

УДК 551.345+551.321.8

ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ СУБАЭРАЛЬНЫХ ТАЛИКОВ В РАМКАХ ОДНОМЕРНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА ПРИМЕРЕ РАЙОНА РЕКИ ШЕСТАКОВКА, ЦЕНТРАЛЬНАЯ ЯКУТИЯ

© 2023 г. С. В. Попов^{1,2,*}, А. С. Боронина^{2,3}, Л. С. Лебедева²

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

²Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, Россия

³Государственный гидрологический институт, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: spopov@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.03.2023 г.

После доработки 07.09.2023 г.

Принята к публикации 02.10.2023 г.

На основе математического моделирования и численных экспериментов дана оценка влияния различных факторов на формирование и термический режим субаэральные таликов. Различные модельные сценарии показали, что наибольший вклад в формирование и развитие таликов вносит снежный покров, препятствующий выхолаживанию грунта в зимний период. Наличие напочвенного слоя с определенными теплофизическими параметрами может препятствовать формированию талика. Рассмотрено влияние теплофизических параметров напочвенных покровов на формирование талика.

Ключевые слова: многолетняя мерзлота, субаэральные талики, математическое моделирование, снежный и поверхностные покровы

DOI: 10.31857/S2076673423040130, **EDN:** FQDPWS

ВВЕДЕНИЕ

Районы развития многолетней мерзлоты занимают около 65% территории России, концентрируясь главным образом в Сибири. Намечившаяся в последние десятилетия тенденция к постепенной деградации многолетней мерзлоты, вызванная климатическими изменениями, влияет на термическое состояние почв и грунтов и приводит к весьма пагубным последствиям. Повышение температуры воздуха провоцирует активизацию термокарста и термоэрозии, вследствие чего происходит просадка грунта. Республика Саха (Якутия) – административный регион России, почти полностью расположенный в зоне распространения многолетней мерзлоты. Аналогичные процессы повсеместно происходят и на её территории и зачастую приводят к разрушениям имеющейся инфраструктуры и наносят значительный экономический ущерб.

В настоящее время комплексное изучение многолетней мерзлоты и выявление особенностей её дальнейшего развития – актуальная и насущная задача, стоящая перед отечественной фундаментальной наукой. Понимание этого нашло своё отражение в “Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспе-

чения национальной безопасности до 2035 года”, утверждённой Указом Президента РФ № 645 от 26.10.2020. Во исполнение этого стратегического плана в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) разработана программа формирования сети мониторинга многолетней мерзлоты, которая предусматривает создание 140 пунктов наблюдений, включающих и термометрические скважины.

Среди объектов криолитозоны весьма важное прикладное значение имеют талики и таликовые (талые) зоны. Они представляют собой толщи талых горных пород, которые окружены мерзлотой и существуют непрерывно на протяжении более одного года. Существуют их многочисленные разновидности, изучавшиеся Н.А. Вельминой, Н.Н. Романовским, С.М. Фотиевым и др. Центральная Якутия относится к зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты, где имеются как субаквальные, так и субаэральные талики. В сплошной криолитозоне это единственные пути питания и разгрузки подземных вод. Распространение таликов и их динамика мало изучены, но исследование этих природных феноменов и понимание их развития в современных условиях позволяет лучше понять и спрогнозировать состояние криолитозоны в целом. Изучение

водоносных таликов актуально и для решения прикладных задач, поскольку это перспективные источники воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения, орошения, а также в качестве минеральных лечебно-профилактических вод.

Цель исследования – оценить влияние различных факторов на формирование и термический режим субэкральных таликов на основе математического моделирования и численных экспериментов при разных модельных сценариях.

ОСНОВНЫЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ГРУНТАХ

Вопросами моделирования теплопереноса в многолетнемёрзлых грунтах, эволюции многолетней мерзлоты, а также формирования и развития таликовых зон исследователи занимаются на протяжении длительного времени. Это находит своё отражение во множестве отечественных и зарубежных работ. С конца 1990-х годов, ввиду происходящих климатических изменений, активно создавались модели, позволяющие формировать вертикальное распределение температуры в грунтах для изучения деградации и устойчивости многолетней мерзлоты. Они, как правило, основаны на численном решении одномерного уравнения теплопроводности в многослойной расчётной области. Помимо этого разрабатывались модели, позволяющие исследовать влияние растительного и снежного покрова на распространение тепла (Сосновский, 2006; Сосновский, Осокин, 2018), а также учитывать влияние пожаров (Jafarov et al., 2013; Zhang et al., 2015). В частности, в работе (Сосновский, 2006) представлена модель промерзания–протаивания грунта с произвольным количеством фазовых границ и учётом снежного покрова. В работе (Сосновский, Осокин, 2018) обсуждался вопрос о влиянии мохового покрова (т.е. напочвенного слоя) на распространение тепла в грунте, что также учитывается распределением теплофизических параметров по глубине. В ней же определялось критическое значение его толщины, при котором образуются талики на территории Западного Шпицбергена.

Моделирование скорости развития таликов и вклада адвективного переноса тепла в таяние многолетнемёрзлых пород представлено, в частности, в работе (Rowland et al., 2011). В ней оценивается перенос массы и энергии в пористых проницаемых средах. Отдельно можно выделить работы, посвящённые корректности выбора граничных условий для моделей теплопереноса (Горелик, Паздерин, 2017; Варламов и др., 2017б; Пермяков и др., 2018), что крайне важно для формулировки и решения краевых задач. В фундаментальной монографии (Фельдман, 1973) и других работах этого автора обсуждается вопрос теплопереноса в грунтах. В работе (Фельдман,

1988) рассматривается движение воды в талых и мёрзлых породах. Её достоинство заключается в том, что помимо теоретических выводов, в ней приводятся результаты лабораторных экспериментов.

Анализ публикаций показывает, что имеется множество разрозненных современных моделей, которые удовлетворительно описывают какую-то отдельную сторону процесса теплопереноса в грунтах. К ним относятся, в частности, неустановившаяся фильтрация в пористой среде в случае полного и неполного водонасыщения. Но не менее важен и учёт теплопереноса в снегу, и процессы его уплотнения, приводящие к изменению теплофизических свойств. Имеются модели, описывающие поступление атмосферного тепла в грунт (или в снег), что крайне важно для описания граничных условий. Однако эти современные достижения ещё не до конца применяются для комплексного изучения таликов. Таким образом, в настоящее время имеется достаточно много различных моделей и подходов, которые могут быть взяты за основу для выполнения модельных расчётов.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Участок “Левая Шестаковка” площадью около 1 км² (рис. 1) расположен в бассейне р. Шестаковка, левого малого притока р. Лены, на пологом склоне денудационной равнины с абсолютными отметками 190–210 м. Климат района резко континентальный. Согласно метеорологическим данным, среднегодовая температура воздуха на ближайшей метеорологической станции в г. Якутск за период 1920–2019 гг. составляет –9.5°C. Средняя многолетняя температура января –40.5°C, а июля +19.1°C. Среднегодовое количество осадков с 1920 по 2019 г. составляет 231 мм/год. В работе (Варламов и др., 2017б) представлены данные о межгодовой изменчивости климатических характеристик района г. Якутска за период 1971–2016 гг. Из них, в частности, следует, что за это время максимальная мощность снежного покрова увеличилась примерно с 24 до 33 см. При этом дата его устойчивого установления сместилась с 16–19 октября на 24–29 октября, а схода – с 29–30 апреля на 16–27 апреля. Таким образом, за это время общая продолжительность снежного покрова сократилась на 7–27 дней и составила в среднем 182 суток.

Верхнюю часть геологического разреза до глубины 30 м слагают рыхлые песчаные отложения с редкими прослоями глин. На склонах и водоразделах пески представлены мелко- и среднезернистыми фракциями. Их объёмная влажность в зоне аэрации не превышает 2–8%. Песчаные отложения имеют кварц-полевошпатовый состав с пористостью 33–35% (Лебедева и др., 2019). Это

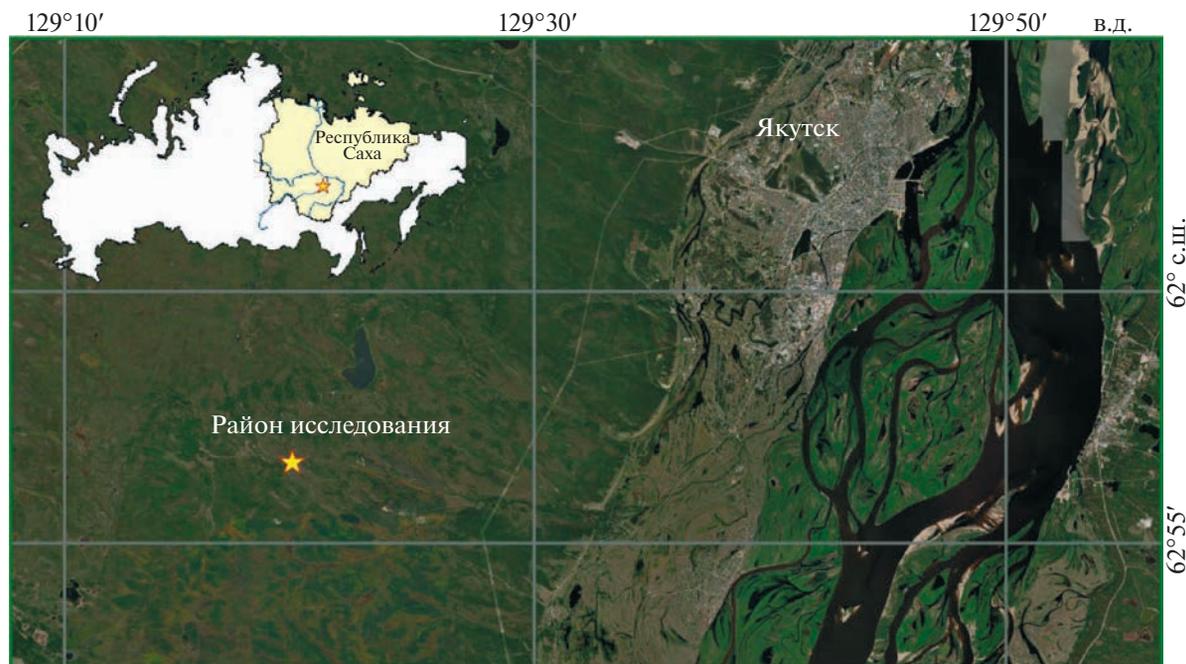


Рис. 1. Схема района работ – участок “Левая Шестаковка” (бассейн р. Шестаковка, левый приток р. Лена).

