

Оригинальная статья

Моделирование уровенного режима межмерзлотных вод и их стока в Центральной Якутии на примере водосборной площади источника Ерюю

М. Юй^{1,2}, Н. А. Павлова^{✉,1}

¹Институт мерзлотоведения им П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

²Факультет водного хозяйства и электроэнергетики, Хэйлунцзянский университет,
г. Харбин, Китайская Народная Республика

[✉]napavlova@mpi.ysn.ru

Аннотация

В области криолитозоны на фоне изменения климата и возрастающей техногенной нагрузки с каждым годом возрастает актуальность изучения условий формирования ресурсов и режима над- и межмерзлотных вод, которые наиболее чувствительны к внешнему воздействию. Одним из методов изучения динамики подземных вод при невозможности проведения систематических круглогодичных наблюдений является численное моделирование. Цель выполненных исследований – создать математическую модель фильтрации надмерзлотно-межмерзлотных подземных вод, широко распространенных на правобережье р. Лена в Центральной Якутии, и оценить межгодовую изменчивость их ресурсов. Трехмерная стандартная геофильтрационная модель была создана в программе MODFLOW-USG. Исходными данными для ее построения послужили результаты многолетних полевых гидрогеологических и геокриологических исследований, полученные на водосборной площади одного из круглогодично действующих наледеобразующих источников на бестяхской террасе р. Лена. Для калибровки численной модели использованы данные натурных наблюдений за уровнем воды в скважине, расположенной в зоне транзита межмерзлотных вод. Корректировка фильтрационных параметров и граничных условий модели проводилась до тех пор, пока расхождение между расчетными и фактическими значениями уровня межмерзлотных вод не составило менее 0,1 м для более чем 90 % измерений. Результаты моделирования позволили оценить динамику водообильности межмерзлотного водоносного талика за последние 15 лет, уточнить влияние различных метеорологических факторов и процессов сезонного промерзания-протаивания пород на формирование режима подземных вод, количественно оценить внутригодовую изменчивость дебита источника. Полученные результаты могут послужить основой для постановки задач по прогнозированию изменения мерзлотно-гидрогеологических условий под действием колебаний климата, а также рассматриваться как эффективный метод количественной оценки динамики подземных вод в области распространения многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: надмерзлотно-межмерзлотный талик, подземные воды, моделирование, MODFLOW-USG, фильтрационные свойства, уровень воды, дебит источника

Финансирование. Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований ИМЗ СО РАН «Подземные воды криолитозоны: закономерности формирования и режима, особенности взаимодействия с поверхностными водами и мерзлыми породами, перспективы использования» (№ 122012400106-7).

Благодарности. Авторы выражают глубокую признательность доктору геол.-мин. наук, академику АН РС (Я) В.В. Шепелёву за научное консультирование в процессе подготовке статьи.

Для цитирования: Юй М., Павлова Н.А. Моделирование уровенного режима межмерзлотных вод и их стока в Центральной Якутии на примере водосборной площади источника Ерюю. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2025;30(3):392–403. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-392-403>

Modeling the water level regime of intrapermafrost waters and their runoff in Central Yakutia: A case study of the Eruu source catchment area

Miao Yu,^{1,2} Nadezhda A. Pavlova^{✉,1}

¹Melnikov Permafrost Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Yakutsk, Russian Federation

²School of Hydraulic & Electric-Power, Heilongjiang University, Harbin, People's Republic of China

[✉]napavlova@mpi.ysn.ru

Abstract

In permafrost regions, the combined effects of climate change and increased anthropogenic activity highlight the need to study the formation processes and dynamics of supra- and intrapermafrost waters, due to their strong responsiveness to external influences. When continuous year-round observations are not possible, numerical modeling provides an efficient approach to study groundwater dynamics. This study aims to construct a mathematical model of suprapermafrost and intrapermafrost groundwater flow prevalent along the right bank of the Lena River in Central Yakutia, and to evaluate the interannual variability of these groundwater resources. A three-dimensional groundwater flow model was developed using the MODFLOW-USG software. This model was constructed using baseline data obtained from extensive, long-term field investigations in hydrogeology and geocryology conducted within the catchment area of a perennial icing spring located on the Bestyakh Terrace of the Lena River. The numerical model was calibrated using field-observed water levels from a monitoring well located within the intrapermafrost water transit zone. Calibration involved iterative adjustments of hydraulic parameters and boundary conditions until the deviation between simulated and observed intrapermafrost water levels was less than 0.1 m for more than 90% of the measurements. The simulation results enabled the reconstruction of the water yield dynamics in the intrapermafrost aquifer talik over the past 15 years, clarified the effects of various meteorological factors and seasonal freeze-thaw cycles on groundwater regime formation, and provided a quantitative evaluation of spring discharge variability at intra-annual scales. These findings establish a foundation for developing predictive frameworks of permafrost-hydrogeological evolution in response to climatic variability and provide a robust methodological approach for quantifying groundwater dynamics in permafrost-affected regions.

Keywords: suprapermafrost–intrapermafrost talik, groundwater, modeling, MODFLOW-USG, filtration properties, water level, spring discharge

Funding. This study was conducted with the support of the Scientific Research Program at the Melnikov Permafrost Institute of SB RAS “Groundwater in permafrost: Formation and regime patterns, interaction with surface water and frozen rocks, and prospects for use” (No. 122012400106-7).

Acknowledgements. The authors express their sincere gratitude to Dr. Sci. (Geol. and Mineral.), Academician of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Victor V. Shepelev, for his invaluable scientific consultation during the preparation of this paper.

For citation: Yu M., Pavlova N.A. Modeling the water level regime of intrapermafrost waters and their runoff in Central Yakutia: A case study of the Eruu source catchment area. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2025;30(3):392–403. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2025-30-3-392-403>

Введение

В Центральной Якутии, в условиях глубокого залегания подмерзлотных водоносных горизонтов, одним из вариантов водообеспечения населенных пунктов, удаленных от р. Лена, являются пресные воды межмерзлотных таликов IV (бестяжской) надпойменной террасы этой реки. Несмотря на широкое распространение, условия формирования ресурсов межмерзлотных вод и их режим остаются недостаточно изученными. Во многом это связано с техническими трудностя-

ми буровых работ в климатических условиях Якутии, а наличие таликов в кровле многолетнемерзлых пород является причиной образования ледяных пробок в стволах скважин, что существенно осложняет ведение в них систематических гидрогеологических наблюдений [1, 2]. Для исключения влияния этих факторов при изучении динамики подземных вод в области криолитозоны все большее внимание привлекает использование численного моделирования [3–5], позволяющего лучше понять гидрогеологические условия из-

учаемых районов, уточнить геометрию фильтрационной области и свойства водоносных пластов [6].

