23	20	27	42	47	57	71	48	28	26	437

Снежный покров на ГМС «Русская Гавань» наблюдается в среднем 272 дня в году – с 5 сентября по 27 июня, на мысе Столбовой – 244 дня, с 28 сентября по 15 июня, средняя высота снежного покрова в период его максимального развития составляет 30–40 см.

Геокриологические условия

Строение криолитозоны

Криолитозона рассматриваемой территории является сплошной по площади и непрерывной по глубине. Она представлена несколькими этажами.

Верхний этаж – это плащ мерзлых рыхлых четвертичных отложений различного генезиса, в различной степени льдонасыщенных, содержащих текстурообразующие шлиры и прослои льда, а на участках развития полигонального рельефа – вторно-жильный лед (подножья склонов, долины рек, озерные котловины, низкие седловины).

Этаж скальных пород является основным в разрезе криолитозоны. Это преимущественно морозные породы, не содержащие льда за пределами зоны выветривания благодаря зажатости и закрытости трещин вплоть до глубины моря в несколько сотен метров [7].

Третий этаж обычно представляют отрицательно-температурные породы с солеными водами и рассолами (породы, содержащие криопэги).

Этот этаж отсутствует под вершинами и всей верхней частью горных массивов высотой более 200 м, где морозные породы подстилаются положи-

тельно-температурными безводными. Глубже уровня моря в отдельных случаях могут быть вскрыты линзы соленых положительно-температурных вод.

Криопэги. Вследствие особенностей геологического строения и тектонического развития архипелага Новая Земля (дислоцированность крутопадающих пластов и сжатие пород) в его пределах не может иметь место ярус пород с криопэгами, в отличие от Сибирской платформы, сложенной горизонтальными и субгоризонтальными комплексами пород вплоть до кристаллического архейско-протерозойского фундамента. В конкретных же структурно-геологических условиях Новой Земли криопэги могут существовать ниже уровня моря на разновысотных уровнях в виде ограниченных линз, как не сообщающихся между собой, так, возможно, и ограниченно сообщающихся.

Среднегодовая температура пород.

Закономерности изменения среднегодовой температуры пород на глубине распространения годовых температурных колебаний (15–18 м) выявлялись на основе анализа режимных термометрических наблюдения в глубоких скважинах (до 500 м) и по короткопериодным (3–14 дней) наблюдениям в неглубоких (15–40 м) скважинах. Были установлены следующие зависимости:

1. Интервал температурных изменений принят в 2 °С, что вызвано большим диапазоном изменения элементов рельефа от низких к высоким, а именно от -2 – -4 °С до -8 – -10 °С на участках крутых склонов и обрывов.

2. Выделены пять геотемпературных зон для следующих макроэлементов рельефа:

- -2 – -4 °С для долин рек (русел рек с многочисленными рукавами и островами, пойм, озерные котловины, низкие приморские равнины с грубодисперсными отложениями) с отметками рельефа до 100 метров;
- -3 – -5 °С для холмистых предгорных равнин, для средних и пологих склонов горных массивов, для низких и широких седловин с озерами, с отметками рельефа 100-300 м;
- -5 – -7 °С для сглаженных водоразделов на высотах 300–600 м и крутых склонах на высотах 200–600 м (на участках протяженных обрывов среднегодовые температуры на 1–2 °С ниже);
- -7 – -9 °С для сглаженных вершин и привершинных склонов горных массивов на высотах рельефа 600-800 м (для участков альпийских форм рельефа среднегодовые температуры ниже на 1–2 °С вследствие отсутствия снега);
- -9 – -11 °С для сглаженных, резко выпуклых, альпийских форм вершин горных массивов на высотах 800 м и нунатаков возвышающихся пикообразно среди ледниковых покровов на высотах 700 м и выше.

Границы геотемпературных зон не соответствуют полностью горизонталям рельефа, а только им следуют, опускаясь или поднимаясь по рельефу вследствие суммарного воздействия температуроформирующих факторов.

Глубина сезонного оттаивания

В соответствии с закономерностями формирования и существования температурного режима пород находятся и глубины сезонного оттаивания, диапазон значений составляет в среднем 0,3–1,5 м, что обусловлено положением в рельефе, экспозицией склонов, степенью задернованности поверхности, литологическим составом рыхлых пород и другими причинами. На ряде участков склонов северной экспозиции с высокими абсолютными отметками и в районе развития снежных слоев сезонного протаивания отсутствуют. Протаивание начинается в июне, наибольшего развития достигает в августе и завершается в сентябре.

Максимальная глубина сезонного протаивания во второй половине сентября (по данным бурения) составляет:

- в эстуарии реки Безымянная – 1,5–2,5 м;
- на террасах рек Малая Безымянная и Безымянная – 1,0–2,0 м;
- в нижних и максимально обнаженных от снежного покрова и четвертичных отложений, средних частях склонов, а также на бровках логов – 0,4–1,5 м;
- в верхних частях склонов – до 0,6 м;
- на склонах северной экспозиции на абсолютных высотах выше 200 м – до 1,5 м.

В период конец октября–ноябрь слой протаивания полностью промерзает, причем промерзание происходит как с поверхности, так и с подошвы противояющего слоя.

Льдистость пород

В мерзлом состоянии породы сезонно-талого слоя содержат включения льда в виде горизонтальных прожилков, линз, корок облекания. Льдистость составляет от 5 до 50%, в среднем 15–25 % объема породы.

С увеличением глубины количество льда в породе уменьшается. Криогенная текстура пород слоя сезонного протаивания слоистая, сетчатая, массивная.

Мощность криолитозоны

Положение нулевой изотермы в толще горных пород установлено на Павловском месторождении по данным бурения и геотермическим измерениям по скважине СГ5 глубиной 498,0 м (абс. отметка устья 188,3 м) [7].

