



РЕЗУЛЬТАТЫ СОВРЕМЕННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЧНОГО СТОКА НА ГОЛЬЦОВОМ ВОДОСБОРЕ РУЧЬЯ МОРОЗОВА (ВЕРХНЕКОЛЫМСКОЕ НАГОРЬЕ) ЗА 2025 ГОД

✉ Жунусова О.Р.¹, Нестерова Н.В.¹, Землянскова А.А.¹, Кудяков Э.Х.², Макарьева О.М.¹

¹ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

²МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

✉ zhun.oksana@gmail.com

В результате полевых исследований 2020-2025 гг., проводившихся на водосборе руч. Морозова (площадь 0.63 км²) Колымской водно-балансовой станции, полностью расположенного на гольцовом ландшафте, авторами получены данные наблюдений за температурами пород с термометрической скважины, уровнем и расходами воды, количеством жидких осадков, высотой снежного покрова. Проведено моделирование речного стока с использованием исторических (1968–1997) и современных данных наблюдений. Выполнена параметризация и верификация гидрологической модели Гидрограф. Показано, что использование новых геокриологических данных позволило улучшить результаты моделирования – среднее значение критерия эффективности Нэша-Сатклиффа увеличилось по сравнению с предыдущими работами с 0.52 до 0.68. Впервые получены данные о расходах воды на водосборе за современный период по результатам наблюдений. Проведено моделирование на часовом расчетном интервале за 2025 г.; значение критерия Нэша-Сатклиффа составило 0.72. Максимальный рассчитанный расход воды достиг 0.625 м³/с, наблюдаемый – 0.690 м³/с. Результаты признаны удовлетворительными. Полученные результаты демонстрируют возможность моделирования гольцовых водосборов на часовом расчетном интервале и подчеркивают значение натурных данных для совершенствования математических моделей.

Ключевые слова: *мерзлота, гольцовый пояс, гидрологическое моделирование, речной сток, Верхнеколымское нагорье, ручей Морозова*

Введение. Значительную роль в формировании речного стока в горных районах Магаданской области играют гольцовые ландшафты. По большей части лишенные растительного покрова и покрытые крупнообломочным субстратом они характеризуются высокой пористостью и водопроницаемостью пород, что определяет особый гидрологический режим на гольцах. В том числе это выражается небольшим временем добегания стока до замыкающего створа, которое при суточном разрешении затрудняет оценку паводковых явлений на таких водосборах.

Одним из типичных гольцовых водосборов является водосбор руч. Морозова. Его уникальность состоит в наличии продолжительного ряда комплексных наблюдений, проводимых в составе Колымской водно-балансовой станции с 1968 по 1997 гг. Однако после закрытия станции наблюдения за речным стоком не проводились. Отсутствие современных полевых данных затрудняет оценку реакции гидрологического режима водосборов, расположенных в гольцовых ландшафтах, на климатические изменения. Проведение новых полевых наблюдений, совместно с применением математических моделей, позволят количественно оценить динамику геокриологических и гидрологических характеристик в гольцовом ландшафте, характерном для всей территории Северо-Востока России.

Материалы и методы. Полевые наблюдения на водосборе руч. Морозова. Водосбор руч. Морозова (площадь – 0.63 км²) полностью расположен в гольцовом ландшафте и покрыт каменной осыпью.

Специальные наблюдения на водосборе руч. Морозова проводились с 1968 по 1997 гг. Они включают в себя наблюдения за речным стоком, осадками, температурой воздуха, а также наблюдения за характеристиками снежного покрова в ходе снегомерных съемок.

Гидрологический пост был оборудован треугольным водосливом с углом выреза 90°, который сохранился до настоящего времени и потенциально может быть использован для измерения расходов воды.

В июле 2025 г. на месте исторического поста руч. Морозова в лотке водослива был установлен гидростатический логгер уровня воды, регистрирующий давление ежечасно. В створе водослива была также установлена водомерная рейка. Данные по рейке фиксируются каждые 4 часа установленной напротив нее фотоловушкой. В этот же период были получены часовые данные о температуре воздуха и осадках регистрируемые осадкомером.