Fig. 1. Scheme of the research area – the “Left Shestakovka” (the basin of the Shestakovka River, the left inflow of the Lena River).

вполне соотносится с результатами более ранних исследований, согласно которым в целом влажность грунтов варьирует в пределах от 5.3 до 14.5%, а их плотность меняется от 2540 до 2700 кг/м³ (Варламов и др., 2017б). При этом в долинах ручьёв и распадков пески более увлажнённые, и их влажность составляет 15–25% (Варламов и др., 1990). Плотность скелета песчаных отложений варьирует в пределах от 1300 до 1800 кг/м³ (Гаврильев, 1984, 1998). В работе (Шендер и др., 1996) указывается, что, согласно многочисленным исследованиям, в зоне аэрации она составляет в среднем 1700 кг/м³. Песчаные отложения, как правило, перекрыты почвенно-растительным слоем, состоящим из мха, лишайников, дернины и лесной подстилки. Его мощность достигает 30 см. В работе (Гаврильев, 1998) приводятся теплофизические параметры для более десятка видов мхов и почвенно-растительного слоя в целом во влажном и мёрзлом состояниях.

Рассматриваемая территория относится к области развития нестационарных мёрзлых толщ, мощность которых достигает 400–500 м. Температура пород на глубине 100 м составляет –1.0...–0.6°C (Бойцов, 1985), а на подошве слоя нулевых годовых амплитуд в зависимости от ландшафта изменяется от положительных значений (близких к 0°C) до –3...–2°C, и ниже (Варламов и др., 2012). Мощность сезонно-талого слоя изменяется от 0.5 м на марях до 4 м на пологих склонах

и водоразделах, покрытых сосновым лесом (Бойцов, 2002). На правобережной террасе р. Левая Шестаковка по результатам бурения установлен надмерзлотный субаэральный водоносный талик шириной 180–200 м и протяжённостью более 500 м. Согласно геофизическим данным, он имеет сложную конфигурацию и несколько водопродящих рукавов, а его мощность изменяется от 3 до 20 м (Lebedeva et al., 2023). Таким образом, в распоряжении авторов имеются как результаты георадарных съёмки, которые позволяют картировать таликовые зоны (Гагарин и др., 2019; Лебедева и др., 2019), так и описания отобранных в пунктах бурения кернов. Кроме того, на этих участках заложены скважины, в которых выполняется температурный мониторинг и измеряется уровень грунтовых вод (Павлова и др., 2020). Имеются также автоматические метеостанции, которые регистрируют необходимую для моделирования метеорологическую информацию.

ФОРМУЛИРОВКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Первая оценка процессов тепломассопереноса в субаэральных таликах на основе данных натуральных наблюдений была изложена авторами в работе (Попов и др., 2022). В рамках настоящего научного исследования предпринимается попытка сделать следующий шаг и рассмотреть процесс теплопереноса в однородной многослойной сре-

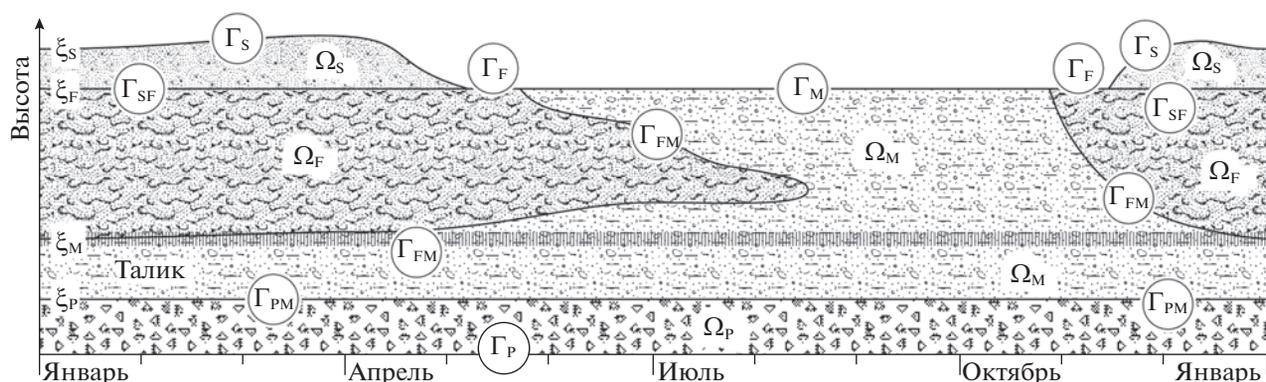


Рис. 2. Изменение верхней части геологического разреза с течением времени Ω_P – многолетнемёрзлые породы; Ω_F – сезонно-мёрзлые породы; Ω_M – талый грунт; Ω_S – снежный покров; Γ_P – нижняя граница расчётной области; Γ_S , Γ_F и Γ_M – верхние границы расчётной области; Γ_{FM} – граница между сезонно-мёрзлыми и талыми породами; Γ_{PM} – граница между талыми породами и многолетнемёрзлыми породами; Γ_{SF} – граница между сезонно-мёрзлыми породами и снежным покровом; ξ_P , ξ_S , ξ_{SF} и ξ_M – положение соответствующих границ Γ_{PM} , Γ_S , Γ_{SF} и Γ_{FM} .

Fig. 2. Change of the upper part of the geological section over time Ω_P – permafrost; Ω_F – seasonally frozen soil; Ω_M – thawed soil; Ω_S – snow cover; Γ_P – lower boundary of the computational domain; Γ_S , Γ_F and Γ_M – upper boundaries of the computational domain; Γ_{FM} – boundary between seasonally frozen and thawed soils; Γ_{PM} – boundary between thawed soil and permafrost; Γ_{SF} – boundary between seasonally frozen soil and snow cover; ξ_P , ξ_S , ξ_{SF} and ξ_M – location of boundaries Γ_{PM} , Γ_S , Γ_{SF} and Γ_{FM} .

де, слои которой могут формироваться и исчезать под влиянием внешних факторов. При этом отдельные границы могут быть границами фазовых переходов. В целом модель базируется на представлениях, изложенных в классической работе (Бойцов, 1985), и результатах комплексных геолого-геофизических исследований (Гагарин и др., 2019; Лебедева и др., 2019). Согласно геологическим данным, приповерхностная часть разреза в районе исследований представлена песчаными отложениями, которые в целом однородны по своему строению (Бойцов, 1985). Небольшие изменения в структуре и вещественном составе значимым образом не сказываются на теплофизических свойствах. Это упрощает модель ввиду того, что границами областей служат не геологические границы, а границы фазовых переходов.

Будем считать талик некоторым горизонтом Ω_M , заключённым между слоями мёрзлого либо мёрзлого и талого грунта. При этом нижний слой многолетнемёрзлых пород Ω_P является полуограниченным. Важно отметить, что с позиций мерзлотоведения талик и вышележащий сезонно-мёрзлый слой представляют собой две разные области. Но поскольку это один и тот же песчаный слой, отличающийся лишь фактом сезонного промерзания, то для математической модели его целесообразно считать единым в том случае, если он находится в талом состоянии. Таким образом, в рамках представленной модели талик и талый сезонно-мёрзлый слои объединены.

В слое сезонно-мёрзлых пород Ω_F в тёплое время года происходит полное или частичное оттаивание, что приводит к образованию талой области Ω_M . С наступлением холодов она промерзает с поверхности, утончается и в конечном итоге исчезает. В холодное время года на поверхности грунта формируется снежный покров Ω_S , мощность которого меняется с течением времени. По мере приближения тёплого сезона она постепенно уменьшается, и в конечном итоге снег полностью стает. Кроме того, за счёт тепла солнечной радиации в дневное время в снегу начинают протекать процессы метаморфизма. Приповерхностный слой снега начинает таять и фильтроваться в толщу. Это постепенно меняет его теплофизические параметры и плотность. Чтобы это учесть, используются эмпирические соотношения для расчёта эффективных значений теплофизических коэффициентов. На рис. 2 представлена концептуальная схема процессов промерзания–протаивания в верхней части геологического разреза в течение года, характерная для тех районов многолетней мерзлоты, где имеются субэаральные талики. Идея её составления основана на данных длительных наблюдений в термометрических скважинах и геофизических исследованиях, выполненных в Центральной Якутии (Бойцов, 1985; Гагарин и др., 2019; Лебедева и др., 2019; Lebedeva et al., 2023), а также теплофизических расчётах (Фельдман, 1973; Сосновский, 2006; Сосновский, Осокин, 2018). Схема иллюстрирует изложенную выше модель.