Геотермические измерения и анализ теплопроводности в скважине СГ5 свидетельствуют о среднем геотермическом градиенте 17–19 мК/м.

Криогенные физико-геологические процессы и явления развиты не широко. Основные из них: морозное выветривание и сортировка грунтов, солифлюкция, гравитационные процессы, образование наледей.

Наиболее широким распространением пользуются процессы морозного выветривания и сортировка, что выражается в накоплении обломочного материала и развитии полигональных форм микро-рельефа (пятна-медальоны, каменные кольца, многоугольники), наблюдаемые на выпуклых участках поверхности. На склонах крутизной более 3–4° доминируют процессы солифлюкции. Наблюдается полосчатость, обусловленная вязкопластичным течением грунтов. На крутых склонах отмечаются солифлюкционные оплывины.

Термометрические работы

На исследуемой территории пробурено 18 инженерно-геологических скважин, в 10 из которых были проведены термометрические работы. Отбор проб для определения теплофизических свойств грунтов проводился во всех скважинах с интервалом 2–4 м, но не менее одной пробы на инженерно-геологический элемент (ИГЭ).

Термометрические скважины были специально оборудованы герметичными сухими колоннами. Для измерения и регистрации значений температуры грунтов в скважинах использовался информационно-регистрирующий комплекс «KrioLab (логгер, термокоса).

Наблюдения за температурой по термокосам в скважинах продолжались от 7 до 14 дней. За это время было произведено в разных скважинах от 3 до 10 температурных наблюдений вдоль ствола скважин. В результате повторных измерений были определены фоновые температуры, близкие к равновесному режиму.

По всем скважинам ниже глубин 1–2 м были получены отрицательные температуры. Исключением являлась только скважина № 34. (рис. 2).

Глубина, м	Скв 10	Скв 22	Скв 32	Скв 35	Скв 38	Скв 39	Скв 45	Глубина, м	Скв 25	Скв 33	Скв 34
0,0	5,26	4,72	3,88	2,64	16,69	10,43	2,43	0,0	1,74	1,67	4,48
1,0	-0,04	0,4	-0,76	0,16	3,4	5,02	1,52	0,5	0,27	2,41	4,87
2,0	-0,41	-1,05	-1,71	-1,21	-0,07	0,11	-0,32	1,0	-0,54	1,61	4,30
3,0	-1,11	-1,01	-1,74	-1,59	-0,61	-0,1	-0,6	1,5	-0,89	-0,18	3,48
4,0	-1,56	-0,95	-1,01	-1,82	-1,08	-0,19	-0,58	2,0	-1,22	-0,64	3,41
5,0	-1,91	-0,92	-0,48	-2,03	-1,47	-0,99	-0,54	2,5	-1,47	-0,94	3,47
6,0	-2,1	-0,89	-0,86	-2,01	-1,76	-1,49	-0,47	3,0	-1,55	-1,05	3,57
7,0	-2,36	-0,99	-1,75		-2,03	-1,93	-0,42	3,5	-1,68	-1,07	3,97
8,0	-2,55	-0,98	-1,93		-2,07	-2,22	-0,41	4,0	-1,82	-1,13	4,06
9,0	-2,7	-0,99	-1,66			-2,35	-0,45	4,5	-1,82	-1,20	4,20
10,0	-2,84	-0,99	-1,53			-2,56	-0,45	5,0	-1,98	-1,26	4,13
11,0	-2,75	-1,02	-1,88			-2,67	-0,41	6,0	-2,10	-1,28	4,22
12,0		-1,08	-2,09			-2,57	-0,38	7,0	-2,29	-1,34	4,09
13,0		-1,05	-2,26			-3,01	-0,35	8,0	-2,35	-1,43	4,04
14,0		-1,02	-2,35			-3,16	-0,38	9,0	-2,39	-1,46	3,35
15,0		-1,05	-2,36			-3,01	-0,38	10,0	-2,42	-1,47	2,07
16,0		-1,02	-2,2			-3,37	-0,42	11,0		-1,58	1,83
17,0		-1,02	-2,09			-3,68	-0,45				
18,0		-1,05	-1,69			-3,79	-0,35				
19,0		-1,02				-3,8					
20,0		-0,93				-3,97					
21,0						-4,01					
22,0						-4,01					
23,0						-4,11					
24,0						-4,25					
25,0						-4,23					

Рис. 2
Сводные результаты измерений температур в скважинах

Три скважины (25, 33, 34) были оборудованы под длительные режимные термические наблюдения. По ним были исследованы параметры сезонного оттаивания.

Определение коэффициента теплопроводности горных пород и дисперсных грунтов проводилось по образцам кернового материала методом оптического сканирования (МОС) при помощи установки ТС14, разработанной и сконструированной в лаборатории тепломассопереноса Геологического института РАН (г. Москва) [8].

Установка ТС14 позволяет измерять теплопроводность горных пород в диапазоне 0,2–50,0 Вт/(м·К) с относительной погрешностью не более ±3–5%. МОС способен обнаруживать структурные неоднородности и минералогические микровключения, отличающиеся по теплопроводности от вмещающей породы.

При помощи установки ТС14 были изучены основные теплофизические характеристики пород.

Методика исследований

Для оценки изменений геокриологических условий был использован пакет программ Frost 3D Universal [16] – программный комплекс для моделирования процессов тепломассопереноса в многолетнемерзлых грунтах с учетом влияния внешних тепловых воздействий. Этот комплекс позволяет получать научно-обоснованные прогнозы тепловых режимов ММП в условиях теплового влияния инженерных сооружений, а также реакции ММП на изменения климата.