Кроме того, вблизи границы водосбора оборудована термометрическая скважина «Гольцы» глубиной 15 м, по которой получены данные о температуре пород на разных глубинах [Макарьева и др., 2024]. Среднегодовая температура на глубине 15 м за период 2023-2025 гг. составила $-3.8 \pm 0.2^\circ\text{C}$. Возле скважины также производятся наблюдения за высотой снежного покрова с помощью фотоловушки и снегомерной рейки [Землянскова и др., 2024].

Моделирование речного стока. На основе полевых данных была проведена параметризация и верификация гидрологической модели Гидрограф [Виноградов, 1988]. Ее особенность состоит в учете процессов протаивания и промерзания при моделировании стока. Описание метода расчета динамики тепловой энергии, используемой в модели, приведено в работе [Виноградов и др., 2015].

Параметры растительности и поверхности склона приняты из работ [Макарьева и др., 2020; Лебедева и др., 2015]. Параметры породы назначались согласно описаниям Т.А. Банцекиной [2003]. В качестве граничных условий для моделирования процессов теплопроводности использовался годовой ход температуры пород на основе данных наблюдений на глубине 15 м с термометрической скважины Гольцы.

Верификация модели проводилась на суточном интервале за период 1968-1997 гг. В качестве входных метеорологических данных были использованы температура и дефицит влажности воздуха с метеостанции Колымская (абс. высота – 850 м) с применением высотных градиентов. Дополнительно использовались данные температуры воздуха с термографа, установленного у поста руч. Морозова. Количество осадков задавалось с использованием данных с осадкомера на водосборе руч. Морозова (абс. высота – 1200 м), а также с метеостанции Колымская с введением поправочных коэффициентов: 1.22 (жидкие осадки), 1.4 (твердые).

Моделирование речного стока в современных климатических условиях проводилось за период наличия данных о количестве осадков и речном стоке – 24.07.2025-13.09.2025. Использовались часовые данные о количестве и продолжительности осадков и температуре воздуха с осадкомера, установленного на водосборе руч. Морозова. Дефицит влажности задавался по 8-срочным данным с метеостанции Колымская, интерполированным линейно до часовых.

Результаты. Восстановление расходов воды на руч. Морозова по данным полевых работ.

Для оценки результатов моделирования расчетный гидрограф стока сравнивался с данными натурных наблюдений. Для этого подготовлены данные о расходах воды по имеющимся данным с логгера уровня воды. Уровень воды по логгеру был приведен к уровню воды по водомерной рейке.

Ноль рейки установлен на уровне гребня водослива. Таким образом, значение, отсчитываемое по рейке, является величиной напора, по которой можно рассчитать расход воды с помощью формулы для тонкостенного треугольного водослива с углом выреза 90°:

$$Q = 1.4 \cdot H^{5/2},$$

где Q – расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$, H – величина напора, м.

Результаты моделирования стока руч. Морозова. Величины годового водного баланса и критерия эффективности Нэша–Сатклиффа, полученные в результате моделирования за период 1968–1997 гг., представлены в табл. 1. Слой осадков на площади водосбора составил 480 мм, испарение – 77 мм. Рассчитанный среднемноголетний слой стока ниже наблюдаемого (451 мм) на 9.5% и составляет 408 мм. Значение критерия NS за период 1969–1997 гг. составило 0.68 (медиана – 0.72), что выше, чем в предыдущих работах – 0.52 (среднее и медиана) [Макарьева и др., 2020], и свидетельствует о существенном повышении качества моделирования при использовании новых натурных геокриологических данных. Также рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока руч. Морозова имеют хорошую сходимость. На рис. 1 представлено сравнение наблюдаемого и рассчитанного гидрографа со значением критерия NS 0.67 за 1992 г.

Таблица 1. Рассчитанные и наблюдаемые величины годового водного баланса и значения критерия эффективности Нэша–Сатклиффа за период 1969–1997 гг.