Приведённое выше описание применительно к одномерной задаче может быть представлено следующей системой дифференциальных уравнений (см. рис. 2):

$$\rho_P c_P \frac{\partial \theta_P}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_P \frac{\partial \theta_P}{\partial z} \right), \quad 0 > z > \xi_P, \quad (1)$$

$$\rho_M c_M \frac{\partial \theta_M}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_M \frac{\partial \theta_M}{\partial z} \right), \quad \xi_P > z > \xi_M, \quad (2)$$

$$\rho_F c_F \frac{\partial \theta_F}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_F \frac{\partial \theta_F}{\partial z} \right), \quad \xi_M > z > \xi_F, \quad (3)$$

$$\rho_S c_S \frac{\partial \theta_S}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_S \frac{\partial \theta_S}{\partial z} \right), \quad \xi_F > z > \xi_S. \quad (4)$$

где ξ_P, ξ_S, ξ_F и ξ_M – положение соответствующих границ $\Gamma_{PM}, \Gamma_S, \Gamma_{SF}$ и Γ_{FM} (см. рис. 2).

В уравнения (1) – (4) входят температуры θ и коэффициенты теплопроводности λ , удельной теплоёмкости c и плотности ρ . Здесь и далее индексы S, F, M и P относятся к снежному покрову, мёрзлому и талому грунтам и многолетнемёрзлым породам. Указанные параметры зависят от влажности (льдиистости), плотности и ряда других факторов (Гаврильев, 1984, 1998) и, следовательно, изменяются по глубине. Эти коэффициенты определяются эмпирическими соотношениями, о которых будет сказано ниже. Начало координат для расчётов расположено в слое многолетнемёрзлых пород на глубине 10 м. Для моделирования района бассейна реки Шестаковка (см. рис. 1) это обосновывается температурным профилем (Бойцов, 1985, 2002; Варламов и др., 2012; Лебедева и др., 2019) и геологическим разрезом (Варламов и др., 2017б; Лебедева и др., 2019). Ось аппликата (высот) направлена вертикально вверх (см. рис. 2). Нижняя часть расчётной области совпадает с началом координат.

Формулировка краевой задачи требует наличия начальных и граничных условий. Настоящее научное исследование посвящено выявлению факторов, влияющих на формирование таликов. К ним относятся: наличие и отсутствие снежного покрова и напочвенного слоя с разными теплофизическими параметрами, а также различная влажность грунта. Для каждого сценарного расчёта приводятся свои значения.

Распределение плотности грунта по всему разрезу, вне зависимости от его состояния (талый или мёрзлый), задавалось постоянным, $\rho_f(z) = \rho_M(z) = \rho_P(z) = 2650 \text{ кг/м}^3$. Неизменность этой величины обусловлено задачами исследования: выявлением основных факторов, влияющих на формирование таликов. Как указывалось выше, плотность грунта варьирует в широких пределах и, конечно, зависит от влажности. Однако, на

взгляд авторов, изменение плотности внесёт не нужные вариации в результат вычислений. Всё же теплофизические параметры грунта, как будет показано ниже, рассчитываются исходя из его влажности и плотности скелета.

Обычно на нижней границе задаётся некоторая величина геотермического потока, что вполне обосновано с геологических позиций. Она зависит от строения земной коры и определяется по температурному градиенту в скважинах либо путём моделирования на основе геофизических данных. Однако для решения поставленной задачи было выбрано условие первого рода, т.е. температура θ_P на нижней границе Γ_P . Согласно многолетним данным, температура θ_P в районе р.

Шестаковка составляет около $\bar{\theta}_{PE} = -0.6^\circ\text{C}$ в слое многолетнемёрзлых пород (Бойцов, 1985; Варламов и др., 2017а; Лебедева и др., 2019; Lebedeva et al., 2022). Это связано с тем, что мощность многолетнемёрзлых пород составляет около 0.5 км. Мы же будем искать решение для верхней части геологического разреза на первые десять метров от дневной поверхности (именно на нижней границе и задаётся значение $\bar{\theta}_P$ в ходе практической реализации модели).

Границы между мёрзлыми и талыми областями Γ_{FM} и Γ_{PM} (см. рис. 2) подвижные. Изменение их положения во времени подчиняется условию Стефана. На неподвижной границе Γ_{SF} зададим условие IV рода (сшивки), которое предполагает сохранение величины теплового потока и равенство температур снега и грунта на этой границе. Следует отметить, что области Ω_S, Ω_F и Ω_M могут вырождаться с исчезновением соответствующих границ, но это учитывается на этапе численной реализации модели.

На дневной поверхности (т.е. на Γ_S, Γ_M и Γ_P) обычно задаётся условие теплообмена со средой (III рода). Обсуждению этого вопроса посвящено множество публикаций, в частности, (Фельдман, 1973, 1988; Павлов, 1979; Осокин и др., 1999), а также (Сосновский, 1984, 2006; Пермяков и др., 2018). Однако в работе (Шендер и др., 1996) приводится соотношение для температуры на дневной поверхности снега и грунта для района г. Якутска. Оно получено на основе результатов мониторинга температур дневной поверхности с учётом радиационных поправок к местным условиям. Если τ_S и τ_W – это продолжительность летнего и зимнего периодов, для которых характерно установление стабильных положительных и отрицательных температур, а $\theta_{\Sigma S}$ и $\theta_{\Sigma W}$ – суммарные поверхностные температуры для этих периодов,

то температура дневной поверхности θ_0 может быть аппроксимирована следующим образом:

$$\theta_0(t_D) = \begin{cases} \theta_{\Sigma W} \frac{\pi}{2\tau_W} \sin \left[\frac{\pi t_D}{\tau_W} \right], & \text{зимний период} \\ \theta_{\Sigma S} \frac{\pi}{2\tau_S} \sin \left[\frac{\pi(t_D - \tau_{WI})}{\tau_S} \right], & \text{летний период} \end{cases} \quad (5)$$

где t_D – день года от начала зимы; τ_Y – продолжительность одного календарного года; $\tau_Y = 365.2425$ суток; $\tau_{SU} + \tau_{WT} = \tau_Y$; $\theta_{\Sigma S} = 52000^\circ\text{C} \cdot \text{час}$; $\theta_{\Sigma W} = -135000^\circ\text{C} \cdot \text{час}$ (Шендер и др., 1996). Согласно (5), минимальная температура в зимний период составляет -41.5°C , а максимальная в летний период 22.4°C .

Вышеизложенное представимо следующими уравнениями, описывающими граничные условия рассматриваемой модели:

$$\begin{aligned} \lambda_F \frac{\partial \theta_F}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{FM}} - \lambda_M \frac{\partial \theta_M}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{FM}} &= q_I \rho_I \omega \frac{d\xi_M}{dt} \Big|_{\Gamma_{FM}}, \\ \theta_F \Big|_{\Gamma_{FM}} &= \theta_M \Big|_{\Gamma_{FM}} = \theta_{IW}; \\ \lambda_P \frac{\partial \theta_P}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{PM}} - \lambda_M \frac{\partial \theta_M}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{PM}} &= q_I \rho_I \omega \frac{d\xi_P}{dt} \Big|_{\Gamma_{PM}}, \\ \theta_P \Big|_{\Gamma_{PM}} &= \theta_M \Big|_{\Gamma_{PM}} = \theta_{IW}; \\ \lambda_S \frac{\partial \theta_S}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{SF}} &= \lambda_F \frac{\partial \theta_F}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{SF}}; \quad \theta_S \Big|_{\Gamma_{SF}} = \theta_F \Big|_{\Gamma_{SF}}; \\ \theta_P \Big|_{\Gamma_P} &= \bar{\theta}_{PE}; \quad \theta_0 \Big|_{\Gamma_S} = \theta_0(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где q_I – удельная теплота плавления льда; $q_I = 332$ кДж/кг; ρ_I – его плотность; ω – весовая влажность (льдиность) грунта; θ_P , θ_F , θ_M и θ_S – температуры многолетнемёрзлых, сезонно-мёрзлых, талых пород и снега; θ_{IW} – температура фазового перехода. В нашем случае она постоянна и составляет $\theta_{IW} = 0^\circ\text{C}$.

В работе (Шендер и др., 1996) приводится соотношение, описывающее изменение мощности снежной толщи H_S в зимний период. Эта зависимость характеризуется постепенным нарастанием и достаточно резким спадом. Время достижения максимума мощности снежного покрова $\tau_{S\text{MAX}}$ определяется в 182.5 суток при общей продолжительности зимнего периода τ_{WI} в 213 суток. Это соотношение выглядит следующим образом. Если h_{MAX} – это максимальная мощность снежного покрова, то

$$H_S(t_D) = \begin{cases} h_{\text{MAX}} \left[\frac{t_D}{\tau_{S\text{MAX}}} \right]^{0.3}, & t_D < \tau_{S\text{MAX}} \\ h_{\text{MAX}} \left[1 - \left(\frac{t_D - \tau_{WI}}{\tau_{WI} - \tau_{S\text{MAX}}} \right)^{1.6} \right], & t_D \geq \tau_{S\text{MAX}} \end{cases} \quad (7)$$

В той же работе приводится эмпирическое соотношение для плотности снега ρ_S в зависимости от высоты снежного покрова:

$$\rho_S(t_D) = \begin{cases} 110 + 200 \frac{H_S(t_D)}{h_{\text{MAX}}}, & t_D < \tau_{S\text{MAX}} \\ 310, & t_D \geq \tau_{S\text{MAX}} \end{cases} \quad (8)$$

В (7) и (8) время t_D выражено в сутках, а остальные величины – в единицах СИ. Графики, построенные по формулам (7) и (8), представлены на рис. 3.