Математическая модель

Расчет нестационарной задачи распространения тепла в трехмерном пространстве в программе Frost 3D Universal основан на широко апробированном

уравнении теплопроводности (1.1), в котором учтены фазовые превращения и перенос тепла за счет конвекции:

$$\left(C(T) + \rho_b L \cdot \frac{\partial w_w(T)}{\partial T} \right) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(-\lambda(T)\nabla T) + C_w u \nabla T = 0, \quad (1.1)$$

где T – температура, °С; $C(T)$ – зависимость объемной теплоемкости грунта от температуры, Дж/(м³·К); $w_w(T)$ – зависимость количества незамерзшей воды в грунте от температуры; ρ_b – плотность грунта, кг/м³; L – удельная теплота фазового перехода, Дж/кг; t – время, с; $\lambda(T)$ – зависимость теплопроводности грунта от температуры, Вт/(м·К); C_w – объемная теплоемкость воды, Дж/(м³·К); u – вектор скорости фильтрации грунтовых вод, м/с.

В рассматриваемой модели тепломассопереноса при промерзании-протаивании фазовый переход локализован на поверхности раздела фаз (при определенной температуре). Это принято из-за того, что в конкретном рассматриваемом случае, грунты имеют фоновое (нормальное) содержание количества незамерзшей воды, поэтому проводить расчеты процесса промерзания-протаивания в спектре температур не целесообразно.

Для всех имеющихся в моделируемой области типов грунтов и горных пород, а также материалов заданы соответствующие физические и теплофизические свойства. Также для всех используемых в модели условий теплообмена определены параметры граничных условий. За верхнее условие бралось граничное условие третьего рода (теплообмен по Ньютону) (1.2), где необходимо задать зависимость температуры, коэффициента теплообмена, а также, при необходимости, дополнительного теплового потока от времени:

$$n \cdot (\lambda \nabla T) = \alpha(t) \cdot T_{ext}(t) - T + q_0(t), \quad (1.2)$$

где n – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К); T_{ext} – температура внешней среды, °С; T – температура грунта, °С; q_0 – тепловой поток, Вт/м²; t – время, с.

Расчет коэффициента теплопередачи (α) между поверхностью грунта и атмосферой, в зависимости от скорости ветра, осуществляется на основании уравнения Д.А. Куртнера и А.Ф. Чудновского [3].

Моделирование фильтрации грунтовых вод в программе Frost 3D Universal основано на широко апробированном уравнении фильтрации грунтовых вод (1.3), выведенном из закона Дарси [4]:

$$\nabla \cdot (-K\nabla H) = 0, \quad (1.3)$$

откуда вектор скорости фильтрации воды в грунте вычисляется по формуле (1.4):

$$u = -K\nabla H, \quad (1.4)$$

где H – гидравлический напор, м; K – коэффициент фильтрации, м/с; u – вектор скорости фильтрации воды. В качестве гидрологического граничного условия доступно следующее: – величина гидравлического напора, которая вычисляется по формуле (1.5):

$$H = H_{ext}(t), \quad (1.5)$$

где H_{ext} – скорость втекающего потока, м/с.

Решение уравнения теплопроводности в трехмерной постановке осуществляется численно с помощью явного метода конечных разностей [15]. Конечно-разностный метод является сеточным методом, т.е. расчетная область дискретизируется гексаэдрической сеткой, а решение происходит непосредственно в узлах сетки, для каждой из которых составляется разностное уравнение в соответствии с используемым шаблоном разностной схемы. Получается система линейных уравнений, решение которой позволяет получить необходимый результат в рассматриваемой расчетной области

Исходные данные

Термическое состояние грунтов определяется, в первую очередь, воздействием гидрометеорологических факторов, а также их сезонной, годовой и многолетней изменчивостью. При осуществлении прогнозных оценок необходимо ввести ряд дополнительных условий, среди них более корректное задание верхних граничных условий (оценка внутри-годового и многолетнего хода характеристик климата) [10]. В качестве параметров внешней среды были использованы усредненные за последние 10 лет метеорологические данные по станциям Малые Кармакулы и м. Столбовой (табл. 4):

- температура воздуха;
- коэффициент теплообмена, которая рассчитывалась по скорости ветра;
- снежный покров.

Для расчета рассматривалась область шириной 2420 м и высотой 33 м (рис. 3), которая строилась по профилю пробуренных инженерно-геологических скважин 35-34-33-25-22-45 (см. рис. 1). Для физических и теплофизических параметров грунтов использовались значения лабораторных испытаний образцов и справочные данные (табл. 5). Начальное распределение температуры грунтов для расчетного профиля представлено на рис. 2.

Расчет динамики температурного поля грунта проводился по трем сценариям до 2040 года:

I – с сохранением настоящих климатических условий;

II – по сценарию климатической модели глобального потепления Representative Concentration Pathway 2.6 (далее RCP 2.6) – повышение среднегодовой температуры воздуха с трендом 0,8 °С/10 лет;

III – по сценарию глобального потепления Representative Concentration Pathway 8.5 (далее RCP 8.5) – повышение среднегодовой температуры воздуха с трендом 1,4 °С/10 лет.