Рассчитанный слой стока, мм	408
Наблюдаемый слой стока, мм	451
Рассчитанный слой осадков, мм	480
Рассчитанный слой испарения, мм	77
Критерий эффективности Нэша–Сатклиффа (среднее/медиана)	0.68/0.72

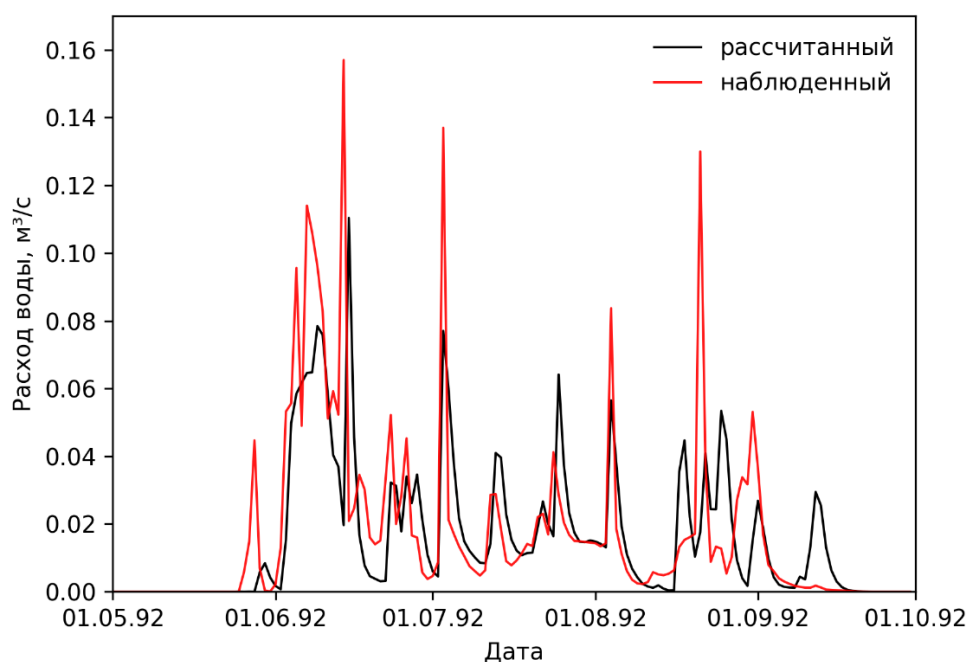


Рис. 1. Пример рассчитанного гидрографа стока руч. Морозова со средним значением критерия NS = 0.67 (1992 год).

Удовлетворительные результаты моделирования стока за исторический период позволяют провести расчет речного стока за 2025 г. На рис. 2 представлено сравнение рассчитанного и наблюдаемого гидрографов стока на часовом временном интервале. Гидрографы совпадают как по амплитуде значений, так и по фазе. Максимальный рассчитанный расход воды 30 июля 2025 г. в 14 часов составил $0.625 \text{ м}^3/\text{с}$, наблюдаемый – $0.690 \text{ м}^3/\text{с}$ 30 июля 2025 г. в 15 часов. Критерий NS за период моделирования составил 0.72. Таким образом результаты моделирования признаны удовлетворительными.

Использование современных гидрометеорологических и геокриологических наблюдений существенно улучшает результаты моделирования речного стока. Полученные результаты демонстрируют, что при наличии данных о количестве осадков модель, учитывающая тепловой режим пород, адекватно воспроизводит часовые

гидрографы стока, что особенно важно для водосборов гольцового пояса с малым временем добегания. Результаты полезны для оптимизации краткосрочных гидрологических прогнозов в горных районах криолитозоны, а также совершенствования параметризации моделей для гольцовых ландшафтов.

