

Санкт-Петербургский государственный
университет

Сборник докладов международной научной
конференции памяти выдающегося русского
ученого Юрия Борисовича Виноградова

ПЯТЫЕ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ
ГИДРОЛОГИЯ В ЭПОХУ ПЕРЕМЕН

Санкт-Петербург, 5–14 октября 2023 г.

Под редакцией О. М. Макарьевой, П. А. Никитиной

Санкт-Петербург
2023

УДК 556
ББК 26.22
С28

- C23 Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова «Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен» [Электронный ресурс]; Санкт-Петербург, 2023 год / под ред. О. М. Макарьевой, П. А. Никитиной. — СПб.: Изд-во ВВМ, 2023. — 689 с.

ISBN 978-5-9651-0730-8

Международная научная конференция «Пятые Виноградовские Чтения. Гидрология в эпоху перемен» памяти выдающегося русского ученого-гидролога Юрия Борисовича Виноградова проводится в Санкт-Петербургском государственном университете в 2023 году в пятый раз (2013, 2015, 2018, 2020). Она стала регулярной научной платформой для свободной дискуссии по проблемам развития гидрологии и поискам путей их преодоления, синтеза современных подходов в области изучения гидрологических процессов и их применения для решения фундаментальных и практических задач.

УДК 556
ББК 26.22

Book of proceedings of the international scientific conference in memory of the outstanding Russian scientist Yuri Vinogradov “Fifth Vinogradov Conference. Hydrology in the era of change” [Electronic resource]; St. Petersburg, 2023 / ed. O. M. Makarieva, P. A. Nikitina. — St. Petersburg: VVM Publishing House, 2023. — 689 p.

International scientific conference “Fifth Vinogradov Conference. Hydrology in the era of change” in memory of the outstanding Russian scientist-hydrologist Yuri Borisovich Vinogradov is held at St. Petersburg State University in 2023 for the fifth time (2013, 2015, 2018, 2020). It has become a regular scientific platform for free discussion on the problems of the development of hydrology and the search for ways to overcome them, synthesis of modern approaches in the field of studying hydrological processes and their application to solve fundamental and practical problems.

ISBN 978-5-9651-0730-8

© Макарьева О. М., Никитина П. А., 2023

Особенности формирования и развития таликов на примере оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида)

А.В. Немчинова^{1,2*}, С.В. Попов^{1,4}, А.С. Боронина^{2,4}, Л.С. Лебедева², А.С. Бирюков⁴

¹Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург

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

³Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия

⁴Полярная Морская Геологоразведочная Экспедиция, г. Санкт-Петербург, Россия
nemchinova02@mail.ru

Аннотация. В настоящем исследовании представлены результаты математического моделирования формирования и эволюции субаэриальных таликов в верхних слоях пород холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида). Было рассмотрено четыре смоделированных сценария с различными метеоусловиями. Моделирование показало, что талики на холмах Ларсеманн (Восточная Антарктида) могут образовываться, но находятся в нестабильном состоянии, что подразумевает их не долгосрочность существования. Основным условием формирования талых зон в районе исследования является наличие снежного покрова в зимнее время и его отсутствие в летнее.

Ключевые слова: Антарктические оазисы, мерзлота, субгляциальные талики, уравнение теплопроводности, задача Стефана, конечно-разностные схемы.

Features of the formation and development of taliks on the example of the Larsemann Hills Oasis (East Antarctica)

A.V. Nemchinova^{1,2*}, S.V. Popov^{1,4}, A.S. Boronina^{2,3}, L.S. Lebedeva², A.S. Biryukov⁴

¹Saint-Petersburg State University, St. Petersburg

²Melnikov Permafrost Institute, Yakutsk, Russia

³State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

⁴Polar Marine Geosurvey Expedition (PMGE), St. Petersburg, Russia
nemchinova02@mail.ru

Abstract. This study presents the results of mathematical modeling of the formation and evolution of subaerial taliks in the upper layers of rocks of the Larsemann hills (East Antarctica). Four simulated scenarios with different weather conditions were considered. Modeling has shown that taliks on the Larsemann hills (East Antarctica) can form, but are in an unstable state, which implies their non-long-term existence. The main condition for the formation of melt zones in the study area is the presence of snow cover in winter and its absence in summer.

Keywords: Antarctic oasis, permafrost, subaerial taliks, heat equation, Stefan problem, finite difference schemes.

Введение

Вся непокрытая льдом территория континента Антарктиды попадает в зону распространения многолетнемерзлых пород, так как среднегодовые температуры окружающего воздуха отрицательные и сплошной растительный покров отсутствует [4;

5]. Исследования распространения многолетней мерзлоты в Антарктиде начались ещё в 50-х годах прошлого столетия и продолжаются и по сей день.