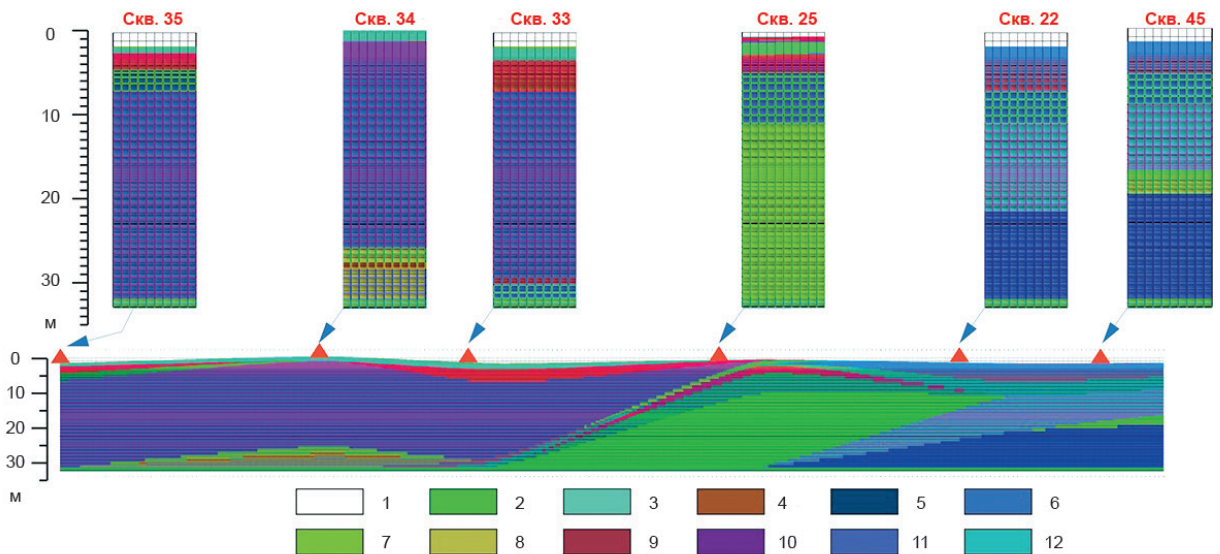


Рис. 3
Расчетная область

1 – атмосфера; со 2 по 12 – инженерно-геологические элементы

Таблица 4

Среднемесячные метеорологические данные

Месяц	Температура воздуха, °С	Коэффициент теплообмена, Вт/(м ² ·К)	Снежный покров	
			Высота, м	Плотность, кг/м ³
Январь	-14,1	43,8	0,4	270
Февраль	-14,6	44,8	0,5	300
Март	-13,8	42,0	0,6	320
Апрель	-9,8	37,9	0,7	350
Май	-4,0	33,7	0,3	450
Июнь	1,9	32,6	0	0
Июль	7,0	30,2	0	0
Август	6,5	31,0	0	0
Сентябрь	3,4	33,3	0	0
Октябрь	-2,3	37,2	0	0
Ноябрь	-7,9	40,1	0,2	200
Декабрь	-11,4	43,4	0,3	250

Таблица 5

Физические и теплофизические свойства грунтов

№ ИГЭ	Описание грунта	Плотность, кг/м ³	Влажность, %	Теплопроводность, Вт/(м·К)		Объемная теплоемкость, кДж/м ³ ·К	
				Т	М	Т	М
1	Мохо-растительный слой	180	50	0,29	0,6	4000	2000
2	Песок мелкий	1460	28,5	1,6	3,1	2850	1970
3	Гравийный грунт	2020	6,3	1,7	2,2	2100	1980
4	Песок пылеватый	1630	20,4	1,6	2,8	2620	1930
5	Песок средней крупности	1700	16,2	1,6	2,4	2440	1860
6	Суглинок, мягкопластичный	1880	31,4	1,45	1,7	4130	2890
7	Песок гравелистый	1850	9,4	1,65	2,1	2120	1760
8	Песок мелкий	1680	18,1	1,8	2,7	2540	1900
9	Дресвяный грунт	2000	9	1,3	1,6	2150	1940
10	Суглинок, полутвердый	1560	24,2	1,3	1,8	2950	2160
11	Алевролит	2440	0,6	1,95	2,1	1660	1480

Примечание: Т – талое состояние; М – мерзлое состояние

Результаты расчетов

Скважина 34 расположена в эстуарии ручья. Следовательно, грунты имеют положительные температуры, и под влиянием воды подвержены минимальному температурному перепаду в течение года. На основании этого в расчетах по трем сценариям изменения не происходят.

По результатам расчетов в скв. 35 на 2022 год глубина сезонно-талого слоя (СТС) составляет порядка 0,5 м, среднегодовая температура пород по стволу изменяется от -0,05 до -1,92 °С (рис. 4, а). При сценарии сохранения настоящих климатических условий на 2040 год отмечается повышение среднегодовой температуры пород на 0,01–0,32 °С, при этом глубина СТС остается неизменной (рис. 4, б). Это объясняется стабилизацией в расчетной области на первые 1–3 года начальной температуры грунтов, которая выбрана на определенную дату замера и имеет неровности в распределении. По другим скважинам расхождения составляют не более 0,2 °С (рис. 5, б; 5, в; 7, б; 8, б).

При условии глобального потепления по сценариям RCP 2.6 и RCP 8.5 среднегодовая температура пород в скв. 35 повышается на 0,52–1,32 °С и на 0,76–2,05 °С, соответственно, при этом глубина СТС увеличится до 1 м (рис. 4, в, г).

В результате изменения климата по сценариям RCP 2.6 и RCP 8.5 глубина СТС в скв. 33 на 2040 год увеличится на 1,5 м при повышении температуры на 0,51–0,71 °С и на 1,4–2,23 °С соответственно (рис. 5).

Тенденция увеличения глубины СТС и повышения температуры грунтов отмечается на расчетах по другим скважинам, так, по скв. 25 изменения температуры составляют по RCP 2.6 на 0,48–0,68 °С и по RCP 8.5 на 0,86–1,32 °С при увеличении глубины СТС на 1,25 м (рис. 6). За 20 лет по расчетам глубина протаивания в скв. 22 увеличится на 0,5 м, а температура грунтов повысится на 0,50–0,70 °С при RCP 2.6 и на 0,90–1,42 °С при RCP 8.5 (рис. 7).