Создание гидрогеологической численной модели требует определенного информационного обеспечения: исходных данных о фильтрационных параметрах и условиях питания и разгрузки водоносных горизонтов [7–9]. При моделировании непрерывное пространство разделяется на дискретные ячейки, а непрерывное время – на дискретные временные шаги [10,11]. Затем задаются фильтрационные и емкостные свойства горных пород, после чего назначаются граничные условия фильтрации подземных вод [12]. После запуска модели для каждого временного шага рассчитывается новое пространственно-временное распределение уровня (напора) подземных вод на основе комбинации уровня воды, начальных и граничных условий [4, 13].

При создании численных моделей для области криолитозоны необходимо учитывать сезонные изменения свойств деятельного слоя, изолирующие эффекты снежного покрова на поверхности почвы, а также изменения влажности грунта, вызванные инфильтрацией талых вод, что значительно усложняет процесс моделирования [14, 15]. Большинство существующих математических моделей ограничиваются решением одно- или двумерных задач и не учитывают воздействие процессов сезонного промерзания и протаивания горных пород на фильтрационно-емкостные свойства водоносных пластов. Все это сказывается на точности расчетов и приводит к значительным неопределенностям, связанным с количественной оценкой влияния сезонной динамики мерзлого состояния пород на гидрогеологические условия.

Авторами использована трехмерная стандартная модель фильтрации подземных вод MODFLOW-USG (неструктурированная сетка) для изучения уровенного режима межмерзлотных вод в криолитозоне и оценки их влияния на формирование наледи на примере источника Ерюю в Центральной Якутии. MODFLOW предполагает моделирование трехмерной стационарной и нестационарной напорно-безнапорной геофильтрации с использованием метода конечных разностей. Эта программу часто применяют для регионов с умеренным климатом, а для холодных регионов ее используют значительно реже.

Первоначально, до создания модели, были проанализированы сведения о природных усло-

виях в пределах предполагаемой области моделирования: собраны данные о распространении многолетнемерзлых пород, мощности слоя сезонного их протаивания, наличии различных типов таликов, расходе источника межмерзлотных вод Ерюю, об абсолютных отметках поверхности земли, количестве атмосферных осадков, высоте снежного покрова. С учетом геокриологических и гидрогеологических условий была создана модель MODFLOW-USG применительно к району исследования.

Природные условия района и гидрогеологическая схематизация

Район исследований расположен на правобережье р. Лена, в ее среднем течении, в пределах бестяхской террасы с абсолютными отметками ее рельефа от 110 до 140 м. Относительно ровная поверхность террасы осложнена песчаными грядами высотой от 2–3 до 10–20 м. В разделяющихся их эрозионных депрессиях распространены озера глубиной 2,5–4,0 м, которые нередко расположены цепочкой. Мощность многолетнемерзлых пород в районе исследований изменяется от 185 до 420 м [16]. Характерной особенностью мерзлотно-гидрогеологического строения территории является наличие в толще песчаных четвертичных отложений и в верхней части подстилающих их коренных пород разветвленной сети надмерзлотно-межмерзлотных водоносных таликов мощностью от 20 до 100 м и более [16–18]. Их ресурсы формируются преимущественно за счет инфильтрации надмерзлотных вод через субаквальные и субаэральные талики, а разгрузка на поверхность земли происходит в основании округлых или вытянутых термосуффозионных понижений, врезанных в бестяхскую террасу р. Лена [17, 19, 20].

Воды одного из таких локально распространенных водоносных комплексов формируют круглогодично действующий групповой источник Ерюю [19, 21–23]. Он расположен на левом берегу р. Тамма в 12 км от ее устья. По данным многолетних режимных наблюдений, его средний суммарный дебит в осенний период составляет 3400–3700 м³/сут. Химический состав воды гидрокарбонатный смешанный по катионам, ее минерализация 150–300 мг/л.

Границы области распространения водоносного надмерзлотно-межмерзлотного талика очерчены по результатам комплексных исследований, выполненных в 1974–1976 и 2007–2015 гг. [21,

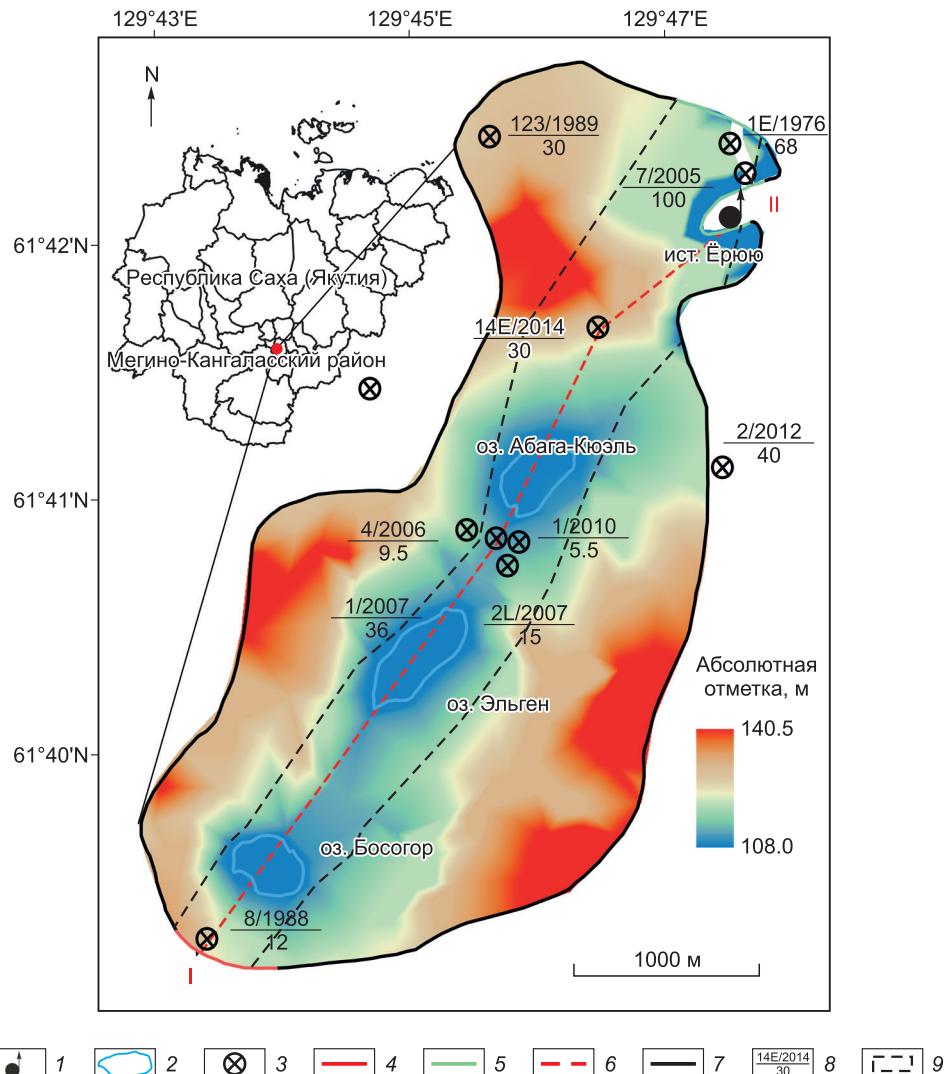


Рис. 1. Пространственное расположение межмерзлотного водоносного комплекса и источника подземных вод Ерюю
 1 – источник; 2 – озеро; 3 – гидрологическая наблюдательная скважина; 4 – граница притока; 5 – граница оттока; 6 – геофизический разрез; 7 – непроницаемая граница; 8 – числитель – номер скважины / год бурения, знаменатель – глубина выработки; 9 – межмерзлотный локальнодисперсионный комплекс