Среди множества научных публикаций отметим работу (Осокин и др., 1999), в которой приводится обзор моделей, описывающих коэффициент теплопроводности снега λ_S в зависимости от его плотности ρ_S . В ней, в частности, приводится соотношение, успешно используемое в расчётах как для территории России, так и для Шпицбергена (Осокин и др., 1999; Сосновский, 2006):

$$\lambda_S = 9.165 \times 10^{-2} - 3.814 \times 10^{-4} \rho_S + 2.905 \times 10^{-6} \rho_S^2 \quad (9)$$

Эта зависимость представлена на рис. 4. Размерность величин приводится в единицах СИ. В этих публикациях удельная теплоёмкость снега c_S принята равной $c_S = 2100$ Дж/(кг · °C). Соотношение (9) и указанное значение c_S приняты для моделирования.

Согласно результатам кернового бурения, геологический разрез в районе исследований достаточно однороден и представлен в основном песчаными отложениями с незначительными прослойками суглинка и супеси (Лебедева и др., 2019). Имеется ряд публикаций, в которых приводятся экспериментальные данные по определению теплофизических коэффициентов, например, (Варламов и др., 20176) и многие другие. Однако наиболее масштабной работой является монография (Гаврильев, 1998), в которой достаточно детально рассматривается этот вопрос применительно к обширной территории Северо-востока России, включая Якутию и восточную часть трассы БАМа. В ней и в более ранней публикации этого автора (Гаврильев, 1984) приводятся обобщённые эмпирические соотношения теплофизических коэффициентов для грунтов. В ней, в частности, приводятся эмпирические соотноше-



Рис. 3. Зависимость высоты снега и его плотности от времени: 1 – высота снежного покрова; 2 – средняя плотность снежного покрова.

Fig. 3. Time dependence of snow thickness and density: 1 – snow thickness; 2 – average density of snow cover.

ния для теплофизических параметров песчаных отложений, которые развиты в бассейне р. Шестаковка. Коэффициенты теплопроводности мёрзлых и талых песчаных отложений λ_F и λ_M в зависимости от весовой влажности ω могут быть представлены как

$$\begin{aligned} \lambda_M &= 0.23 + 1.65 \lg 100\omega, & \omega \geq 0.05, \\ \lambda_F &= \lambda_M (0.66 + 4.13\omega), & \omega \geq 0.05. \end{aligned} \quad (10)$$

Эти кривые также показаны на рис. 4. Объёмная теплоёмкость является величиной аддитивной по отношению к теплоёмкостям своих компонентов и может быть рассчитана по формулам, представленным, в частности, в работе (Гаврильев, 1984):

$$\begin{aligned} c_M &= (c_{SK} + c_W \omega) \rho_{SK}, \\ c_F &= (c_{SK} + c_I \omega) \rho_{SK}, \end{aligned} \quad (11)$$

где c_{SK} – коэффициент теплоёмкости скелета (для песчаных отложений $c_{SK} = 693$ Дж/(кг · °К); ρ_{SK} – плотность его скелета (т.е. плотность его минеральной основы). Как указывалось ранее, плотность скелета песчаных отложений варьирует в пределах от 1300 до 1800 кг/м³. Мы выбрали значение $\rho_{SK} = 1700$ кг/м³ (Шендер и др., 1996). Эти уравнения состояния взяты за основу при моделировании. Все значения, входящие в соотношения (10) и (11), даны в единицах СИ.

Как указывалось выше, почвенно-растительный покров перекрывает слой песчаных отложений. Его мощность различна и варьирует от полного отсутствия до 30 см (Гаврильев, 1998). Имеется большое количество работ, в частности, (Гаврильев, 1998; Тишков и др., 2013; Угаров, Ефремов, 2022) и множество других, посвящённых

теплофизическим свойствам различных мхов, которые составляют основу этого слоя. В своих расчётах авторы воспользовались соотношениями для мха *Sanionia uncinata*, повсеместно развитого в Северном полушарии, включая Якутию. Они представлены в работе (Тишков и др., 2013). Для мха весовой влажностью (льдиистостью) ω , выраженной в относительных единицах, теплофизические параметры для талого и мёрзлого состояния выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned} \lambda_{MM} &= 0.05\omega + 0.0946, \\ \lambda_{MF} &= 0.23\omega + 0.0946, \\ c_{MM} &= (c_{SK}m_{SK} + c_W m_W) / (m_{SK} + m_W), \\ c_{MF} &= (c_{SK}m_{SK} + c_I m_I) / (m_{SK} + m_I), \end{aligned} \quad (12)$$

где m_{SK} , m_W и m_I – масса скелета куртины мха, воды и льда соответственно. Зависимость λ_{MF} и λ_{MM} от W показана на рис. 5. В (12) все значения даны в единицах СИ. В работе (Тишков и др., 2013) приводится соотношение только для расчёта теплоёмкости мха во влажном состоянии, но поскольку эта величина аддитивная, то её вычисление для мёрзлого состояния производится путём замены теплоёмкости воды на теплоёмкость льда, что и было сделано в последнем выражении (12).

Таким образом, мы сформулировали модель субэкрального талика в наиболее общем виде. Помимо этого, привели материальные уравнения, описывающие теплофизические параметры как для наиболее общего случая, так и для грунтов Центральной Якутии.

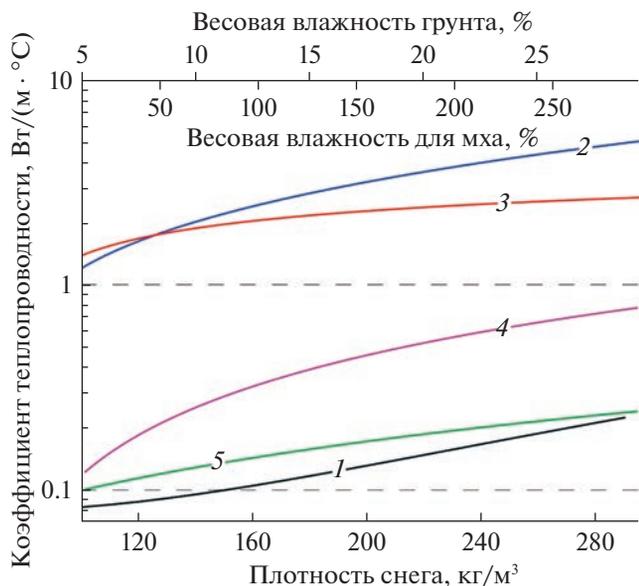


Рис. 4. Зависимость коэффициента теплопроводности снега, напочвенного слоя (мох *Sanionia uncinata*) и песчаных отложений в мёрзлом и талом состоянии от плотности и влажности (льдиности): 1 – снег; 2 – песчаные отложения мёрзлые; 3 – песчаные отложения талые; 4 – напочвенный слой мёрзлый; 5 – напочвенный слой талый.

Fig. 4. Dependence of the thermal conductivity coefficient of snow, soil-vegetative layer (moss *Sanionia uncinata*) and sand sediments in frozen and thawed state on density and humidity (iciness): 1 – snow; 2 – frozen sand sediments; 3 – thawed sand sediments; 4 – frozen soil-vegetative layer; 5 – thawed soil-vegetative layer.

ЧИСЛЕННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ

Представленная в предыдущем разделе задача решалась численно. Для её реализации была использована неявная конечно-разностная схема с переменным шагом по глубине и последующим применением метода прогонки. Компьютерная

программа разработана на языке Delphi для ОС MS Windows 11. В качестве компилятора использовался пакет Embarcadero Delphi 10.4 Sydney (Embarcadero Technologies, Inc., USA). Блок-схема алгоритма компьютерной программы представлена на рис. 5.

Сложность программной реализации заключалась в решении многофронтальной задачи Стефана ввиду того, что новые слои как формировались, так и исчезали динамически под влиянием внешних условий. Это было реализовано посредством специально разработанного алгоритма. Суть его заключается в том, что после решения краевой задачи для всех имеющихся сред полученный результат анализируется. В том случае, если между двумя слоями имеется третий, размеры которого меньше некоторого значения, равного 1 мм, слои объединяются. При этом выполняется линейная интерполяция значений температуры объединённых слоёв в один, поскольку количество точек для объединённого слоя удвоилось. Если слой является первым или последним, то он просто уничтожается, и на его толщину увеличивается толщина соседнего слоя. В том случае, если, наоборот, требуется появление нового слоя, то он формируется в виде массива задаваемого размера. В нашем случае он составлял 500 точек, что обеспечивало приемлемое соотношение скорости расчётов и пространственного разрешения. При этом распределение температуры в формируемом слое соответствует линейной зависимости между температурами на границах соседних областей. Если формируется слой, который является первым или последним, то его температура также интерполируется, исходя из граничных условий.