Рис. 4
Температурное поле грунта в скв. 35
a – на 2022 год;
б – на 2040 г. по I сценарию;
в – на 2040 г. по II сценарию;
г – на 2040 г. по III сценарию

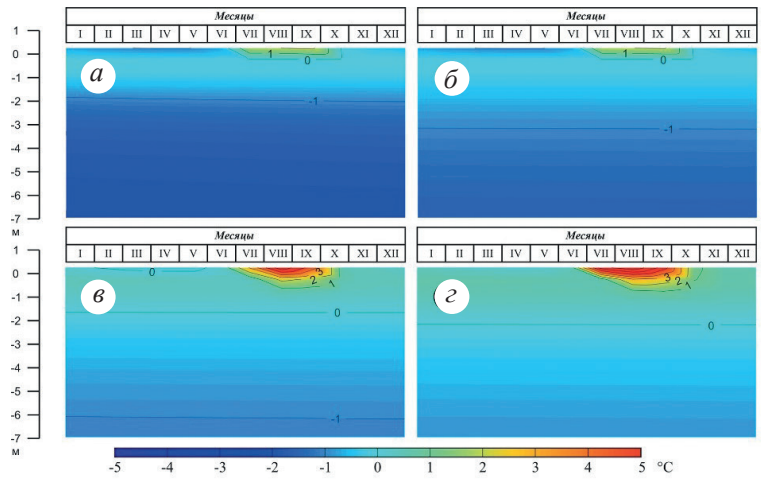


Рис. 5
Температурное поле грунта в скв. 33
a – на 2022 год;
б – на 2040 г. по I сценарию;
в – на 2040 г. по II сценарию;
г – на 2040 г. по III сценарию

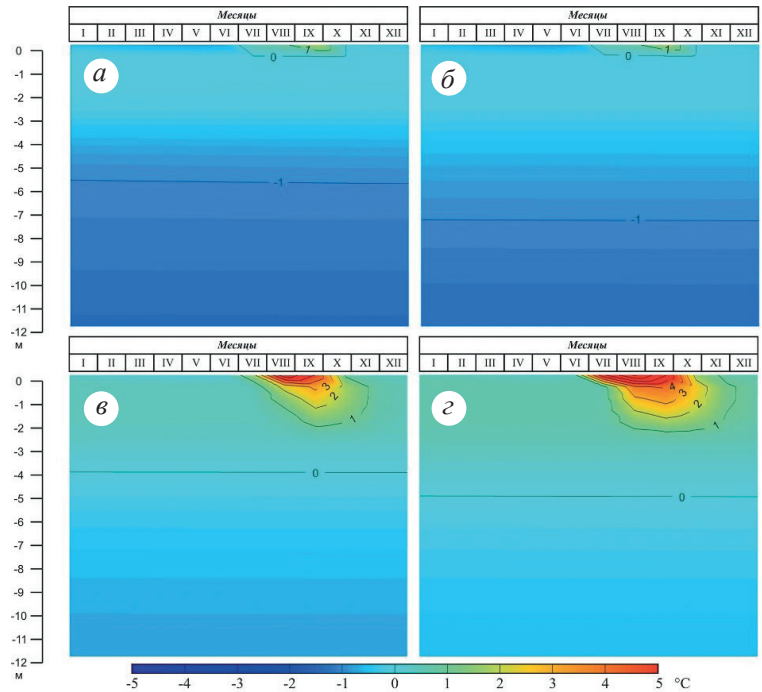
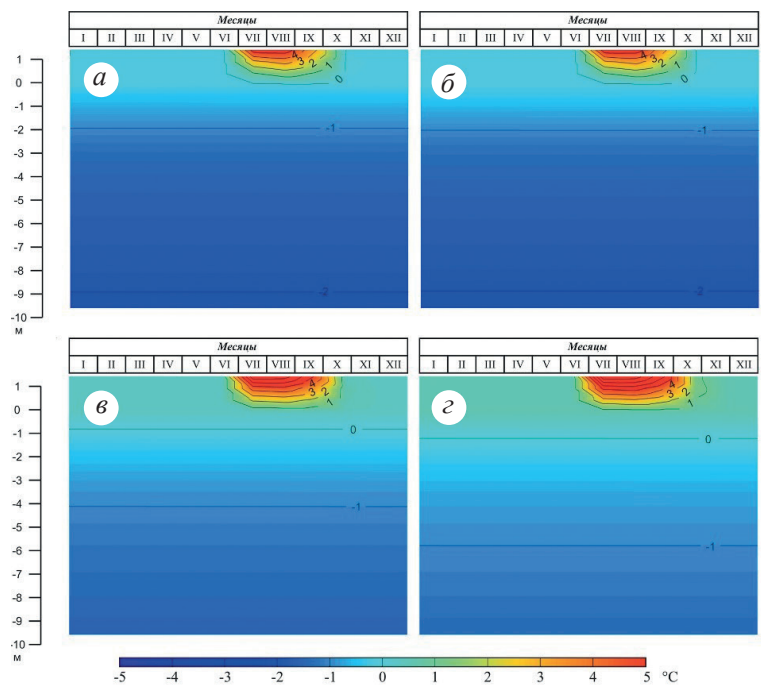


Рис. 6
Температурное поле грунта в скв. 25
a – на 2022 год;
б – на 2040 г. по I сценарию;
в – на 2040 г. по II сценарию;
г – на 2040 г. по III сценарию