Fig. 1. Schematic diagram of the intrapermafrost aquifer system and the Eruu groundwater source
 1 – spring; 2 – lake; 3 – hydrogeological observation well; 4 – recharge boundary; 5 – discharge boundary; 6 – geophysical profile; 7 – impermeable boundary; 8 – numerator: well number / year of drilling, denominator: depth of the borehole; and 9 – local intrapermafrost

23, 24]. Установлено, что талик имеет вытянутую форму, ширина его от 500 до 900 м. Сверху он перекрыт криогенным водоупором мощностью от 13 до 53 м, а подошва залегает на глубине 55 м и более. В пределах площади распространения талика имеются озера Эльген, Абага-Кюэль и Босогор. Предполагается их гидравлическая связь через подзерные талики с межмерзлотными водами, что и дает основание называть изучаемый водоносный комплекс надмерзлотно-межмерзлотным (рис. 1, 2).

Сезонную и многолетнюю динамику подземных вод талика регулирует их водообмен с озерами [23]. С наступлением отрицательных температур воздуха при отсутствии атмосферного питания объем воды в озерах постепенно уменьшается за счет как формирования ледового покрова, так и инфильтрации ее в межмерзлотный водоносный горизонт. В результате в течение зимнего периода расход водных ресурсов озера постепенно начинает превышать их пополнение. Частичное промерзание донных отложений

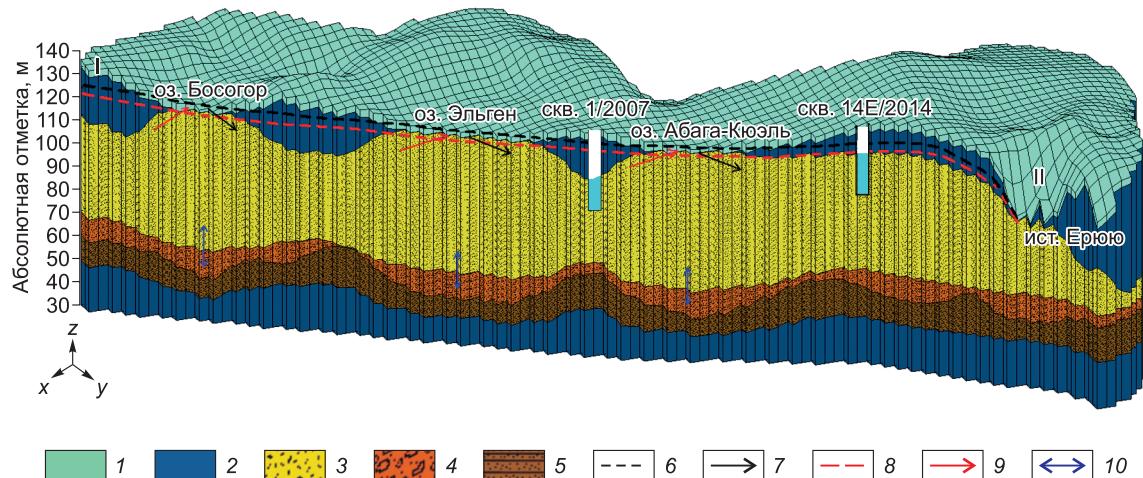


Рис. 2. Схематический гидрологический разрез моделируемой области по линии I-II на рис. 1.

1 – сезонно-талый (слой 1); 2 – многолетнемерзлые породы (слои 2 и 6); 3–5 – водоносный горизонт, сложенный: 3 – аллювиальными песками кварц-полевошпатовыми мелко- и среднезернистыми (слой 3), 4 – аллювиальными гравийно-галечниковыми отложениями изверженных и осадочных пород (слой 4), 5 – песчаниками мелко- и крупнозернистыми с прослойками алевролита (слой 5); 6 – максимальный уровень подземных вод; 7 – разгрузка подземных вод в озеро; 8 – минимальный уровень подземных вод; 9 – инфильтрация воды из озера в межмерзлотный водоносный горизонт; 10 – двухсторонний поток подземных вод

Fig. 2. Schematic hydrogeological cross-section of the modeled area along line I-II in Fig. 1

1 – seasonally thawed layer (Layer 1); 2 – perennally frozen ground (Layers 2 and 6); 3–5 – aquifer composed of: 3 – alluvial fine- and medium-grained quartz–feldspar sands (Layer 3), 4 – alluvial gravel–pebble deposits of igneous and sedimentary origin (Layer 4), 5 – fine- and coarse-grained sandstones with interlayers of siltstone (Layer 5); 6 – maximum groundwater level; 7 – groundwater discharge into the lake; 8 – minimum groundwater level; 9 – infiltration of lake water into the intrapermafrost aquifer; 10 – bidirectional groundwater flow

в прибрежной мелководной части озера придает краевой части подозерных таликов характеристики многолетнемерзлых пород. Летом следующего года надмерзлотные воды сезоно-талого слоя, мощность которого достигает в песчаных отложениях 4,0 м, поступают в озеро, восполняя их водные ресурсы.

Информация, полученная при анализе природных условий территории, легла в основу гидрологической стратификации разреза и представлений об условиях формирования подземных вод.

Перед построением численной геофильтрационной модели были получены высотные отметки поверхности земли из данных ArcticDEM [25]. С учетом широты, долготы и высоты местности, с сайта Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации [<http://meteo.ru>] были взяты сведения о температуре воздуха и количестве атмосферных осадках на трех гидрометеорологических станциях, наиболее близко расположенных к изучаемой территории, – Покровск, Якутск и Тегюльтья. Данные с этих станций не могут напрямую отражать климатические параметры

исследуемой области, несмотря на небольшие различия отметок высот поверхности земли, поэтому полученные метеорологические параметры предварительно были скорректированы. Для этого использован метод обратного взвешенного расстояния, а в качестве весов для взвешенного среднего – точки интерполяции и расстояние между точками выборки. Формула для расчета температуры воздуха или количества атмосферных осадков следующая [26]:

$$X = \left(\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{D_i^p} \right) \left/ \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{D_i^p} \right) \right., \quad (1)$$

где X – температура воздуха или количество атмосферных осадков в исследуемой области ($^{\circ}\text{C}$ или мм); D_i – горизонтальное расстояние между интерполированной гидрометеорологической станцией и исследуемой областью (м); X_i – температура воздуха или количество атмосферных осадков на интерполированной гидрометеорологической станции ($^{\circ}\text{C}$ или мм); n – количество интерполированных точек выборки; p – степенной показатель, используемый для учета расстояния.