Однако формирование и исчезновение слоёв усложняет модель не только в алгоритмическом плане. При формировании (или исчезновении) слоёв происходят скачки, связанные с дискретно-

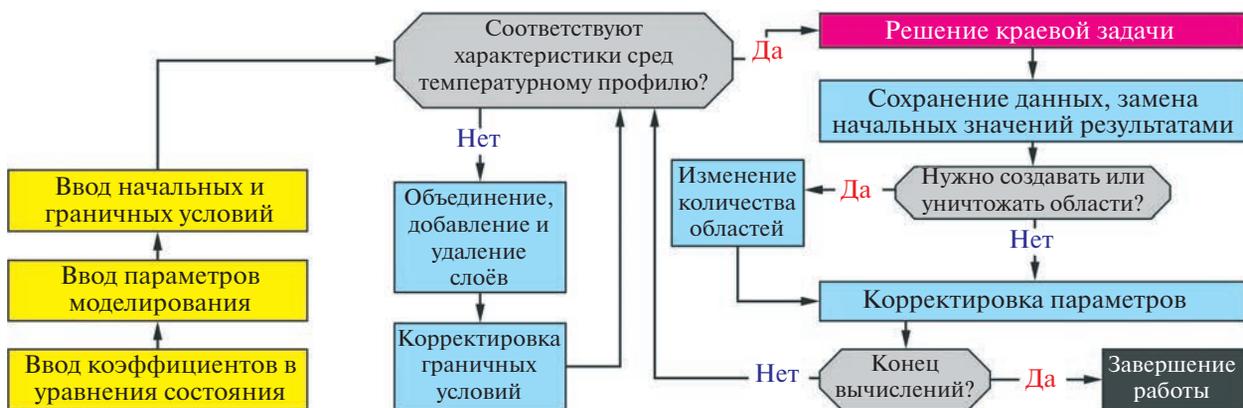


Рис. 5. Блок-схема алгоритма компьютерной программы.

Fig. 5. Block diagram of a computer program algorithm.

стью описания областей. Для того чтобы их уменьшить, а также в целом улучшить описание процессов, протекающих на границах областей, целесообразно применять неравномерную сеть со сгущением расчётных точек вблизи границ. Это и реализуется в компьютерной программе и численном решении. Практически это достигается путём перехода от координат z к некоторым новым ξ таким образом, чтобы точки новой сетки сгущались в районе границ сред. Как показано в работе (Попов, 2023), этим требованиям отвечает преобразование

$$\xi(z) = H \frac{f(z) - f(0)}{f(1) - f(0)},$$

$$f(z) = [1 + \exp\{-\kappa(z - 1/2)\}]^{-1},$$

где κ — коэффициент, определяющий степень сгущения точек на границах; H — линейный размер среды, по которому осуществляется интегрирование. В этой же работе приводится диаграмма, отражающая степень сгущения точек при разных значениях κ . Для решения задачи сетка строилась при $\kappa = 5$. В этом случае для слоя мощностью 1 м шаг в приграничной области составляет около 0.8 мм, а в центральной — около 3 мм.

Следующая сложность заключалась в разнообразии граничных условий. В модели реализованы граничные условия первого рода для верхней и нижней границ, а также четвёртого и Стефана для внутренних границ. Наибольшую сложность представляли расчёты, связанные с решением многофазной задачи Стефана (Самарский, Вабищевич, 2003). Авторам этот метод видится более предпочтительным, нежели метод сквозного счёта.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для выяснения вклада тех или иных факторов в процесс формирования и эволюции талика будем рассматривать различные сценарии, представляющие собой разные варианты природных условий. В качестве начальных условий будем задавать постоянное распределение температуры с глубиной, равное -0.6°C . Изменение температуры на дневной поверхности определялось по соотношению (5).

Теплофизические параметры вычислялись по соотношению (12). Все расчёты выполнялись до глубины 10 м на протяжении 10 лет. Начало расчётов приходилось на момент смены лета на зиму. Следуя (Шендер и др., 1996), под “летом” будем подразумевать интервал времени, в течение которого температуры на дневной поверхности будут положительными, под “зимой” — отрицательны-

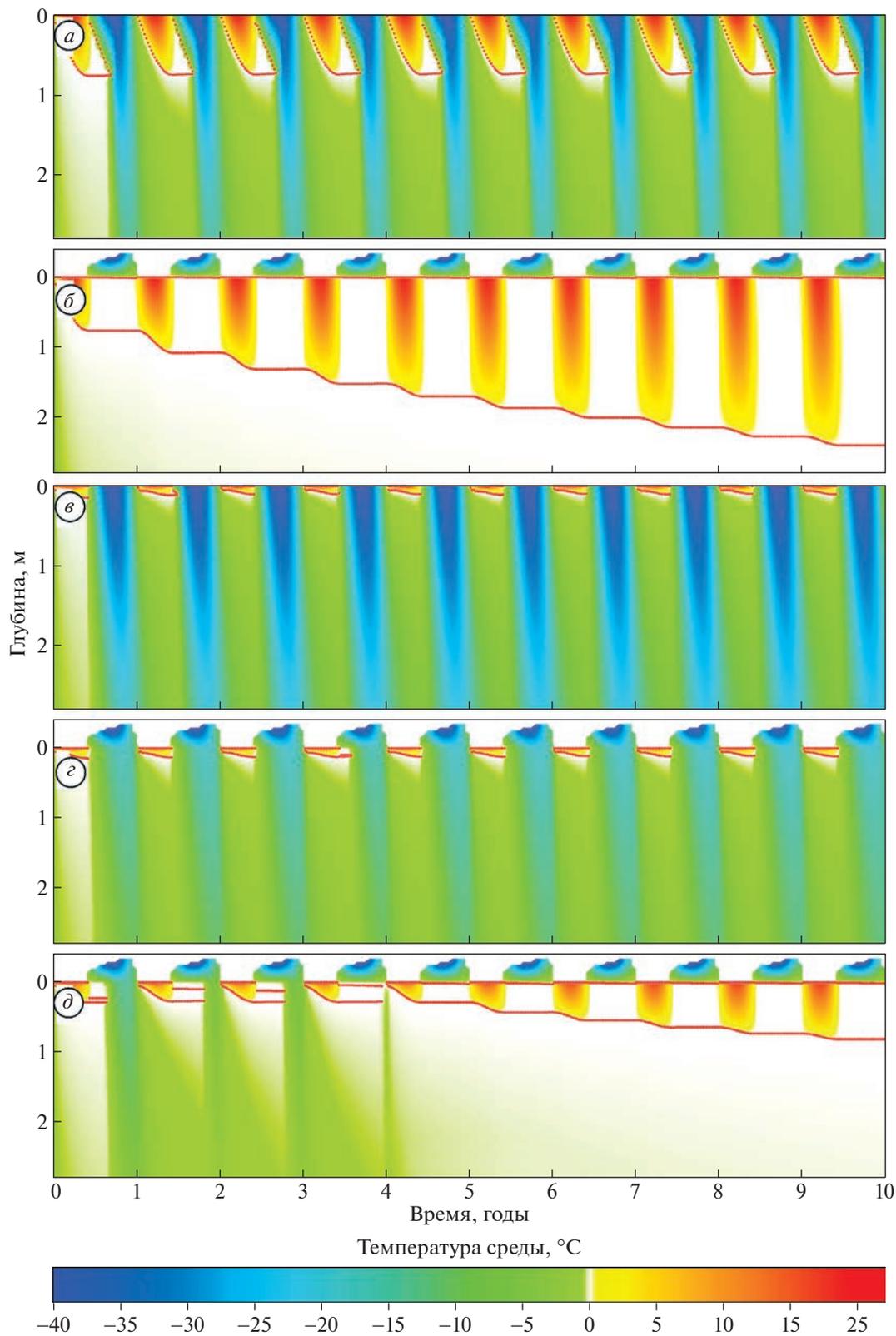
ми. Интервал вычислений составил 12 часов. Ниже рассмотрим несколько сценариев.

В первом из них модель задавалась в качестве однородного слоя песчаных отложений с постоянной влажностью. Исходя из влажности, рассчитывались теплофизические параметры согласно соотношениям (10) и (11). Снег и напочвенный слой отсутствовали в течение всего периода. В качестве примера на рис. 6, а приведено распределение температуры в верхней трёхметровой части геологического разреза на протяжении десяти лет для грунта с влажностью (льди-стостью) 10%.

Из представленного рисунка и результатов моделирования следует, что протаивание слоя песчаных отложений происходит в течение тёплого периода на глубину от 75 до 100 см в зависимости от влажности грунта. Это связано с изменением теплофизических коэффициентов грунта при различной влажности. Однако при этом талики не формируются, поскольку в течение зимнего периода весь талый слой промерзает. Наличие температурных вариаций в нижней части разреза (см. рис. 6, а) указывает на то, что сезонные температурные колебания в такой среде не успевают затухнуть до глубины 10 м.