Известно, что до 1960-х годов под ледниковым покровом континента предполагалось повсеместное распространение многолетней мерзлоты. Однако с течением времени стало понятно, что применительно к субгляциальной среде Антарктиды вопрос распространения мерзлоты не так прост, как кажется на первый взгляд. После доказательства теории о таянии ледника спровоцированное увеличением его мощности, исследователи пришли к выводу, что многолетняя мерзлота, вероятно, распространена только по периферии ледника, где его мощности не превышают 1500-2000 м. Однако подтвердить это предположение как тогда, так и сейчас крайне затруднительно ввиду практически полного отсутствия данных термометрии подледниковых озёр и отобранных образцов горных пород. Многочисленные подледниковые озёра, водные прослойки и присутствие влажного грунта лишней раз определяют сложность и неоднозначность существующих представлений о распространении субгляциальной многолетней мерзлоты и указывают на актуальность этой научной проблемы.

Настоящая работа посвящена выяснению возможности существования субаэральные и субгляциальные талики в районе оазиса Холмы Ларсеманн (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида), а также выяснению вклада различных факторов на процесс их формирования и эволюции. Основой оценки является математическое моделирование, базирующееся на метеорологических и геофизических данных.

Материалы и методы исследования

В рамках изучения многолетней мерзлоты Центральной Якутии была разработана и реализована в виде компьютерной программы модель формирования и развития таликов. Она основана на решении одномерной, многослойной и многофазной задачи Стефана. В рамках настоящей работы авторы предприняли попытку применить этот положительный опыт для выяснения возможностей формирования и развития *субаэральных* (т.е. на открытой местности) таликов на Холмах Ларсеманн в Восточной Антарктиде.

Концептуально модель представляется следующим образом. В нижней части разреза имеется полуограниченный слой многолетнемерзлых горных пород Ω_P (рис. 1). Выше Ω_P в период относительно тёплого антарктического лета располагается талый слой Ω_T . Выяснение того, имеется ли он также и в холодный зимний период, является задачей настоящего исследования. Также, в зависимости от времени года, часть разреза занимает слой сезонномерзлых пород Ω_F . В тёплое время года происходит его полное или частичное оттаивание, что приводит к образованию талой области Ω_T . С наступлением холодов она промерзает с поверхности, утончается и в конечном итоге исчезает (Рис. 1). В холодное время года на поверхности грунта формируется снежный покров Ω_S , мощность которого меняется с течением времени (Рис. 1).

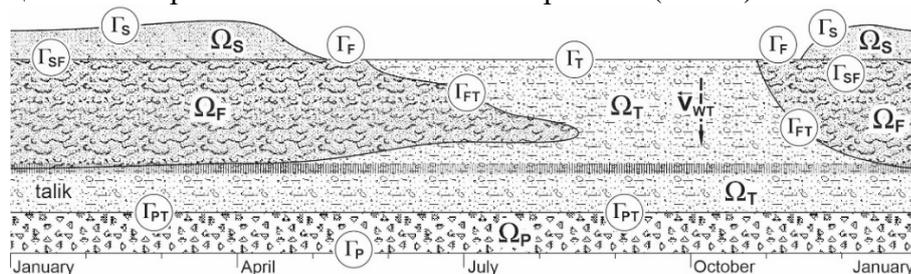


Рис. 1 Иллюстрация математической модели.

Приведённое выше описание применительно к одномерной задаче может быть представлено системой дифференциальных уравнений для каждой из сред. Совместим начало оси аппликат с поверхностью грунта (Ω_F или Ω_T), и направим её вниз. Таким образом, z будет соответствовать глубине по разрезу, при этом для слоя снега Ω_S , z будет принимать отрицательные значения. Кроме того, будем считать, что в мёрзлом грунте Ω_F , вертикальные движения, вызванные разницей плотностей воды и льда, отсутствуют, так как скорости этих деформаций пренебрежимо малы. Также будем считать, что вертикальные движения талой воды в снегу Ω_S отсутствуют. Тогда

$$\rho_j c_j \frac{\partial \theta_j}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_j \frac{\partial \theta_j}{\partial z} \right), \quad z \in \Omega_j, j = P, F, S, \quad (1)$$

где θ – температура среды, λ – её теплопроводность, c – удельная теплоёмкость, и ρ – плотность. В то же время будем полагать возможным вертикальную фильтрацию воды в талый грунт Ω_T со скоростью v_w , которая, ввиду предельного водонасыщения грунта, не будет меняться с глубиной. Если считать, что $v_w(z)$ достаточно мала, и вода в процессе фильтрации успевает до своей температуры нагреть (или охладить) слой грунта, в котором она перемещается, тогда

$$\rho_T c_T \frac{\partial \theta_T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_T \frac{\partial \theta_T}{\partial z} \right) + v_w \frac{\partial \theta_T}{\partial z}, \quad z \in \Omega_T \quad (2)$$

Здесь и далее, индексы $j = P, T, F, S, I, W$ соответствуют перечисленным выше областям: permafrost, thawed soil, frozen soil, snow, ice and water.