Построение модели

Геофильтрационная схематизация. Размер исследуемой территории составил 9,21 км². При составлении ее модели использована сетка с размерами ячеек 15 м × 15 м в направлениях X и Y. Расчетная область модели была обработана как активные ячейки (в их пределах возможна фильтрация). Вне расчетной области неактивные ячейки сетки игнорировались программой и не учитывались в расчете.

В концептуальной фильтрационной модели приняты следующие граничные условия. Плановая граница (направление X) на юго-западе изучаемой территории задана как входная граница, от нее происходит приток межмерзлотных вод (см. рис. 1). Северо-восточная часть района, в пределах которой абсолютные отметки рельефа понижаются, является дреной (выходная граница). Здесь часть подземных вод выводится на поверхность в виде источников и далее удаляется из модели, не участвуя в дальнейшем движении внутри системы. С северо-запада и юго-востока

исследуемую область окружают многолетнемерзлые породы, поэтому с этих сторон задана непроницаемая граница.

В направлении Z (профильные границы) каждый столбец разделен на шесть слоев в соответствии с гидрогеологической стратификацией (рис. 3). Верхний слой (слой 1) – активный. Он включает зону аэрации и воды деятельного слоя. Этот слой по-разному взаимодействует с внешней средой через вертикальный водообмен (инфилтрация дождевой воды, таяние снега, испарение, обмен с водой озер и т. д.). Свободная поверхность подземных вод активного слоя рассматривается как верхняя граница системы. Из-за сезонного промерзания и протаивания активного слоя его свойства и толщина изменчивы в течение года (рис. 4). Для учета этого непостоянства использован пакет «Временных изменений параметров» (MODFLOW-USG), что позволяет моделировать переменные свойства активного слоя, при этом сохраняя пространственную дискретизацию. Влияние испарения на вертикальный во-

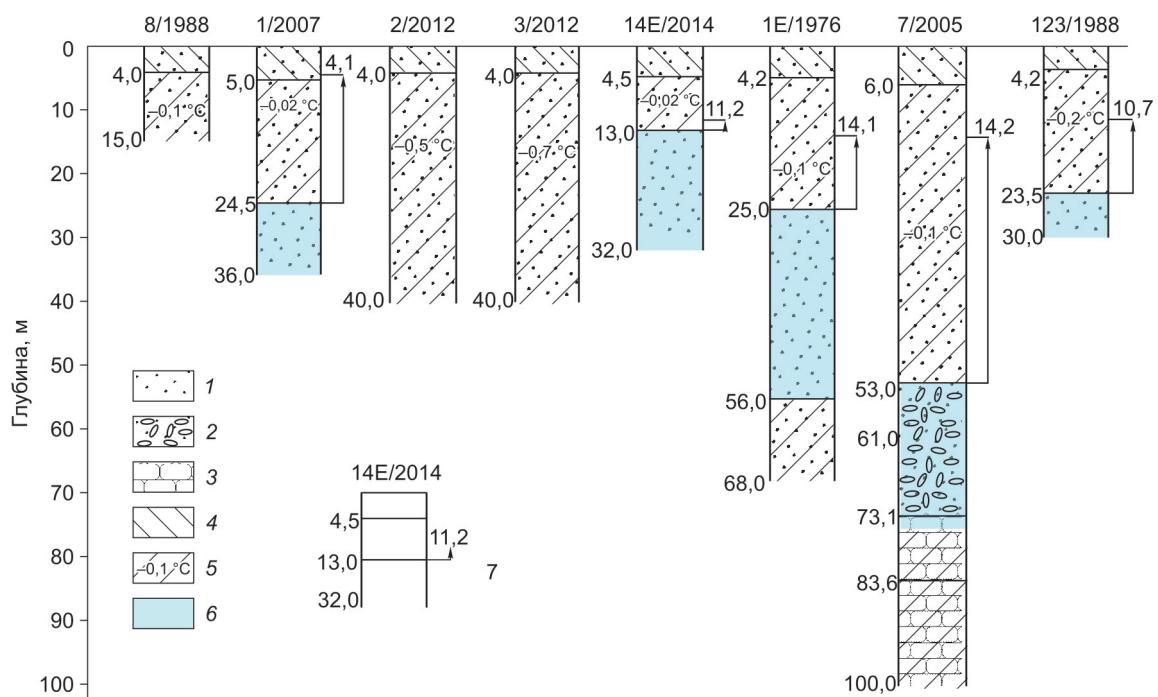


Рис. 3. Литологические колонки скважин. 1 – мелко- и среднезернистые пески; 2 – гравийно-галечные отложения с песчаным заполнителем; 3 – песчаники, алевролиты; 4 – сезонно-тальные породы; 5 – многолетнемерзлые породы и их температура; 6 – водоносный горизонт; 7 – скважина, цифры: вверху – номер скважины/год бурения, слева – глубина, м, справа у стрелки – глубина залегания пьезометрического уровня межмерзлотных вод

Fig. 3. Lithological columns of boreholes. 1 – fine- and medium-grained sands; 2 – gravel-pebble deposits with a sandy matrix; 3 – sandstones, siltstones; 4 – seasonally thawed deposits; 5 – permafrost deposits and their temperature; 6 – aquifer; 7 – borehole. Numbers: at the top – borehole number/year of drilling; on the left – depth (m); on the right next to the arrow – depth of the piezometric level of intrapermafrost groundwater.

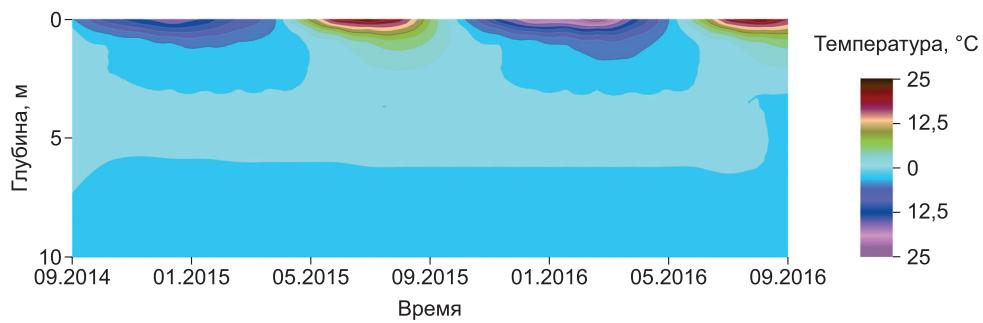


Рис. 4. Изменение температуры пород по скважине 1/2007 в 2014–2016 гг.