Для второго сценария в предыдущую модель вводилось формирование снежного покрова. Продолжительность зимы (т.е. τ_{WT}) задавалась неизменной и равной 213 суток, что соответствует интервалу чуть более полугода ($\tau_{WT}/\tau_Y = 0.58$). Теплофизические параметры и высота снежного покрова определялись соотношениями (7) — (9). Максимальная мощность снега при различных сценариях задавалась 10, 20, 33, 50 и 100 см. В качестве примера приведено распределение температуры в верхней части геологического разреза (см. рис. 6, б). Влажность (льди-стость) слоя песчаных отложений принималась 10% при максимальной мощности снежного покрова 33 см, что соответствует району г. Якутск.

Как следует из результатов моделирования, наличие снега существенно меняет процесс теплопереноса, поскольку коэффициенты теплопроводности снега и слоя песчаных отложений относительно влажности и агрегатного состояния влаги в нём отличаются более чем на порядок (см. рис. 4). Отсутствие снега, обладающего теплоизоляционными свойствами, приводит к промерзанию нижележащей среды и консервации многолетнемёрзлых пород. В то же время снег препятствует проникновению зимнего атмосферного холода в нижележащие горные породы и, как результат, их выхолаживанию. С приходом весны снег тает, а с ним исчезает и теплоизолирующий слой. Это приводит к тому, что в песчаные отложения поступает атмосферное тепло, обусловленное солнечной радиацией, и их теплозапас по-



вышается. Затем снова наступает холодное время, но теплозапас грунта увеличился и теперь уже большей частью расходуется на повышение температуры и формирование талика. Этот механизм

работает вне зависимости от того, много снега или мало. Таким образом, наличие снежного покрова толщиной 33 см при отсутствии напочвенного слоя приводит к постепенному росту сезон-

Рис. 6. Распределение температуры в верхней части геологического разреза: *a* – влажность (льдиность) грунта 10%, снег и напочвенный слой отсутствуют; *b* – влажность (льдиность) грунта 10%, максимальная мощность снежного покрова 33 см, напочвенный слой отсутствует; *в* – влажность (льдиность) грунта 5%, мощность напочвенного слоя (мох *Sanionia uncinata*) 5 см, снежный покров отсутствует; *г* – влажность (льдиность) грунта 5%, максимальная мощность снежного покрова 33 см, мощность напочвенного слоя (мох *Sanionia uncinata*) 5 см; *д* – влажность (льдиность) грунта 5%, максимальная мощность снежного покрова 33 см, мощность напочвенного слоя (разнотравье) 5 см. Красными точками показано положение фазовых границ.

Fig. 6. Temperature distribution in the upper part of the geological section: *a* – the humidity (iciness) of the soil is 10%, there is no snow and soil-vegetative layer; *b* – the humidity (iciness) of the soil is 10%, the maximum thickness of snow is 33 cm, there is no soil-vegetative layer; *в* – the humidity (iciness) of the soil is 5%, the thickness of the soil-vegetative layer (moss *Sanionia uncinata*) is 5 cm, there is no snow cover; *г* – the humidity (iciness) of the soil is 5%, the maximum thickness of the snow is 33 cm, the thickness of the soil-vegetative layer (moss *Sanionia uncinata*) is 5 cm; *д* – the humidity (iciness) of the soil is 5%, the maximum thickness of the snow is 33 cm, the thickness of the soil-vegetative layer (grass) is 5 cm. Red dots depict the phase boundaries.

но-талого слоя. В целом же за десять лет нижняя граница мерзлоты опустилась на 2.4–3.1 м в зависимости от влажности (льдиности) грунта.

Для третьего сценария в первый цикл расчётов вводился напочвенный слой, в качестве которого рассматривался слой мха *Sanionia uncinata* различной мощности при естественной влажности: 1, 5 и 10 см. Слой снега отсутствовал. Теплофизические параметры мха определялись соотношениями (12). Это в целом соответствует ранее опубликованным данным. Продолжительность зимы была аналогичной предыдущим случаям.

Как следует из результатов моделирования, наличие напочвенного слоя, так же как и снега, существенно меняет процесс теплопереноса. Это вполне понятно, поскольку значения его теплофизических параметров примерно на порядок меньше, чем у слоя песчаных отложений (см. рис. 5). Для расчётов использовались значения теплофизических параметров мха *Sanionia uncinata*, заимствованные из работы (Тишков и др., 2013). Они приведены при естественной весовой влажности 141% и плотности 231 кг/м³ для зимнего и летнего времени и составили: $\lambda_F = 0.45$ Вт/(м · К), $\lambda_M = 0.19$ Вт/(м · К), $c_F = 2.28$ кДж/(кг · К), $c_M = 3.54$ кДж/(кг · К).

Моделирование показывает, что талик не формируется, а по мере увеличения мощности напочвенного слоя глубина сезонного протаивания хоть и незначительно, но уменьшается. В частности, при влажности грунта 5% и изменении толщины мха (напочвенного слоя) от 10 до 1 см глубина протаивания варьирует в пределах от 10 до 25 см. Влажность песчаного слоя оказывает слабое влияние на результат моделирования. В качестве примера (см. рис. 6, *в*) представлено распределение температуры для слоя песчаных отложений влажностью 5% и толщины напочвенного слоя 5 см. Ввиду малой мощности оттаявшего слоя в верхней части разреза (см. рис. 6, *в*) он практически не выделяется.

Для четвёртого сценария в первый цикл расчётов вводился как напочвенный слой, как и для

предыдущего этапа, так и слой снега. Расчёты выполнялись при одной влажности песчаных отложений 5%. Мощность напочвенного слоя при естественной влажности задавалась: 1, 5 и 10 см. Максимальная мощность снежного покрова принята равной 10, 33, 50 и 100 см. Продолжительность зимнего периода устанавливалась аналогично предыдущим случаям. В качестве иллюстрации (см. рис. 6, *г*) приведено распределение температуры в среде за десятилетний период при мощности напочвенного слоя 5 см и максимальных толщинах снега 33 см, что соответствует району р. Шестаковка. В рассмотренном случае талик не формируется, а глубина оттаивания грунта составляет всего около 15 см.

Рассмотрим ещё один сценарий. Он аналогичен предыдущему, но вместо мха *Sanionia uncinata* взяты параметры для разнотравья, полученные экспериментальным путём на стационаре Туймада. При плотности 1280 кг/м³ и влажности 17% для зимнего и летнего времени они следующие: $\lambda_F = 0.44$ Вт/(м · К), $\lambda_M = 0.35$ Вт/(м · К), $c_F = 1.46$ кДж/(кг · К), $c_M = 1.88$ кДж/(кг · К). Данные заимствованы из работы (Пермяков и др., 2017). Как видно из результатов расчётов (см. рис. 6, *д*), при смене напочвенного слоя с мха на разнотравье талик начал уверенно формироваться через пять лет (см. рис. 6, *д*).

Таким образом, в результате моделирования выяснено, что ведущую роль в формировании таликов Центральной Якутии и их дальнейшего развития играют два фактора: наличие снежного покрова и напочвенного слоя. При этом различный тип напочвенного слоя может и способствовать образованию таликов, и препятствовать. Однако следует иметь в виду, что реальная ситуация сложнее, поскольку в расчётах не учтены вертикальное и горизонтальное движение вод, фильтрующихся в грунтах.

Следует отметить, что приповерхностные температурные вариации для первого, третьего и четвёртого сценариев проникают в грунт достаточно глубоко – более чем на десять метров. Об этом можно косвенно судить, исходя из значительного

температурного градиента у нижней границы рассматриваемой области. При этом они быстро затухают во втором и последнем случаях, т.е. тогда, когда формируется талик. Причина заключается в различии коэффициентов теплопроводности $a = \lambda/(pc)$ для мерзлого и талого грунта, которая составляет примерно полтора порядка.

Нижняя граница расчётной области моделирования располагается на глубине 10 м, на которой принята температура -0.6°C . Но в сценариях 1, 3, 4 и частично 5 тепловые волны доходят до нижней границы расчётной области (на рис. 6 показана только верхняя, наиболее важная часть разреза). Судя по их интенсивности, температурные вариации проникают и глубже. Однако следует иметь в виду, что талик может промерзнуть как с поверхности, так и с нижней стороны за счёт запаса холода в многолетней мерзлоте.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в рамках настоящей работы сформулирована математическая модель. Она позволяет описывать теплофизические процессы, благодаря которым происходит формирование субаэриальных таликов и их последующее развитие. В ней также представлено обобщение соотношений для описания теплофизических свойств грунтов, снега и напочвенного покрова для района Центральной Якутии. В работе рассмотрено несколько сценариев и продемонстрировано постепенное изменение температуры верхней части геологического разреза, что в ряде случаев приводит к формированию таликов.

Представленные результаты моделирования указывают на то, что основной причиной формирования и развития талика в районе исследования (Центральная Якутия) является наличие снежного покрова. Наличие мохового покрова препятствует нагреву грунта в летний период и не способствует формированию талика. Их теплоизолирующие свойства, с одной стороны, консервируют имеющийся теплозапас грунта, а с другой — препятствуют его выхолаживанию за счёт низкой температуры окружающего воздуха. Кроме того, большое значение имеет конкретный тип напочвенного покрова, поскольку различные мхи и лишайники, а также низкие кустарники толкнянки характеризуются различными теплофизическими коэффициентами. Это приводит к тому, что талики либо формируются, либо нет. Важным обстоятельством является тот факт, что смена климата может привести к смене типа напочвенного покрова, что, как показало моделирование, непременно скажется как на процессах формирования и развития таликов, так и многолетнемерзлых пород в целом.