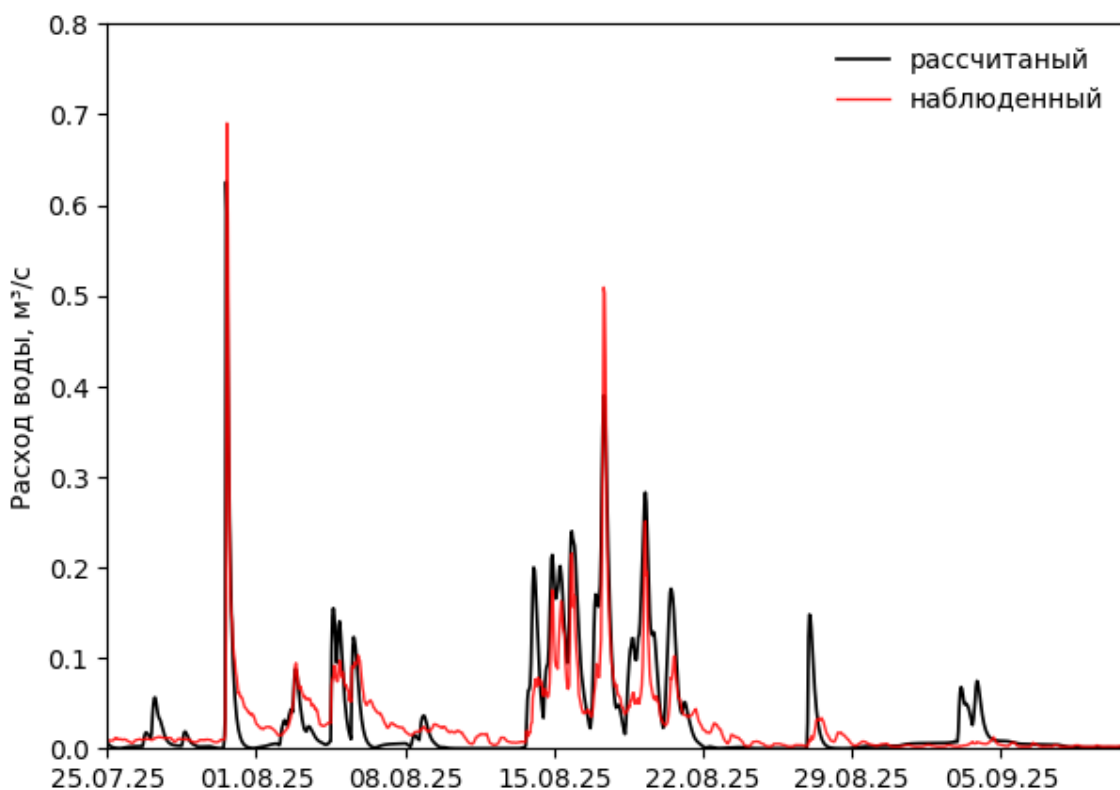


Рис. 2. Сравнение рассчитанного и наблюдаемого часовых гидрографов стока ручья Морозова, 2025 г.

ЛИТЕРАТУРА

Банцеекина Т.В. Особенности гидротермического режима слоя сезонного протаивания крупнообломочных склоновых отложений в весенне-летний период: На примере Верхнеколымского нагорья: диссертация ... кандидата географических наук: 25.00.08. — Якутск, 2003. 137 с.

Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока: опыт критического анализа. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.

Виноградов Ю.Б., Семенова О.М., Виноградова Т.А. Гидрологическое моделирование: метод расчета динамики тепловой энергии в почвенном профиле (Часть 1) // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 1. С. 11–21.

Землянкова А.А., Макарьева О.М., Никитина П.А., Волгина А.Д., Герасимов В.К. Динамика снежного покрова на территории магаданской области // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-Запада России. 2024. №. 11. С. 539-545. doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-539-545

Лебедева Л.С., Семенова О.М., Виноградова Т.А. Расчет глубины сезонноталого слоя в условиях различных ландшафтов Колымской водно-балансовой станции на основе гидрологической модели" Гидрограф"(Часть 2) // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. №. 2. С. 35-44.