Fig. 4. Temperature profile in borehole 1/2007 from 2014 to 2016

дообмен в выполненнном моделировании игнорируется.

Слои 2 и 6 соответствуют непроницаемым многолетнемерзлым породам с температурой от $-0,7$ до $-0,02$ $^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 2). Высотные отметки кровли и подошвы каждого слоя рассчитаны исходя из данных цифровой модели рельефа (ArcticDEM) и результатов бурения скважин.

Вычислительный алгоритм. Основываясь на законе сохранения массы, основном законе фильтрации А. Дарси и других принципах движения подземных вод, а также анализе гидрогеологических условий изучаемой территории, исследуемая область фильтрации подземных вод концептуализирована с использованием следующей системы дифференциальных уравнений и граничных условий:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + w = \mu_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (x, y, z) \in \Omega, h = z; \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t}, \quad (x, y, z) \in \Omega; \quad (3)$$

$$H(x, y, z, 0) = H_0(x, y, z), \quad (x, y, z) \in \omega, \quad (4)$$

$$q(x, y, z) \mid \Gamma_3 = k' \frac{h - h_0}{B'}, \quad h \geq h_0, \quad (x, y, z) \in \Gamma_3, \quad (5)$$

где Ω – область моделирования; h – уровень подземных вод (м); w – вертикальный водообмен ($\text{м}^3/(\text{сут} \cdot \text{м}^2)$); H_0 – начальный напор (абсолютная отметка уровня) воды (м); x, y и z – пространственные координаты (м); K_x, K_y и K_z – коэффициенты фильтрации в направлениях x, y и z (м/сут); μ_s – удельная водоотдача; S_s – упругая емкость (1/м); t – время (сут); q – проводимость дрены (удельный расход потока на границе третьего

порода) ($\text{м}^3/\text{сут}$); k' – коэффициент фильтрации границы (м/сут); h_0 – абсолютная отметка уровня подземных вод на границе (м); B' – длина границы (м), Γ_3 – граница дренажа исследуемой области.

Уравнение (2) – уравнение неразрывности потока подземных вод (уравнение гидравлического баланса); (3) – уравнение Буссинеска, которое описывает трехмерную фильтрацию; (4) – уровень воды в момент, когда начальный напор равен 0; (5) – уравнение, описывающее граничное условие третьего рода (на границе родниковой разгрузки).

Калибровка модели. Для калибровки численной модели использованы результаты натурных наблюдений за уровнем подземных вод в скважине 14E/2014, расположенной между оз. Абага-Кюель и источником Ерюю. Скважина была пробурена в 2014 г. В ней установлен датчик, записывающий уровень воды в автоматическом режиме с периодичностью 1 раз в сутки. Тестирование цифровой модели проводилось для временных интервалов с 1 сентября 2014 г. по 31 августа 2016 г. и с 1 сентября 2018 г. по 31 августа 2019 г. Коэффициент фильтрации межмерзлотного водоносного пласта и удельный расход потока были неоднократно скорректированы, чтобы обеспечить высокую степень соответствия между результатами моделирования и фактическими данными (рис. 5, табл. 1).

Калибровка и тестирование модели проводились до тех пор, пока в 90 % случаев не была достигнута разница между моделируемыми и реальными средними суточными значениями уровня грунтовых вод менее 0,1 м. Хорошая сходимость расчетных и натурных данных послужила основанием для расчета положения уровня воды в скважине 14E за период с 2007 по 2022 гг.

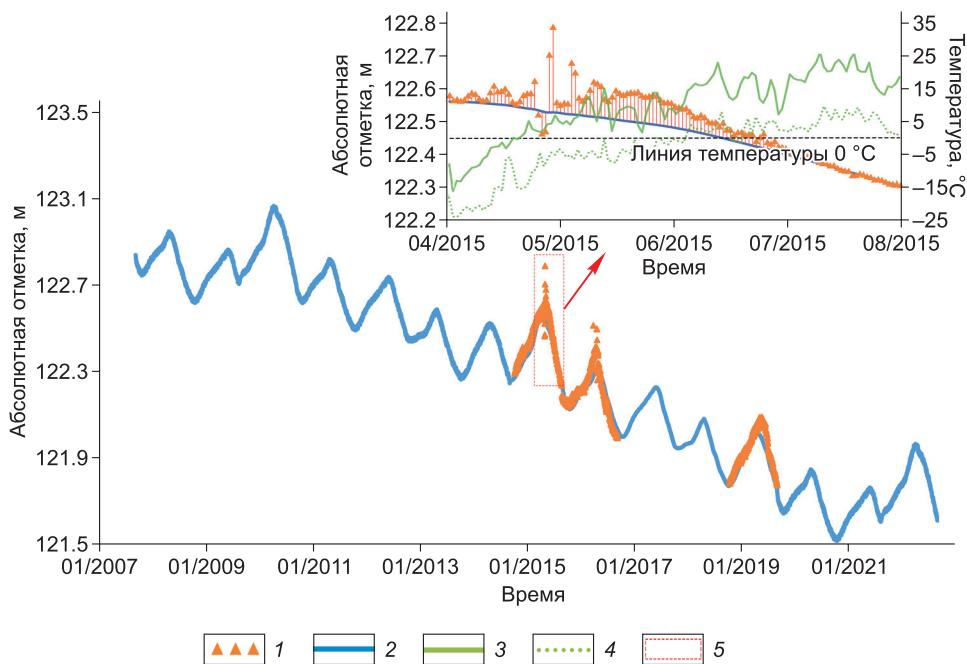


Рис. 5. Динамика уровня подземных вод в скважине 14Е/2014 с 1 сентября 2007 г. по 31 августа 2022 г. с детализацией периода с 1 апреля 2015 г. по 1 августа 2015 г.

1 – измеренные значения; 2 – расчетные значения; 3 – суточная максимальная температура воздуха; 4 – суточная минимальная температура воздуха; 5 – превышение фактического уровня над расчетным

Fig. 5. Groundwater level dynamics in borehole 14E/2014 from September 1, 2007, to August 31, 2022, with a detailed representation of the period from April 1 to August 1, 2015.