Благодарности. Авторы благодарят А.Н. Саламатина и А.В. Сосновского, а также анонимных рецензентов за содержательные консультации и рекомендации, которые прояснили ряд важных вопросов и, безусловно, улучшили настоящее научное исследование. Авторы выражают свою искреннюю признательность А.В. Сосновскому за комментарии и правки, внесённые в текст рукописи. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 “Субаэриальные и подоёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата”.

Acknowledgments. The authors would like to thank A.N. Salamatina, A.V. Sosnovsky and anonymous reviewers who have assisted us in various ways and have thus contributed to the results obtained in this study. The authors express their sincere gratitude to A.V. Sosnovsky for his comments and corrections made to the text of the manuscript. This study was financially supported by the Russian Science Foundation and Yakut Science Foundation Project No 22-17-20040 “Subaerial and lake taliks in continuous permafrost in Eastern Siberia: genesis, current state and reaction to climate change”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бойцов А.В.* Условия формирования и режим подземных вод надмерзлотного и межмерзлотного стока в Центральной Якутии. Дис. на соиск. уч. степ. канд. геол.-минерал. наук. Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2002. 176 с.
- Бойцов А.В.* Условия формирования и режим склоновых таликов в Центральной Якутии // Криогидрогеологические исследования. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1985. С. 44–55.
- Варламов С.П., Жирков А.Ф., Находкин Д.А.* Температурный режим почвогрунтов при нарушении покровов в современных климатических условиях Центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2017б. Т. 88. № 4. С. 65–71.
- Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н.* Межгодовая изменчивость параметров температурного режима грунтов на Чабьдинском стационаре (Центральная Якутия) // Вопросы развития и освоения мерзлых толщ. Якутск: ИМЗ СО АН СССР, 1990. С. 68–75.
- Варламов С.П., Скачков Ю.Б., Скрябин П.Н.* Результаты 35-летних мониторинговых исследований криолитозоны на стационаре “Чабьда” (Центральная Якутия) // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2017а. Т. 86. № 2. С. 34–40.
- Варламов С.П., Скрябин П.Н.* Динамика теплового состояния грунтов мерзлотных ландшафтов Цен-

- тральной Якутии // Изв. Самарского науч. центра РАН. 2012. Т. 14. № 1(8). С. 2040–2044.
- Гаврильев Р.И.* Обобщение взаимосвязи тепловых и физических свойств различных типов грунтов и торфяников // Мерзлые грунты при инженерных воздействиях. 1984. С. 14–28.
- Гаврильев Р.И.* Теплофизические свойства горных пород и напочвенных покровов криолитозоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1998. 279 с.
- Гагарин Л.А., Бажин К.И., Оленченко В.В., Огонеров В.В., Ву Ц.* Выявление участков потенциального термосуффозионного разуплотнения грунтов вдоль федеральной автодороги а-360 “Лена” в Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 3. С. 61–68.
- Горелик Я.Б., Паздерин Д.С.* Корректность постановки и решения задач по прогнозу динамики температурных полей в основании сооружений на многолетнемерзлых грунтах // Криосфера Земли. 2017. Т. XXI. № 3. С. 49–59.
- Лебедева Л.С., Бажин К.И., Христофоров И.И., Абрамов А.А., Павлова Н.А., Ефремов В.С., Огонеров В.В., Тарбеева А.М., Федоров М.П., Нестерова Н.В., Макарьева О.М.* Надмерзлотные субаэральные талики в бассейне реки Шестаковка (Центральная Якутия) // Криосфера Земли. 2019. Т. XXIII. № 1. С. 40–50.
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(40-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50))
- Осокин Н.И., Самойлов Р.С., Сосновский А.В., Сократов С.А., Жидков В.А.* К оценке влияния изменчивости характеристик снежного покрова на промерзание грунтов // Криосфера Земли. 1999. Т. III. № 1. С. 3–10.
- Павлов А.В.* Теплофизика ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1979. 284 с.
- Павлова Н.А., Шепелев В.В., Галанин А.А., Ефремов В.С.* Гидрохимия подземных вод надмерзлотно-межмерзлотного стока на участках их разгрузки (Центральная Якутия) // Водные ресурсы. 2020. Т. 47. № 4. С. 391–401.
- Пермяков П.П., Афанасьев Т.А., Варламов С.П., Скрябин П.Н.* Определение граничных условий при моделировании термического режима мерзлых грунтов // Вест. Северо-Восточного науч. центра ДВО РАН. 2018. № 1. С. 56–62.
- Пермяков П.П., Афанасьева Т.А., Варламов С.П., Скрябин П.П.* Об эффективности восстановления граничных условий при моделировании теплового режима мерзлых грунтов // Вести Забайкальского гос. ун-та. 2017. Т. 23. № 5. С. 27–35.
- Попов С.В., Боронина А.С., Лебедева Л.С.* Формулировка задачи и выбор методов решения для численного моделирования теплофизических процессов в водоносных субаэральном таликах // Материалы IV Всерос. науч. конф. с междунар. участием “Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии”. 2022. Т. 1. С. 214–222.
- Попов С.В.* Решение одномерной задачи Стефана с двумя фазовыми границами на примере моделирования процесса заморзания воды в ледниковой трещине // Лёд и Снег. 2023. Т. 63. № 1. С. 130–140.
<https://doi.org/10.31857/S2076673423010131>
- Самарский А.А., Вабищевич П.Н.* Численные методы решения задач конвекции-диффузии. М.: Изд-во УРСС, 2003. 246 с.
- Сосновский А.В.* Математическое моделирование влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // Криосфера Земли. 2006. Т. X. № 3. С. 83–88.
- Сосновский А.В.* Расчёт оптимальной толщины слоя водно-ледовой смеси при намораживании льда на больших площадях // Материалы гляциол. исслед. 1984. № 50. С. 223–231.
- Сосновский А.В., Осокин Н.И.* Влияние мохового и снежного покровов на устойчивость многолетней мерзлоты на Западном Шпицбергене при климатических изменениях // Вест. Кольского науч. центра РАН. 2018. № 3. С. 178–184.
- Тишков А.А., Осокин Н.И., Сосновский А.В.* Влияние синузидий мохообразных на деятельный слой арктических почв // Изв. РАН. Сер. геогр. 2013. № 3. С. 39–46.
- Угаров И.С., Ефремов П.В.* Влагозапасы деятельного слоя почвы бассейна реки Лены // Успехи современного естествознания. 2022. № 10. С. 88–92.
- Фельдман Г.М.* Методы расчёта температурного режима мерзлых грунтов. М.: Наука, 1973. 254 с.
- Фельдман Г.М.* Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988. 258 с.
- Шендер Н.И., Бойцов А.В., Тетельбаум А.С.* Формирование таликов и высокотемпературных мерзлых пород в условиях Центральной Якутии // Материалы Первой конф. геокриологов России. М.: Изд-во МГУ, 1996. С. 529–537.
- Jafarov E.E., Romanovsky V.E., Genet H., McGuire A.D., Marchenko S.S.* The effects of fire on the thermal stability of permafrost in lowland and upland black spruce forests of interior Alaska in a changing climate // Environ. Research Letters. 2013. V. 8. № 3. P. 035030.
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035030>
- Lebedeva L., Pavlova N., Khristoforov I.* Geology, structure, ground temperature and groundwater level in aquifer taliks in the Shestakovka River Basin, Eastern Siberia // Land. 2023. V. 12. № 1. P. 16.
<https://doi.org/10.3390/land12010016>
- Rowland J.C., Travis B.J., Wilson C.J.* The role of advective heat transport in talik development beneath lakes and ponds in discontinuous permafrost // Geophys. Research Letters. 2011. V. 38. № 17. P. L17504.
<https://doi.org/10.1029/2011gl048497>
- Zhang Y., Wolfe S.A., Morse P.D., Olthof I., Fraser R.H.* Spatiotemporal impacts of wildfire and climate warming on permafrost across a subarctic region, Canada // Journ. of Geophys. Research. Earth Surface. 2015. V. 120. № 11. P. 2338–2356.
<https://doi.org/10.1002/2015JF003679>

Citation: *Popov S.V., Boronina A.S., Lebedeva L.S.* The main factors in the formation of subaerial taliks on the example of the Shestakovka River basin (Central Yakutia), using a one-dimensional mathematical model. *Led i Sneg. Ice and Snow.* 2023, 63 (4): 597–611 [In Russian]. doi 10.31857/S2076673423040130

Analysis of the Main Factors Controlling the Formation of Subaerial Taliks, Using a One-Dimensional Mathematical Model. A Case Study for the Shestakovka River Basin (Central Yakutia)

S. V. Popov^{a,b,#}, A. S. Boronina^{b,c}, and L. S. Lebedeva^b

^a*Saint-Petersburg State University, Saint Petersburg, Russia*

^b*Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia*

^c*State Hydrological Institute, Saint Petersburg, Russia*

#e-mail: spopov@yandex.ru

Received March 9, 2023; revised September 7, 2023; accepted October 2, 2023

This study presents a mathematical model of heat transfer in a subaerial talik. The model is based on the concepts presented in classical works on permafrost, as well as on the results of geological and geophysical research carried out in the Shestakovka River basin (Central Yakutia). This model is based on the solution of the classical Stefan problem on the moving of the phase transition boundaries for a multilayer and multiphase medium. The solution was calculated on a unstructured mesh. When the phase boundaries move, thawed or frozen layers of soil are formed or wedged out. The layers include: snow cover, seasonally thawed soil, seasonally frozen and frozen sand deposits, as well as soil-vegetative layer. Published empirical relationships were used to calculate thermophysical coefficients, which are presented in this article. Simple variants of the model were considered to clarify the contribution of various factors to the process of formation and evolution of taliks. It has been established that the presence of snow cover and soil-vegetative layer have the most significant effect on the formation of taliks. Calculations show that taliks are formed in the first years of the modeled period, in the presence of snow and the absence of soil-vegetative layer. The soil-vegetative layer, depending on its composition and moisture content (ice content), can prevent the formation and development of taliks. The authors do not consider cases where shrubs contribute to snow accumulation. The humidity and iciness of the layer of sand sediments located in Central Yakutia have practically no effect on this process.