Формулировка краевой задачи требует наличия граничных и начальных условий. На нижней границе Γ_P задаётся постоянная температура многолетнемёрзлых пород $\bar{\theta}_p$, которая, согласно опубликованным данным, для обсуждаемого района составляет $\bar{\theta}_p = -8,5^\circ\text{C}$ [7]. Условие на верхней границе, т.е. на Γ_S , Γ_M и Γ_F , задаётся теплообменом с атмосферой. Граничным условием между талыми и мёрзлыми породами, т.е. $\Gamma_{FT} = \Omega_F \cap \Omega_T$ и $\Gamma_{PT} = \Omega_P \cap \Omega_T$ является условие Стефана, а для остальных границ – условие четвёртого рода (сшивки). В качестве временного интервала для моделирования выберем 20-е октября 2012 года – 5-е мая 2023 года. В качестве начального распределения температуры в толще зададим постоянную температуру по глубине, равную $\bar{\theta}_p$. Поскольку $\bar{\theta}_p < 0$, в начальный момент времени область талика отсутствует.

Вышеизложенное может быть представлено следующими уравнениями, которые дополняют (1) и (2):

$$\lambda_F \frac{\partial \theta_F}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{FT}} - \lambda_T \frac{\partial \theta_T}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{FT}} = \frac{q_F}{2} \omega_{FT} (\rho_F + \rho_T) \frac{dz_{FT}}{dt} \Big|_{\Gamma_{FT}}, \quad \lambda_S \frac{\partial \theta_S}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{SF}} = \lambda_F \frac{\partial \theta_F}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{SF}},$$

$$\lambda_P \frac{\partial \theta_P}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{PT}} - \lambda_T \frac{\partial \theta_T}{\partial z} \Big|_{\Gamma_{PT}} = \frac{q_F}{2} \omega_{PT} (\rho_P + \rho_T) \frac{dz_{PT}}{dt} \Big|_{\Gamma_{PT}}, \quad \theta_P \Big|_{\Gamma_P} = \bar{\theta}_p \quad (3)$$

$$\theta_P(z) \Big|_{t=0} = \theta_F(z) \Big|_{t=0} = \theta_S(z) \Big|_{t=0} = \bar{\theta}_p, \quad \lambda_j \frac{\partial \theta_j}{\partial z} \Big|_{\Gamma_j} = \alpha_E (\theta_0 - \theta_E), \quad j = T, F, S,$$

где q_F – удельная теплота плавления, $q_F = 332$ кДж/кг, α_E и θ_E – эффективные значения коэффициента теплообмена и температуры окружающего воздуха, которые описываются уравнениями состояния.

Обратимся к граничному условию на поверхности, т.е. последнему из соотношений (3). Как указывалось выше, оно задаётся теплообменом с атмосферой, и имеется множество эмпирических соотношений для различных ситуаций. В наших расчётах будем использовать модель, опубликованную в работе [3], которая успешно применялась для моделирования процессов теплопереноса в российском секторе Арктики и для ледников Шпицбергена [2]. Этот подход предполагает, что условие теплообмена с атмосферой включает в себя суммарный тепловой поток Q_{Σ} ,

$$Q_{\Sigma} = Q_T + Q_E + Q_R - Q_S,$$

где Q_T , Q_E , Q_R и Q_S – потоки тепла соответственно за счёт конвективного теплообмена, испарения, эффективного излучения и солнечной радиации. Именно эта величина и соответствует правой части последнего уравнения (3), при этом эффективные значения коэффициента теплоотдачи α_E и температуры окружающего воздуха θ_E могут быть найдены по соотношениям

$$\begin{aligned} \alpha_E &= \alpha(1 + 1,95 \times 10^{-2} a) + 0,205(\theta_A / 100)^3 \\ \theta_E &= \left\{ \alpha \left[\theta_A - 1,95 \times 10^{-2} (b - p_A \omega_A) \right] + 19,9(\theta_A / 100)^4 + \Lambda_S \right\} / \alpha_E, \end{aligned} \quad (4)$$

где α – коэффициент теплоотдачи поверхности, θ_A – температура окружающего воздуха, p_A и ω_A – упругость насыщенного водяного пара при температуре θ_A и относительная влажность воздуха соответственно.