1 – measured values; 2 – simulated values; 3 – daily maximum air temperature; 4 – daily minimum air temperature; 5 – excess of the observed level over the simulated level

Результаты и обсуждение

Изменение уровня межмерзлотных вод на участке их транзита. В многолетнем цикле с 2008–2010 по 2021 гг. наблюдалось устойчивое понижение уровня межмерзлотных вод. Следует отметить, что период с 2006 по 2007 г. в Центральной Якутии отличался высокой увлажненностью территории. В результате обильных атмосферных осадков площадь многих озер на

бестяхской террасе к 2008 г. увеличилась на 48 % [27]. В скважинах уровень надмерзлотных грунтовых вод относительно его положения в 2005 г. повысился на 1,6–3,7 м. Межмерзлотный водоносный горизонт также среагировал на увеличение количества выпадающих атмосферных осадков. Причем максимальные отметки уровня воды на участке скважины 14Е по модельным расчетам должны были наблюдаться

Откалиброванные геофильтрационные параметры водоносных пластов

Таблица 1

Calibrated hydrogeological parameters of aquifer layers

Table 1

Слой	Коэффициент фильтрации по горизонтали, м/с	Коэффициент фильтрации по вертикали, м/с	Удельная водоотдача
1	$5,0 \times 10^{-7} \sim 0,5 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-8} \sim 0,5 \times 10^{-4}$	$0,5 \times 10^{-2} \sim 0,1$
2 и 6	$5,0 \times 10^{-7}$	$1,2 \times 10^{-8}$	$0,5 \times 10^{-2}$
3	$1,0 \times 10^{-4} \sim 1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-5} \sim 1,0 \times 10^{-4}$	$0,2 \sim 0,3$
4	$5,0 \times 10^{-3} \sim 1,0 \times 10^{-1}$	$1,0 \times 10^{-3} \sim 3,0 \times 10^{-2}$	$0,2 \sim 0,35$
5	$1,0 \times 10^{-6} \sim 1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-7} \sim 1,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-2} \sim 0,1$

Таблица 2

**Фактическое (1) и расчетное (2) положение уровня межмерзлотных вод
в наблюдательной скважине 14E/2014 в 2014–2019 гг.**

Table 2

**Observed (1) and simulated (2) positions of the intrapermafrost groundwater level
in observation borehole 14E/2014 from 2014 to 2019**

Максимальный уровень, м дата		Минимальный уровень, м дата		Средний годовой, м		Диапазон изменений уровня, м	
1	2	1	2	1	2	1	2
01.09.2014–31.08.2015							
122,79 29.04	122,56 11.04	122,17 31.08	122,20 31.08	122,44	122,41	0,82	0,36
01.09.2015–31.08.2016							
122,51 23.03	122,32 18.04	122,00 27.08	122,04 31.08	122,20	122,19	0,51	0,28
01.09.2018–31.08.2019							
122,09 16.05	122,01 16.04	121,77 31.08	121,75 31.08	121,90	121,89	0,32	0,26

в 2010 г., т. е. с временной сдвигкой в 3–4 года после периода высокой увлажненности. В дальнейшем средний годовой уровень межмерзлотных вод в районе исследования медленно понижался со скоростью 0,07 м/год.

В годовом цикле максимальное расхождение времени наступления экстремальных уровней межмерзлотных вод по фактическим и расчетным данным отмечено для наивысшего положения уровня и составило 26–30 дней, а разница между сроками, когда фиксировались минимальные уровни воды, не превысила 4 дней. В целом диапазон колебаний уровня воды за год по данным натурных измерений составил от 0,32 до 0,82 м, а по модельным – от 0,21 до 0,36 м (табл. 2). Временной сдвиг наступления экстремальных уровней и разница между реальными и расчетными их величинами в зимний период, вероятно, связаны с такими событиями, как кратковременное замерзание отдельных очагов разгрузки подземных вод, приводящее к росту гидростатического давления в водоносном горизонте, взрывы наледных бугров, учесть которые в модели затруднительно.

Изменение дебита источника Ерюю. Для изучения влияния процессов промерзания-протаивания пород в области разгрузки подземных вод на динамику дебита источника Ерюю и оценки его сезонной изменчивости был выбран период с 1 сентября 2014 г. по 31 августа 2015 г. В соответствии с особенностями сезонного изменения температуры пород воздуха, этот год был услов-

но разделен на три периода: 1 – период промерзания пород и образования наледи (температура воздуха ниже 0 °C); 2 – переходный период (от начала, когда появляются дневные температуры выше 0 °C, до полного таяния наледи); 3 – период протаивания пород деятельного слоя и отсутствия наледи.

Среднее значение расхода воды за период моделирования составило 3888 м³/сут, что соответствует результатам предыдущих натурных наблюдений (осенние расходы воды в 2013, 2014 и 2015 гг. были 3629, 4147 и 3715 м³/сут соответственно), а его сезонные изменения показаны на рис. 6.

С началом периода отрицательных температур воздуха (период промерзания) отдельные выходы подземных вод промерзают, в результате объем разгрузки подземного потока сокращается. По данным моделирования, уменьшение дебита ист. Ерюю (до 3755 м³/сут) происходит до марта. Одновременно с этим в водоносном пласте увеличивается давление, о чем свидетельствует повышение пьезометрического уровня подземных вод в скважине. В марте при продолжающемся росте гидростатического давления в межмерзлотном талике, на ослабленных участках подземные воды под напором прорывают промерзший грунт и устремляются наружу, увеличивая объем их разгрузки.

В переходный период в зоне разгрузки происходит частое чередование замерзания воды, изливающейся на поверхность, таяние наледи и про-

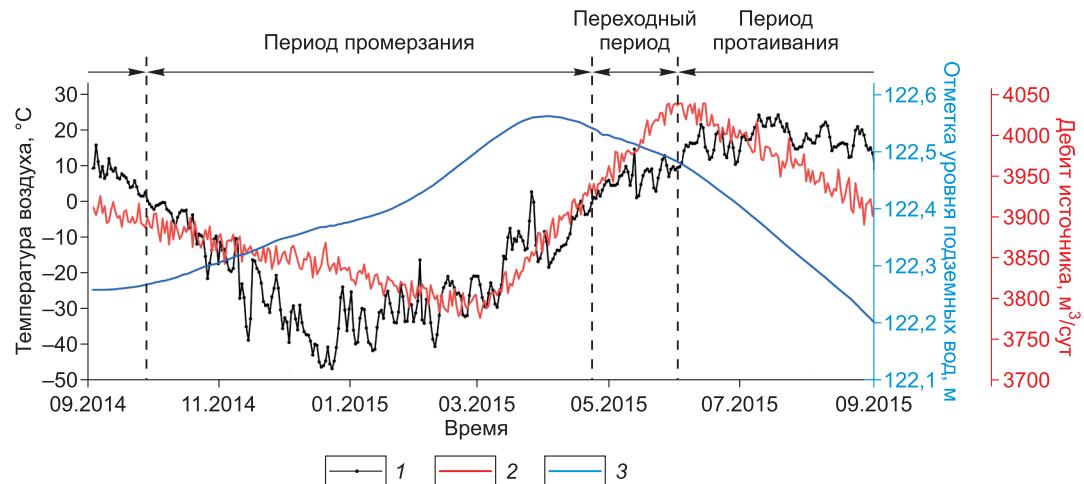


Рис. 6. Среднесуточный расход родников и кривая температуры с 1 сентября 2014 года по 1 сентября 2015 года. 1 – температура воздуха; 2 – дебит родника; 3 – отметка уровня подземных вод в скважине 14Е