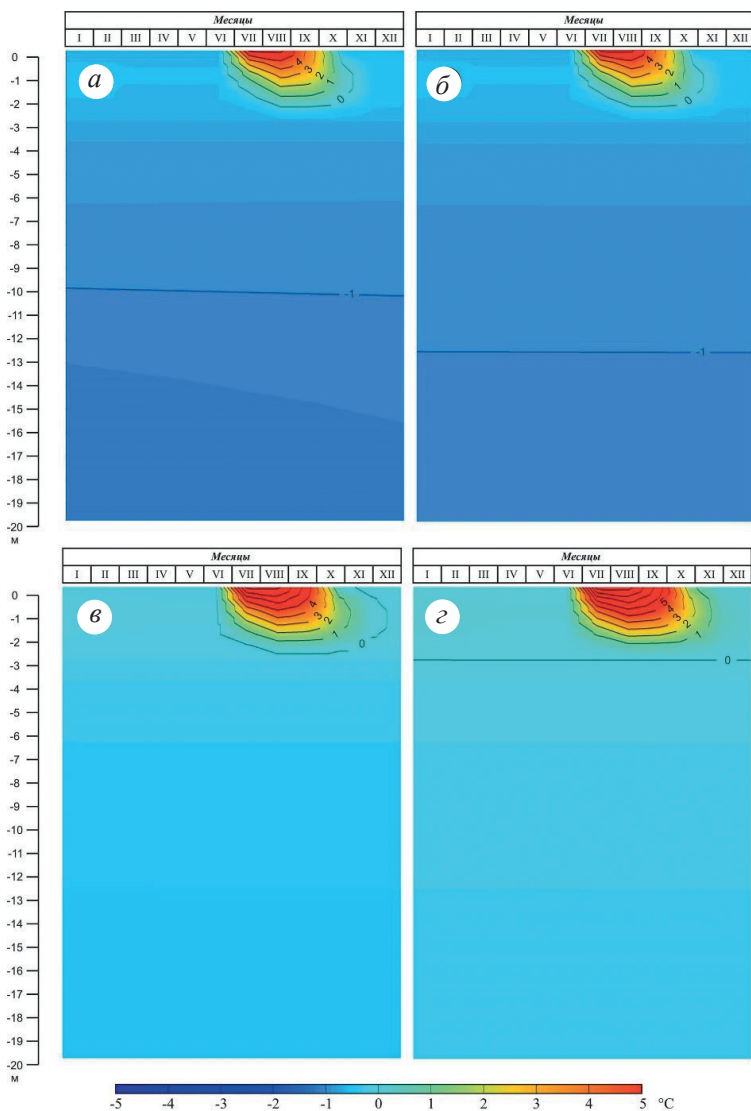


Рис. 7
Температурное поле грунта в скв. 22
 а – на 2022 год;
 б – на 2040 г. по I сценарию;
 в – на 2040 г. по II сценарию;
 г – на 2040 г. по III сценарию

Результаты расчетов демонстрируют значительные изменения в температурном режиме грунтов в скв. 45 при реализации обоих сценариев глобального потепления: при RCP 2.6 на 0,48–0,68 °C и при RCP 8.5 на 0,98–1,47 °C (рис. 8). Вследствие потепления климата глубина протаивания увеличивается и по прогнозным расчетам на 2040 год мерзлота почти исчезнет (рис. 8, в, г).

По итогам прогнозного расчета построены распределения среднегодовых температур грунтов по профилю скважин 35-34-33-25-22-45 (рис. 9). Полученные данные позволяют проводить исследования, связанные с изменениями геокриологических условий в результате оттаивания мерзлых пород. Так к 2040 году при экстремальном сценарии глобального потепления кровля мерзлоты опустится в среднем на 1,5 м, только условия понижения или сохранения существующей среднегодовой температуры воздуха не позволят допустить полную деградацию мерзлоты.

В условиях интенсивно меняющегося климата сложно дать точную оценку геокриологических по-

следствий, так как в разных районах Земного шара характер вечной мерзлоты имеет неравную инерционность в отношении климата. Наш участок исследований относится к районам с высокими темпами климатических изменений, на которые, соответственно, чувствительно реагирует состояние вечной мерзлоты. По результатам исследования можно установить следующие выводы:

- при экстремальном изменении климата температура пород к 2040 году может повысится на 2,23 °C;
- к концу расчетного времени увеличение глубины сезонного протаивания может достигать 1,5 м;
- до 2040 года кровля мерзлоты может деградировать в среднем на 1,5 м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-05-00054 А и Госбюджетной темы Лаборатории теплопереноса ГИН РАН №122012700311-2.

Рис. 8
Температурное поле грунта в скв. 45
a – на 2022 год;
б – на 2040 г. по I сценарию;
в – на 2040 г. по II сценарию;
г – на 2040 г. по III сценарию