Изложенная выше задача решалась численно. Для её реализации использована неявная конечно-разностная схема с переменным шагом и последующим применением метода прогонки [1]. Компьютерная программа создавалась на Delphi под управление ОС MS Windows 11. В качестве компилятора использовался пакет Embarcadero Delphi 10.4 Sydney (Embarcadero Technologies, Inc., USA).

Результаты и выводы

На основе представленной выше модели была выполнена серия сценарных расчётов. Они различались граничными условиями на поверхности, прежде всего, температурой окружающего воздуха, а также толщиной снежного покрова и продолжительностью его наличия. Для всех сценариев расчётная толщина грунта задавалась 10 м, что вполне достаточно для наличия значительного запаса холода. На нижней границе задавалась средняя величина геотермического потока, равная 54.6 мВт/м² [6].

Первый сценарный расчёт был основан на реальных данных метеостанции Прогресс, полученных за период с 20 октября 2012 г. по 5 мая 2023 г. Они включали в себя температуру и влажность окружающего воздуха, скорость ветра и высоту солнца над горизонтом. Этот сценарный расчёт выполнялся из предположения о наличии нетающего снежного покрова постоянной толщиной 0,6 м, поскольку на рассматриваемой территории имеется множество снежников различной мощности. Расчёты показывают, что талик не формируется, и происходит общее охлаждение грунта. Это объясняется тем, что снег является хорошим изолятором, который препятствует проникновению солнечного тепла в грунт. Распределение температуры по глубине с течением времени показано на Рис. 2а.

Второй сценарный расчёт выполнялся для ситуации, когда сразу после установления положительных температур на территории оазиса происходило полное таяние снега, а при наступлении отрицательных температур наблюдалось его формирование. Тогда, исходя из температурных данных, началом формирования снежного покрова будет 5-е февраля, а полный его сход 7-го декабря. Максимум толщины снега соответствует 25-му октября. Распределение температуры по глубине с

течением времени показано на Рис. 2б. Как следует из него, талики также не формируются, но в летнее время, за счёт стаивания снега, грунт прогревался, что приводило к приповерхностному таянию. В результате оттаивание происходило на глубину около одного метра.

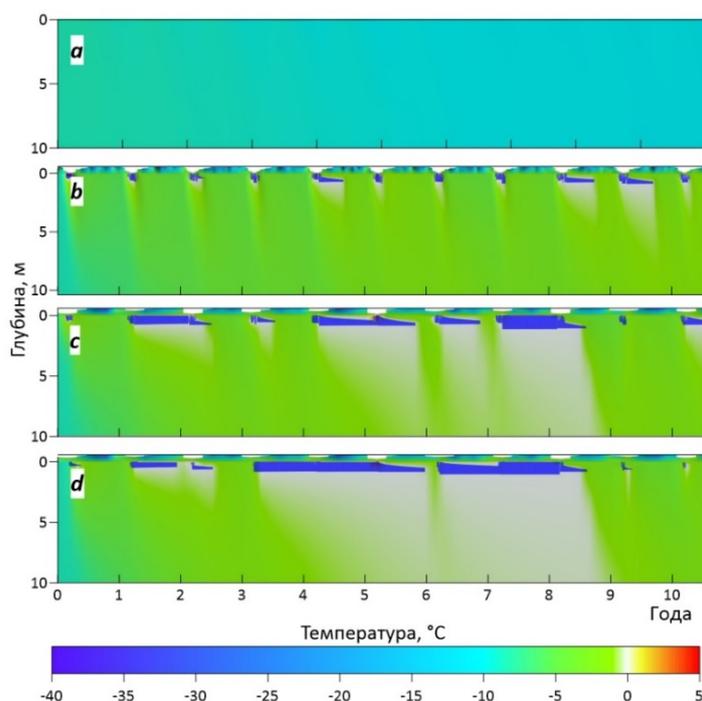


Рис. 2 Распределение температуры с глубиной для различных сценариев: **a** – сценарий 1; **b** – сценарий 2; **c** – сценарий 3; **d** – сценарий 4.