Fig. 6. Average daily spring discharge and air temperature curve from September 1, 2014, to September 1, 2015. 1 – air temperature; 2 – spring discharge rate; 3 – groundwater level in borehole 14E

таивание песков на склонах распадка источника Ерюю. Освобождение выходов подземных вод от наледи и интенсивное промывание пород на склонах способствует уменьшению напора межмерзлотных вод в талике. В это же время разрушается снежный покров. Из-за выровненного рельефа бестяхской террасы, а также низкой влажности песков зоны аэрации большая часть талых снеговых вод подвергается инфильтрации и стекает по кровле промерзших за зиму пород к ближайшим дренам. Часть подземных вод надмерзлотного стока смешивается с межмерзлотными водами в очагах разгрузки, что отражается в продолжающемся возрастании дебита источника Ерюю. По расчетным данным, его расход достиг максимального значения (4037 м³/сут) к началу июня 2015 г. и кратковременно стабилизировался.

В последующем до конца сентября (третий период) происходят синхронное понижение уровня межмерзлотных вод и уменьшение дебита источника. Атмосферные осадки и надмерзлотные воды деятельного слоя, по всей видимости, в этот период в питании межмерзлотных вод участвуют опосредованно, восполняя запасы воды в озерах.

Заключение

Результаты моделирования показали возможность применения трехмерной стандартной модели фильтрации грунтовых вод MODFLOW-USG, учитывающей изменения характеристик надмерзлотно-межмерзлотного водоносного комплекса

в разные сезоны года в районе Ерюю, что подтверждается сходимостью моделированных уровня подземных вод и расходов этого родника с наблюдаемыми данными. Согласно анализу данных измерений уровня воды в скважине 14Е/2014, расходжение между моделируемым и фактическим положением уровня подземных вод составило менее 0,1 м для более чем 90 % измерений.

В период 2007–2022 гг. наблюдалось уменьшение водобильности таликов на бестяхской террасе р. Лена. Понижение среднего годового уровня межмерзлотных вод со скоростью 0,07 м/год отражает долговременные изменения гидрологических условий на исследуемой территории, связанные с динамикой увлажненности территории.

Комплексный анализ изменения температуры воздуха, уровня воды в скважине 14Е и дебита источника Ерюю позволил оценить влияние различных природных факторов на формирование режима межмерзлотных подземных вод и внутригодовую изменчивость величины их разгрузки.

Измерение зимних дебитов наледеобразующих источников – процесс трудоемкий и экономически затратный из-за труднодоступности территории, технических сложностей оборудования наледных полигонов для мониторинговых наблюдений, невозможности систематических измерений объемов формирующейся наледи и т. п. Созданная и верифицированная геофильтрационная модель позволяет получить представление об особенностях сезонной динамики разгрузки

подземных вод и может быть использована для решения дальнейших прогнозных задач.

Список литературы / References

1. Пигузова В.М., Шепелев В.В. *Методика изучения наледей*. Якутск: Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН; 1975. 62 с.
2. Romanovskiy N.N. *Groundwater in the cryolithozone*. Moscow: Moscow University Press; 1983. 231 p. (In Russ.).
3. Hornum M.T., Hodson A.J., Jessen S., et al. Numerical modelling of permafrost spring discharge and open-system pingo formation induced by basal permafrost aggradation. *The Cryosphere*. 2020;14(12):4627–4651. <https://doi.org/10.5194/tc-14-4627-2020>.
4. Liao C., Zhuang Q. Quantifying the role of permafrost distribution in groundwater and surface water interactions using a three-dimensional hydrological model. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2017;49(1):81–100. <https://doi.org/10.1657/aaar0016-022>.
5. Liu W., Fortier R., Molson J., Lemieux J.M. Three-dimensional numerical modeling of cryo-hydrogeological processes in a river-talik system in a continuous permafrost environment. *Water Resources Research*. 2022;58(3):e2021WR031630. <https://doi.org/10.1029/2021wr031630>.
6. Riseborough D., Shiklomanov N., Etzelmüller B., et al. Recent advances in permafrost modelling. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2008;19:137–156. <https://doi.org/10.1002/ppp.615>.
7. Гриневский С.О. *Гидрогеодинамическое моделирование взаимодействия подземных и поверхностных вод*. М.: ИНФРА-М; 2012. 152 с.
8. Frampton A., Painter S.L., Destouni G. Permafrost degradation and subsurface-flow changes caused by surface warming trends. *Hydrogeology Journal*. 2013;21(1):271–280. <https://doi.org/10.1007/s10040-012-0938-z>.
9. Woo M.K., Kane D.L., Carey S.K., et al. Progress in permafrost hydrology in the new millennium. *Permafrost and Periglacial Processes*. 2008;19(2):237–254. <https://doi.org/10.1002/ppp.613>.
10. Штенгелев Р.С. *Гидрогеодинамические расчеты на ЭВМ: учебное пособие*. М.: Изд-во МГУ; 1994. 335 с.
11. Koch J.C., McKnight D.M., Neupauer R.M. Simulating unsteady flow, anabranching, and hyporheic dynamics in a glacial meltwater stream using a coupled surface water routing and groundwater flow model. *Water Resources Research*. 2011;47(5):W05530. <https://doi.org/10.1029/2010wr009508>.
12. Ge S., McKenzie J., Voss C., et al. Exchange of groundwater and surface-water mediated by permafrost response to seasonal and long-term air temperature variation. *Geophysical Research Letters*. 2011;38(14):L14402. <https://doi.org/10.1029/2011gl047911>.
13. Gaiolini M., Colombani N., Busico G., et al. Impact of boundary conditions dynamics on groundwater budget in the Campania region (Italy). *Water*. 2022;14(16):2462. <https://doi.org/10.3390/w14162462>.
14. Iwata Y., Hayashi M., Hirota T. Comparison of snowmelt infiltration under different soil-freezing conditions influenced by snow cover. *Vadose Zone Journal*. 2008;7(1):79–86. <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0089>.
15. Zhang T. Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Reviews of Geophysics*. 2005;43(4):RG4002. <https://doi.org/10.1029/2004rg000157>.
16. Павлова Н.А., Шепелев В.В., Галанин А.А. и др. Гидрохимия подземных вод надмерзлотно-межмерзлотного стока на участках их разгрузки (Центральная Якутия). *Водные ресурсы*. 2020;47(4):391–401. <https://doi.org/10.31857/S0321059620040124>.
17. Pavlova N.A., Shepelev V.V., Galanin A.A., et al. Groundwater hydrochemistry of suprapermafrost-intrapermafrost flow in their discharge areas in Central Yakutia. *Water Resources*. 2020;47(4):581–590. <https://doi.org/10.1134/S0097807820040119>.
18. Ефимов А.И. Незамерзающий пресный источник Улахан-Тарын в Центральной Якутии. В кн.: *Исследования вечной мерзлоты в Якутской республике*. М.: Изд-во АН СССР; 1952. Вып. 3. С. 60–105.
19. Efimov A.I. The Ulakhan-Taryn Unfreezing Freshwater Source in Central Yakutia. In: *Research on permafrost in Yakutia*. Moscow: USSR Academy of Sciences; 1952. Issue 3, pp. 60–105. (In Russ.).
20. Толстикhin O.N., Шепелев В.В., Никитина Н.М. и др. *Мерзлотно-гидрологические условия Восточной Сибири*. Новосибирск: Наука; 1984. 191 с.
21. Tolstikhin O.N., Shepelev V.V., Nikitina N.M., et al. *Permafrost hydrogeological conditions of Eastern Siberia*. Novosibirsk: Nauka; 1984. 191 p. (In Russ.).
22. Анисимова Н.П. *Криогидрохимические особенности мерзлой зоны*. Новосибирск: Наука; 1981. 153 с.
23. Anisimova N.P. *Cryohydrogeochemical features of the permafrost zone*. Novosibirsk: Nauka; 1981. 153 p. (In Russ.).
24. Павлова Н.А., Колесников А.Б., Ефремов В.С. и др. Химический состав подземных вод межмерзлотных таликов в Центральной Якутии. *Водные ресурсы*. 2016;43(2):353–363. <https://doi.org/10.7868/S0321059616020139>.
25. Pavlova N.A., Kolesnikov A.B., Efremov V.S., et al. Groundwater chemistry in intrapermafrost taliks in Central Yakutia. *Water Resources*. 2016;43(2):353–363. <https://doi.org/10.1134/S0097807816020135>.
26. Шепелев В.В., Ломовцева Н.С. Озера криолитозоны бестяхской террасы р. Лены и их взаимосвязь с подземными водами. В кн.: *Тематические и региональные исследования мерзлых толщ северной Евразии*. Якутск: Институт мерзлотоведения СО АН СССР; 1981. С. 106–115.
27. Shepelev V.V., Lomovtseva N.S. Lakes in the cryolithozone of the Bestyakhskaya Terrace along the Lena River and their interaction with groundwater. In: *Thematic and regional studies of permafrost in Northern Eurasia*. Yakutsk: Institute of Permafrost of the USSR Academy of Sciences; 1981, pp. 106–115. (In Russ.).
28. Шепелев В.В. *Родниковые воды Якутии*. Якутск: Якутское книжное изд-во; 1987. 127 с.