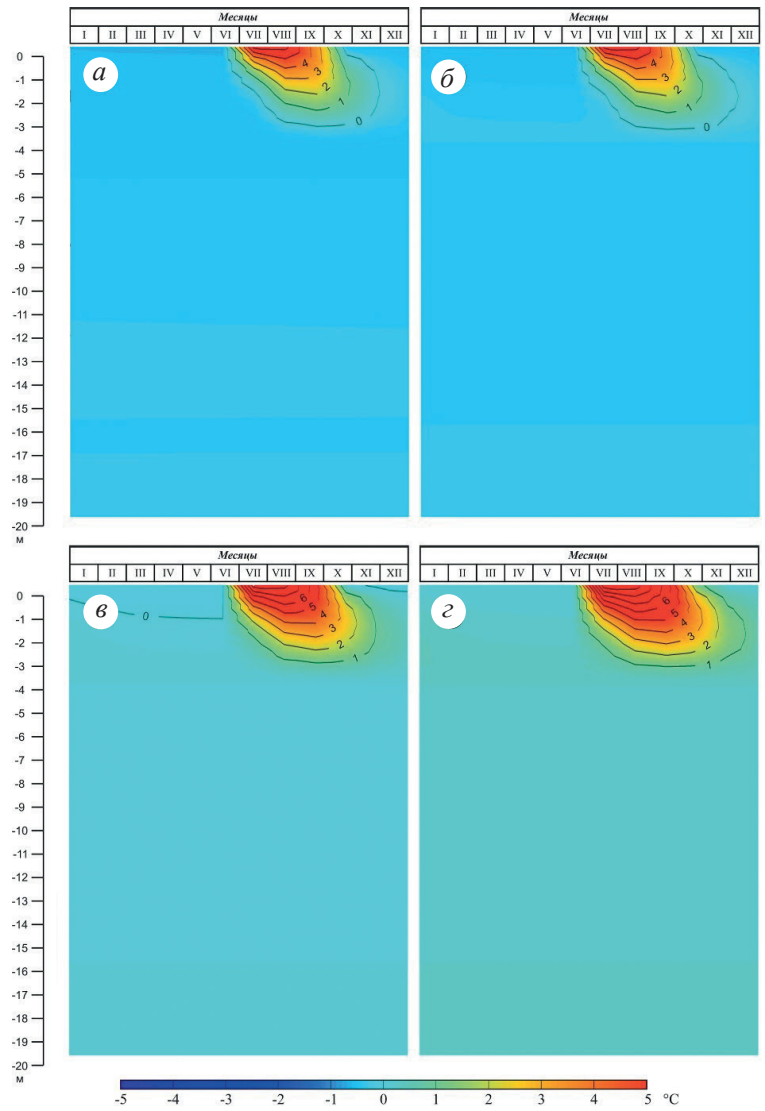
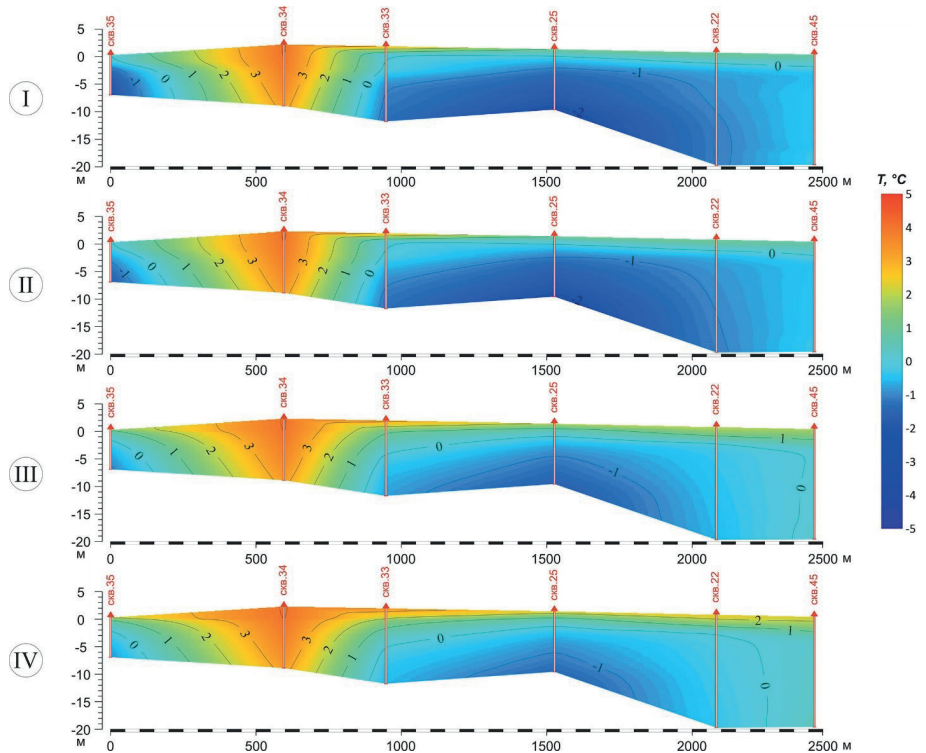


Рис. 9
Распределение среднегодовой температуры грунта по профилю
 I – на 2022 г.;
 II – на 2040 год по I сценарию;
 III – 2040 г. по II сценарию;
 IV – 2040 г. по III сценарию



ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас опасных и особо опасных для мореплавания и рыболовства гидрометеорологических явлений. Норвежское, южная часть Гренландского и Баренцева морей., Изд.ГУНиО МО, 1980, 180 с.
2. Гидрометеорологические условия шельфовой зоны морей СССР, т.6. Баренцево море, вып. 1, 2. Л.: Гидрометеоздат, 1985, 260 с.
3. Куртнер Д.А. Чудновский А.Ф. Расчет и регулирование теплового режима в открытом и защищенном грунте. Л.: Гидрометеоздат, 1969. 239 с.
4. Леонтьев Н.Е. Основы теории фильтрации. М.: Изд-во ЦПИ при механико-математическом факультете МГУ, 2009. 88 с.
5. Лоция Баренцева моря, часть II. От реки Воряма до пролива Карские Ворота и западные берега островов Новая Земля. ГУНиО МО РФ, СПб, 2006г., адм. № 1112, 495 с.,
6. Никитин Д.С., Хуторской М.Д., Шакуро С.В. Геокриологические исследования губы Безымянная архипелага Новая Земля (остров Южный) // Мониторинг. Наука и технологии. 2021. № 2 (48). С. 6-20. DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.48.001>.
7. Никитин Д.С., Хуторской М.Д. Первые измерения теплового потока на архипелаге Новая Земля // Доклады Академии наук. 2018. Т. 478. № 6. С. 692–696.
8. Никитин Д.С., Хуторской М.Д., Никитин А.С. Бесконтактные измерения теплофизических свойств горных пород на установке ТС14 // Процессы в геосредах. 2016. № 3 (7). С. 246–254.
9. Отчет о результатах подготовки геохимической основы для геолого-съемочных работ масштаба 1 : 50000 в бассейне реки Безымянной Новой Земли в 1990–1992 гг. / А.П.Каленич, Л.Г.Павлов, А.К.Загайный и др. СПб-Ломоносов. ПМГРЭ. 1992. 316 с.
10. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Академ. изд-во «Гео», 2008. 229 с.
11. Режимные сведения о волнении Баренцева, Норвежского и Гренландского морей. изд ГУГМС, Мурманск: 1965, 110 с.
12. Справочник по климату Советской Арктики, ч. 2, Л.: изд. ААНИИ, 1974, 120 с.
13. Справочник по климату Советской Арктики, ч. 3, Л.: изд. ААНИИ, 1974, 130 с.
14. Справочные данные по режиму ветров и волнения на морях, омывающих берега СССР. Изд. «Морской транспорт», Ленинград, Регистр СССР, 1962, 154 с.
15. Самарский А.А. Теория разностных схем. 3-е-е изд. Москва: Наука, 1989. 616 с.
16. Специализированный программный комплекс Frost 3D. Сертификат соответствия № РОСС RU.НА36.Н04808, выданный центром сертификации программной продукции в строительстве.