Третий сценарный расчёт выполнялся для территории оазиса, на которой снежный покров начинает формироваться на пятнадцать дней раньше момента установления отрицательных температур окружающего воздуха. Дату достижения максимальной высоты снежного покрова оставим прежней. Распределение температуры по глубине с течением времени показано на Рис. 2с. Как следует из представленного рисунка, за период моделирования три раза: между 4-ым и 5-ым годом, и в период с 8-го по 10-ый, формировались только перезимки. Каждый из них просуществовал около года. Талик, пусть и кратковременно, сформировался так как за тёплые летние месяцы осуществлялся постоянный прогрев грунта, в том числе и в ночное время, поскольку Солнце в этих широтах не заходит. При этом более раннее начало залегания снега, по сравнению с предыдущим сценарием, не позволил потерять накопленное тепло.

Четвёртый сценарный расчёт проводился для тех областей оазиса, на которых снежный покров сходит через 15 дней после установления положительных температур, а формироваться начинает за 20 дней до установления отрицательных. Дату достижения максимальной высоты снежного покрова оставим прежней. Распределение температуры по глубине с течением времени показано на Рис. 2d. Как следует из представленного рисунка, талики формировались дважды с продолжительностью два года. Здесь ситуация более удачная для прогрева грунта, чем в предыдущем сценарии. Полярный день на Прогрессе начинается 20-го ноября. Это означает, что поверхность, в том числе и свободная от снега, постоянно получает солнечное тепло. Однако, отрицательные температуры окружающего воздуха в ночные часы сохраняются. Это означает, что при недостаточном поступлении солнечного тепла, происходит выхолаживание грунта. Если же снег начнёт залегать позже, то, несмотря на отрицательные температуры окружающего воздуха, это приведёт к большей аккумуляции общего количества полученного тепла, и, как следствие, к более устойчивому формированию таликов.

Таким образом, в районе оазиса Холмы Ларсеманн талики имеются, но они находятся в неустойчивом состоянии. Моделирование показывает, что для формирования устойчивых таликовых зон, количества тепла, поступающего в летнее время, недостаточно. Однако при условии общего потепления климата, которое повлияет как на летние, так и на зимние температуры окружающего воздуха, ситуация с формированием устойчивых таликовых зон может измениться. Анализ климатических данных показывает, что имеется значимый положительный тренд, температуры окружающего воздуха, соответствующий $0.0973^{\circ}\text{C}/\text{год}$. Следовательно, к 2030 году средняя температура окружающего воздуха в районе Холмов Ларсеманн может подняться почти на один градус. Это вполне может стать решающим фактором, который запустит механизм формирования устойчивых таликов. Помимо этого, уменьшение облачности в летнее время также может повысить поток солнечной радиации от 10% до 30%, что приведёт к значительно большему поступлению тепла в грунт.

Благодарности

Авторы благодарят А.В. Сосновского и А.Н. Саламатина за содержательные консультации и рекомендации, которые прояснили ряд важных вопросов и улучшили настоящее научное исследование. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда и Якутского научного фонда Проект № 22-17-20040 «Субаэральные и подошёрные талики в сплошной криолитозоне Восточной Сибири: происхождение, современное состояние и реакция на изменение климата».

Acknowledgments

We would like to thank A.V. Sosnovsky and A.N. Salamatin who have assisted us in various ways and have thus contributed to the results obtained in this study. 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

1. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Численные методы решения задач конвекции-диффузии. – 2003.
2. Сосновский А.В. Математическое моделирование влияния толщины снежного покрова на деградацию мерзлоты при потеплении климата // Криосфера Земли. 2006. Т. X. №3, С. 83–88.
3. Сосновский А.В. Расчет оптимальной толщины слоя водно-ледовой смеси при намораживании льда на больших площадях // Материалы гляциол. исслед. 1984. № 50. С. 223–231.
4. Bockheim J.G., Hall K.J. Permafrost active layer dynamics and periglacial environments of continental Antarctica // South African J. Sci., 2002, vol. 98 (1–2), p. 82–90.
5. Dobinski W, Szafraniec JE, Szypluła B. Area and borders of Antarctic and permafrost—A review and synthesis. Permafrost and Periglac Process. 2022;1-15. doi:10.1002/ppp.2170
6. Martos, Y. M., Catalán, M., Jordan, T. A., Golynsky, A., Golynsky, D., Eagles, G., Vaughan, D. G., 2017. Heat flux distribution of Antarctica unveiled. Geophysical Research Letters, 44(22), 11-417.
7. Vieira, G., Bockheim, J., Guglielmin, M., Balks, M., Abramov, A. A., Boelhouwers, J., ... Wagner, D., 2010. Thermal state of permafrost and active-layer monitoring in the antarctic: Advances during the international polar year 2007–2009. Permafrost and Periglacial Processes, 21(2), 182-197.