- Shepelev V.V. *Spring waters in Yakutia*. Yakutsk: Yakutskoe knizhnoe izdatel'stvo Publ.; 1987. 127 p. (In Russ.).
23. Шепелев В.В. *Надмерзлотные воды криолитозоны*. Новосибирск: Гео; 2011. 167 с.
- Shepelev V.V. *Suprapermafrost waters in the cryolithozone*. Novosibirsk: Geo; 2011. 167 p. (In Russ.)
24. Семерня А.А., Гагарин Л.А., Бажин К.И. Мерзлотно-гидрогеологические особенности участка распространения межмерзлотного водоносного комплекса в районе источника Ерюо (Центральная Якутия). *Криосфера Земли*. 2018;22(2):29–38. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(29-38\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(29-38))
- Semernea A.A., Gagarin L.A., Bazhin K.I. Cryohydrogeological features of the site of intrapermafrost aquifer distribution in the Eruu spring area (Central Yakutia). *Earth's Cryosphere*. 2018;22(2):29–38. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2\(29-38\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-2(29-38))
- sphere. 2018;22(2):26–34. (In Russ.) [https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2018-2\(26-34\)](https://doi.org/10.21782/EC2541-9994-2018-2(26-34))
25. Porter C., Howat I., Noh M.-J., et al. “ArcticDEM – Strips, Version 4.1”. Version 1. 2022: Harvard Dataverse. <https://doi.org/10.7910/DVN/C98DVS>.
26. Price D.T., McKenney D.W., Nalder I.A., et al. A comparison of two statistical methods for spatial interpolation of Canadian monthly mean climate data. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2000;101(2-3):81–94. [https://doi.org/10.1016/s0168-1923\(99\)00169-0](https://doi.org/10.1016/s0168-1923(99)00169-0).
27. Nitze I., Grosse G., Jones B.M., et al. Landsat-based trend analysis of lake dynamics across northern permafrost regions. *Remote Sensing*. 2017;9(7):640. <https://doi.org/10.3390/rs9070640>. <https://doi.org/10.3390/rs9070640>.

Об авторах

ЮЙ Мяо, аспирант, <https://orcid.org/0000-0003-3150-9152>, ResearcherID: ABB-3746-2021, Scopus Author ID: 57210574365, e-mail: hss_yumiao@126.com

ПАВЛОВА Надежда Анатольевна, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, ResearcherID: W-2163-2018, Scopus Author ID: 57188696296, SPIN: 8046-4220, e-mail: napavlova@mpi.ysn.ru

Вклад авторов

Юй М. – разработка концепции, методология, верификация данных, проведение статистического анализа, создание черновика рукописи, визуализация; **Павлова Н.А.** – ресурсное обеспечение исследования, редактирование рукописи, руководство исследованием, получение финансирования

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

YU, Miao, Post-graduate Student, <https://orcid.org/0000-0003-3150-9152>, ResearcherID: ABB-3746-2021, Scopus Author ID: 57210574365, e-mail: hss_yumiao@126.com

PAVLOVA, Nadezhda Anatolievna, Cand. Sci. (Geol. and Mineral.), Leading Researcher, <https://orcid.org/0000-0001-5473-7778>, Researcher ID: W-2163-2018, Scopus Author ID: 57188696296, SPIN: 8046-4220, e-mail: napavlova@mpi.ysn.ru

Authors' contribution

YU M. – conceptualization, methodology, validation, formal analysis, writing – original draft, visualization; **Pavlova N.A.** – resources, writing - review & editing, supervision, funding acquisition

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 23.06.2025

Поступила после рецензирования / Revised 24.07.2025

Принята к публикации / Accepted 04.08.2025