Keywords: permafrost, subaerial taliks, mathematical modelling, snow and land covers

REFERENCES

- Boitsov A.V.* The Conditions of Formation and the Regime of Ground Waters of Supra-permafrost and Intra-permafrost Runoff in Central Yakutia. PhD. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, 2002: 176 p [In Russian].
- Boitsov A.V.* Conditions of formation and the regime of slope taliks in Central Yakutia. *Kriogidrogeologicheskie issledovaniya. Cryohydrogeological studies.* Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS, 1985: 44–55 [In Russian].
- Varlamov S.P., Zhirkov A.F., Nakhodkin D.A.* Ground temperature regime after surface disturbance under current climatic conditions in Central Yakutia. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики.* Arctic and Subarctic Natural Resources. 2017a, 88 (4): 65–71 [In Russian].
- Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N.* Interannual variability of soil temperature parameters at the Chabydinskiy station (Central Yakutia). *Voprosy razvitiya i osvoeniya merzlykh tolshch.* Yakutsk: Issues of development and development of frozen strata. Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS 1900: 68–75 [In Russian].
- Varlamov S.P., Skachkov Yu.B., Skryabin P.N.* Results of 35-year monitoring studies of the permafrost zone at the Chabyda station (Central Yakutia). *Prirodnye resursy Arktiki i Subarkтики.* Arctic and Subarctic Natural Resources. 2017a, 86 (2): 34–40 [In Russian].
- Varlamov S.P., Skryabin P.N.* Dynamics of the soil thermal state in permafrost landscapes in Central Yakutia. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy Akademii nauk.* Izvestia RAS SamSC. 2012, 14 (1 (8)): 2040–2044 [In Russian].
- Gavriliev R.I.* Generalization of the relationship of thermal and physical properties of various types of soils and peatlands. *Merzlye grunty pri inzhenernykh vozdeystviyah.* Frozen soils under engineering impacts. Novosibirsk: Science. 1984: 14–28 [In Russian].
- Gavriliev R.I.* *Teplofizicheskie svoystva gornyh porod i napochvennykh pokrovov kriolitozony.* Thermophysical properties of rocks and ground covers in the permafrost zone. Novosibirsk: Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1998: 279 p. [In Russian].

- Gagarin L.A., Bazhin K.I., Olenchenko V.V., Ogonerov V.V., Qingbai Wu. Revealing potential thermos-suffosional soil loosening sites along A-360 Lena federal highway, Central Yakutia. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2019, XXIII (3): 61–68 [In Russian].
- Gorelik J.B., Pazderin D.S. Correctness of formulation and solution of thermotechnical problems in forecasting temperature field dynamics in the foundations of constructions on permafrost. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2017, XXI (3): 49–59 [In Russian].
- Lebedeva L.S., Bazhin K.I., Khristoforov I.I., Abramov A.A., Pavlova N.A., Efremov V.S., Ogonerov V.V., Tarbeeva A.M., Fedorov M.P., Nesterova N.V., Makarieva O.M. Suprapermafrost subaerial taliks, Central Yakutia, Shestakovka river basin. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2019, XXIII (1): 40–50 [In Russian]. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1\(40-50\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2019-1(40-50))
- Osokin N.I., Samoilo V.R.S., Sosnovskii A.V., Sokratov S.A., Zhidkov V.A. On estimation of the influence of snow cover characteristics variability on soils freezing. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 1999, III (1): 3–10 [In Russian].
- Pavlov A.V., *Teplofizika landshaftov*. Thermal physics of landscapes. Novosibirsk: Nauka, 1979: 284 p. [In Russian].
- Pavlova N.A., Shepelev V.V., Galanin A.A., Efremov V.S. Groundwater hydrochemistry of suprapermafrost–intrapermafrost flow in their discharge areas in Central Yakutia. *Vodnye resursy*. Water Resources. 2020, 47 (4): 391–401.
- Permyakov P.P., Afanasyeva T.A., Varlamov S.P., Skryabin P.N. Determining boundary conditions in modeling the thermal regime of frozen soils. *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo isentra DVO RAN*. Bulletin of the North-East Scientific Center, Russia Academy of Sciences Far East Branch. 2018, 1: 56–62 [In Russian].
- Permyakov P., Afanasyeva T., Varlamov S., Skryabin P. On the efficiency of boundary conditions restoration when modeling of the thermal regime of frozen soils. *Vestnik zabaykal'skogo gosudarstvennogo universiteta*. Transbaikalian State University Journ. 2017, 23 (5): 27–35 [In Russian].
- Popov S.V., Boronina A.S., Lebedeva L.S. Formulation of the problem and choice of solution methods for numerical simulation of thermophysical processes in water-bearing subaerial taliks. *Materialy IV Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem "Vodnye i ekologicheskie problemy Sibiri i Central'noj Azii"*. Proc. of the IV All-Russian scientific conf. with international participation "Water and environmental problems of Siberia and Central Asia". 2022, 1: 214–222 [In Russian].
- Samarskij A.A., Vabishchevich P.N. Chislennye metody resheniya zadach konvekcii-diffuzii. Numerical methods for solving convection-diffusion problems. Moscow: URSS, 2003: 246 p. [In Russian].
- Popov S.V. Solution of the one-dimensional Stefan problem with two transitions for modelling of the water freezing in a glacial crevasse. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2023, 63 (1): 130–140 [In Russian]. <https://doi.org/10.31857/S2076673423010131>
- Sosnovsky A.V. Mathematical modelling of the influence of snow cover thickness on degradation of permafrost at climate warming. *Kriosfera Zemli*. Earth's Cryosphere. 2006, X (3): 83–88 [In Russian].
- Sosnovsky A.V. Calculation of the optimal thickness of the water-ice mixture layer during ice freezing over large areas. *Materialy Glyatsiologicheskikh Issledovaniy*. Data of Glaciological Studies. 1984, 50: 223–231 [In Russian].
- Sosnovsky A.V., Osokin N.I. Impact of moss and snow cover on the sustainability of permafrost in West Spitsbergen due to climate change. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo isentra RAN*. Herald of the Kola Science Centre of RAS. 2018, 3: 178–184 [In Russian].
- Tishkov A.A., Osokin N.I., Sosnovsky A.V. The Impact of Moss Synusia on the Active Layer of Arctic Soil and Subsoil. *Izvestiya Rossijskoj akademii nauk. Seriya geograficheskaya*. News of the Russian Academy of Sciences. Geographical series. 2013, 3: 39–46 [In Russian].
- Ugarov I.S., Efremov P.V. Active-layer soil moisture in the Lena River basin. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. Advances in current natural sciences. 2022, 10: 88–92 [In Russian].
- Feldman G.M. Metody rascheta temperaturnogo rezhima merzlyh gruntov. Methods for calculating the temperature regime of frozen soils. Moscow: Nauka, 1973: 254 p. [In Russian].
- Feldman G.M. Peredvizhenie vlagi v talyh i promerzayushchih gruntah. Movement of moisture in thawed and freezing soils. Novosibirsk: Nauka, 1988: 258 p. [In Russian].
- Shender N.I., Boytsov A.V., Tetelbaum A.S. Formation of taliks and high-temperature frozen rocks in the conditions of Central Yakutia. *Materialy Pervoj Konferencii geokriologov Rossii*. Proc. of the First Conf. of Geocryologists of Russia. Moscow: MSU, 1996: 529–537 [In Russian].
- Jafarov E.E., Romanovsky V.E., Genet H., McGuire A.D., Marchenko S.S. The effects of fire on the thermal stability of permafrost in lowland and upland black spruce forests of interior Alaska in a changing climate. *Environ Res Lett*. 2013, 8 (3): 035030. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/3/035030>
- Lebedeva L., Pavlova N., Khristoforov I. Geology, structure, ground temperature and groundwater level in aquifer taliks in the Shestakovka River Basin, Eastern Siberia. *Land*. 2023, 12 (1):16. <https://doi.org/10.3390/land12010016>
- Rowland J.C., Travis B.J., Wilson C.J. The role of advective heat transport in talik development beneath lakes and ponds in discontinuous permafrost. *Geophysical Research Letters*. 2011, 38 (17): L17504. <https://doi.org/10.1029/2011gl048497>
- Zhang Y., Wolfe S.A., Morse P.D., Olthof I., Fraser R.H. Spatiotemporal impacts of wildfire and climate warming on permafrost across a subarctic region, Canada. *Journ. Geophys. Res. Earth Surf*. 2015, 120 (11): 2338–2356. <https://doi.org/10.1002/2015JF003679>