REFERENCES

1. Atlas opasnykh i osobo opasnykh dlia moreplavaniia i rybolovstva gidrometeorologicheskikh javleniy. Norvezhskoe, Yuzhnaia chast Grenlandskogo i Barenzeva morey. Izd. GUNiO MO, 1980. 180 p. (in Russian).
2. Gidrometeorologicheskie uslovia shelfovoy zony morey SSSR, t.6. Barenzevo more, vyp. 1, 2. L., Gidrometeoizdat. 1985. 260 p. (in Russian).
3. Kurtner DA, Chudnovsky AF. Raschet i regulirovanie teplovogo rekhima v otkrytom i zatshitsshennom grunte. L., Gidrometeoizdat. 1969. 238 p. (in Russian).
4. Leontiev NE. Osnovy teorii filtracii. M. Izd. CPI pri mekhaniko-matematicheskome fakultete MGU. 2009. 88 s. (In Russ.)
5. Lociaa Barenzeva moria, chast II. Ot reki Voriema do proliva Karskie vorota i zapadnye berega ostrovov Novaia Zemlia. GUNiO MO RF. SPb. 2006. 495 p. (in Russian).
6. Nikitin DS, Khutorskoy MD, Shakuro SV. Geokriologicheskie issledovaniya guby Bezymiannaia arhipelaga Novaia Zemlia (ostrov Yuzhny). Monitoring. Nauka i tekhnologia. 2021; 2(48): 6–20. DOI: <https://doi.org/10.25714/MNT.2021.48.001> (in Russian).
7. Nikitin D.S., Khutorskoy M.D. Pervye izmereniia teplovogo potoka na arhipelage Novaia Zemlia. Doklady Akademii Nauk. 2018. T.478. N6.s.692-696. DOI: 10.1134/S1028334X18020289 (in Russian).
8. Nikitin DS, Khutorskoy MD, Nikitin AS. Beskontaktnye izmereniia teplofizicheskikh svoistv gornykh porod na ustanovke TS14. Processy v geosredakh. 2016; 3(7): 246–254 (in Russian).
9. Otchet o rezultatakh podgotovki geokhimicheskoy osnovy dlia geologo-s`emochnykh rabot masshtaba 1 : 50000 v basseine reki Bezymianny Novoi Zemli v 1990–1992 gg. (Kalevich A.P., Pavlov L.G., Zagainyi A.K. I dr. SPb-Lo-monosov. PMGRE. 1992. 316 p. (in Russian).
10. Pavlov AV. Monitoring kriolitozony. Novosibirsk: Geo. 2008. 229 p. (in Russian).
11. Rezhimnye svedeniia o volnenii barenceva, Norvezhskogo i Grenlandskogo morey. GUGMS. Murmansk. 1965. 110 p. (in Russian).
12. Spravochnik po klimatu Sovetskoj Arktiki, ch.2. L. AANII. 1974. 120 p. (in Russian).
13. Spravochnik po klimatu Sovetskoj Arktiki, ch.3. L. AANII. 1974. 130 p. (in Russian).
14. Spravochnye dannye po rezhimu vetrov i volneniiu na moriakh, omyvauchikh berega SSSR. Morskoy transport. L. Registr SSSR. 1962. 154 p. (in Russian).
15. SamarSKIY AA. Teoria raznostnykh skhem. 3-d iz-danie. Moscow: Nauka. 1989. 616 p. (in Russian).
16. Specializirovany programnyi kompleks Frost 3D. Sertifikat sootvetstviia N POCC RU. NA 36 H04808.

Положительная рецензия

ОБ АВТОРАХ

НИКИТИН
Дмитрий Сергеевич

Окончил кафедру геофизики Геологического факультета Воронежского Государственного Университета в 2010 году, кандидат геол.-мин. наук (2019). Старший научный сотрудник Геологического института РАН.

Область научных интересов - интерпретация геопотенциальных полей, изучение теплового поля Земли.



ХУТОРСКОЙ
Михаил Давыдович

Окончил Кафедру геофизических методов исследования земной коры Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова в 1970 году, доктор геол.-мин. наук (1992), профессор (1997), Заслуженный деятель науки РФ (2000), автор более 210 научных работ, в том числе, 14 монографий. Главный научный сотрудник Геологического института РАН, заведующий лабораторией теплопереноса.

Научные интересы связаны с изучением теплового поля Земли, процессов геодинамики, природы эндогенных природных катастроф.



КИРИЛЛИН
Анатолий Русланович

В 2011 году закончил физико-технический институт Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Научный сотрудник лаборатории геотермии криолитозоны Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, кандидат

геолого-минералогических наук. Область научных интересов - региональные геокриологические и геотермические исследования, теплоперенос в криолитозоне, влияние различных природных факторов на формирование температурного режима грунтов теплофизические исследования грунтов и горных пород. Автор более 40 опубликованных научных работ.



СИВЦЕВ
Максим Алексеевич

В 2018 году закончил физико-технический институт Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. Ведущий инженер лаборатории геотермии криолитозоны Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН. Область научных интересов - теплоперенос в криолитозоне, влияние различных природных факторов на формирование температурного режима грунтов, теплофизические свойства почв и горных пород.



САМСОНОВА
Олеся Сергеевна

Окончила ФГБОУ ВО «Воронежский Государственный Университет» в 2015 г., по направлению гидрогеология и инженерная геология. На сегодняшний день является аспирантом и младшим научным сотрудником лаборатории теплопереноса геологического института РАН. Научные интересы связаны с изучением теплового поля Земли, инженерной геологии и гидрогеологией.