Макарьева О.М., Абрамов Д.А., Землянкова А.А., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Температура многолетнемерзлых пород Верхнеколымского нагорья по данным

термометрических скважин за 2021–2022 гг. // Криосфера Земли. 2024. Т. 28, № 3. С. 19–32. doi: 10.15372/KZ20240302

Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока на малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водно-балансовой станции) // Криосфера Земли. 2020. № 1. С. 43–56. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(43-56)

RESULTS OF MODERN OBSERVATIONS AND RUNOFF MODELLING FOR THE MOROZOVA CREEK ROCKY TALUS CATCHMENT IN 2025

Zhunusova O.R.¹, Nesterova N.V.¹, Zemlyanskova A.A.¹, Kudiyakov E.Kh.², Makarieva O.M.¹

¹State Hydrological Institute, St. Petersburg, Russia

²Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

During field studies conducted in 2020–2025 on the Morozova Creek catchment (area 0.63 km²) of the Kolyma Water-Balance Station, which is fully located within a rocky talus (goltsy) landscape, new observational data were obtained on ground temperature from a thermometric borehole, water level and discharge, liquid precipitation, and snow depth. Runoff modelling was carried out using historical data (1968–1997) together with modern observations. The Hydrograph model was parameterized and verified. The use of new geocryological data improved model performance: the mean Nash–Sutcliffe efficiency increased from 0.52 (reported in earlier studies) to 0.68. For the first time, discharge data for the catchment were obtained for the contemporary period based on field observations. Runoff modelling was carried out on an hourly time step for 2025; the Nash–Sutcliffe efficiency reached 0.72. The maximum simulated discharge was 0.625 m³/s, while the observed value reached 0.690 m³/s. The results are satisfactory. These findings demonstrate the possibility of modelling rocky talus catchments at an hourly resolution and highlight the importance of field observations for improving hydrological models.

Keywords: *permafrost, Goletz belt, hydrological modeling, river runoff, Upper Kolyma Highlands, Morozov Creek*

REFERENCES:

Bantsekina T.V. Spring-Summer Thermal Regime of the Active Layer in Slope Talus (a Case Study of the Upper Kolyma Plateau). Candidate Thesis, Geography, Yakutsk, 2003. P.137 (in Russian).

Vinogradov Yu.B., Hydrological Modeling. An Experience of Critical Analysis. Gidrometeoizdat, Leningrad. 1988. P. 312 (in Russian).

Vinogradov Yu.B., Semenova O.M., Vinogradova T.A. Hydrological Modelling: The Approach To Simulation Of Heat Dynamics In Soil Profile (Part 1) // Earth's Cryosphere. — 2015. – V. 19, N 1. – P. 11–21.

Zemlianskova A.A., Makarieva O.M., Nikitina P.A., Volgina A.D., Gerasimov V.K. Snow cover dynamics in the Magadan region // Relief and Quaternary deposits of the Arctic, Subarctic and North-West Russia. 2024. Issue 11. P. 539–545. doi: 10.24412/2687-1092-2024-11-539-545

Lebedeva L.S., Semenova O.M., Vinogradova T.A. Calculations Of Seasonal Thawing Depth In Different Landscapes Of The Kolyma Water-Balance Station By Means Of Hydrological Model “Hydrograph” (Part 2) // Earth's Cryosphere. 2015. Vol. 19. N 2. P. 35–44.

Makarieva O.M., Abramov D.A., Zemlianskova A.A., Ostashov A.A., Nesterova N.V. Permafrost Temperature In The Upper Kolyma Highland According To The Data Of Thermometric Boreholes 2021–2022. Earth's Cryosphere. 2024. Vol. 28, N 3. P. 19–32. doi: 10.15372/KZ20240302

Makarieva O.M., Lebedeva L.S., Vinogradova T.A. Modelling Of Runoff Formation Processes At Small Mountain Watersheds In The Permafrost Zone (By The Data Of The Kolyma Water Balance Station) // Earth's Cryosphere. 2020. N 1. P. 43–56. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(43-56)