

Распространение гольцовых ландшафтов в бассейне р. Колымы и их влияние на речной сток

А. А. Землянскова¹, А. Н. Шихов^{1,2}, О. М. Макарьева¹,
О. Р. Жунусова¹, Н. В. Нестерова¹

¹ Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: and3131@inbox.ru

² Пермский государственный национальный исследовательский университет
Пермь, 614990, Россия

Гольцовые каменистые пустыни (гольцы) широко распространены в пределах горной криолитозоны. Они отличаются рядом особенностей процесса формирования речного стока и в связи с этим представляют интерес с точки зрения гидрологического моделирования и прогноза. В настоящей работе выполнены оценка точности выделения гольцов на основе шести различных спутниковых карт растительного покрова с пространственным разрешением от 10 до 230 м и картографирование их распространения в бассейне р. Колымы. Точность выделения гольцов оценивалась сравнением с ландшафтными картами для бассейнов р. Анмангынды и Колымской водно-балансовой станции. Максимальные значения F -меры (0,85 и 0,88) получены при выделении гольцов по данным GLC_FCS30D (англ. Global 30 m land-cover dynamic monitoring product with fine classification system) с размером пикселя 30 м. Установлено, что гольцы занимают 44 256 км² или 8,4 % площади бассейна р. Колымы. На основе многолетних данных об осадках по реанализу ERA5-Land и сети метеостанций, а также наблюдений за стоком за 1971–1990 гг. оценён вклад стока с гольцов в величину годового стока в бассейне р. Колымы. Величина коэффициента стока в гольцах была принята равной 0,95 на основе исторических данных наблюдений. Установлено, что доля площади гольцов от общей площади бассейна является более значимым предиктором для среднегодового слоя стока, чем средний уклон, но менее значимым, чем количество осадков по данным реанализа ERA5-Land. Результаты картографирования гольцов и оценки их вклада в формирование стока рек могут служить в качестве одного из предикторов паводковой опасности территории, в том числе и для бассейнов, по которым нет данных наблюдений за стоком.

Ключевые слова: бассейн р. Колымы, гольцовые ландшафты, спутниковые карты растительного покрова, реанализ ERA5-Land, гидрологические наблюдения, осадки, сток, коэффициент стока

Одобрена к печати: 19.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-188-203

Введение

Гольцовые ландшафты (гольцовые каменистые пустыни, гольцы) рассматриваются как отдельный высотный пояс, расположенный между горно-тундровым и перигляциальным поясами. Для гольцов характерны преобладание каменистых и щебнистых субстратов и несомкнутый растительный покров, в котором доминируют мхи и лишайники. Гольцы широко распространены в горах бореальной и умеренной зоны Евразии, особенно в пределах криолитозоны, в Восточной Сибири и на северо-востоке России (Куваев, 1985).

Формирование речного стока в гольцовых ландшафтах — важный элемент гидрологического режима горных районов криолитозоны (Банцекина, 2003; Бояринцев, 1988; Кузнецов, Насыбулин, 1970; Суцанский, 1999). Данный процесс представляет как научный, так и практический интерес с точки зрения прогнозирования дождевых паводков, которые в этих районах (в частности, в бассейне верхней части р. Колымы) могут иметь разрушительный характер. Согласно данным наблюдений на экспериментальных водосборах, для гольцовых ландшафтов характерно высокое (свыше 0,9) отношение слоя стока к слою осадков или коэффициент стока. Так, по данным многолетних наблюдений на руч. Морозова на Колымской

водно-балансовой станции (КВБС), где гольцы занимают 98 % площади водосбора, коэффициент стока достигал 0,95 (Макарьева и др., 2020), а по результатам измерений на хребте Сунтар-Хаята — 0,92 (Макарьева и др., 2019).

Характерной особенностью формирования стока с гольцов можно считать сезонное и межгодовое криогенное перераспределение стока. Гольцовый лёд, образующийся в каменных осыпях при замерзании талых вод на переохлаждённых обломках, аккумулирует талую воду в период снеготаяния. По косвенным оценкам (Банцекина, 2003), в гольцах КВБС каждую весну формируется 40–60 мм гольцового льда. Его таяние образует дополнительный сток в период летней межени как текущего, так и последующих годов, в результате чего слой стока с гольцов в летний период нередко может превышать слой осадков (Бояринцев и др., 2006; Makarieva et al., 2018). Вклад этого процесса в питание рек особенно значим в маловодные годы (Макарьева и др., 2019). Потепление климата приводит к деградации гольцового льда (Высоцкая, Медведков, 2024; Медведков, 2016) и существенно влияет на режим стока рек.

Одним из ключевых районов для исследования стока в гольцовых ландшафтах является КВБС, которая расположена в пределах водосбора руч. Контактного площадью 21,3 км² (Банцекина, 2003; Бояринцев, 1988; Бояринцев и др., 2006; Кузнецов, Насыбулин, 1970; Сушанский, 1999). Гольцы здесь распространены на высотах от 1000 до 1600 м и занимают около 34 % от площади водосбора (Makarieva et al., 2018). Ландшафты КВБС считаются репрезентативными для всего бассейна Верхней Колымы (Насыбулин, 1976), где значительная часть территории также занята гольцами. На КВБС находится единственный в мире экспериментальный водосбор, почти полностью лишённый растительности, — водосбор руч. Морозова, где в период с 1969 по 1997 г. велись непрерывные наблюдения за стоком.

Несмотря на обширный накопленный материал наблюдений за формированием стока с гольцов, до настоящего времени сохраняется неопределённость при описании данного процесса в гидрологических моделях (Лебедева, 2018). Среди ряда проблем в данной области можно выделить отсутствие корректных данных о площади, которая занята гольцами в бассейнах крупных рек. Такие оценки могут быть получены на основе спутниковых данных или тематических продуктов их обработки, что открывает перспективы их более качественного учёта в моделях формирования стока. В связи с этим представленное исследование направлено на решение двух задач — получение объективных данных о площади, занятой гольцами в бассейне р. Колымы, на основе тематических продуктов обработки спутниковых данных и приближённой оценки вклада гольцов в формирование стока рек.

Данные и методы

Оценка площади гольцов в бассейне р. Колымы

В качестве региона исследования был выбран бассейн р. Колымы до створа гидропоста Колымское-1. Площадь бассейна составляет 534 311 км², средняя высота — 557 м над уровнем моря, средний уклон в пределах бассейна — 8,2°. Средний многолетний расход воды в замыкающем створе равен 3210 м³/с (объём годового стока 101 км³).

В пределах бассейна р. Колымы до створа Колымское-1 было выделено 82 частных водосбора. Их замыкающими створами стали гидропосты, на которых велись наблюдения за стоком и уровнем воды в период с 1927 г. до настоящего времени (но на большинстве постов период наблюдения заканчивается в 1990-е гг.). Координаты постов и основные данные о них получены с ресурсов Росгидромета (http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_). Выделение границ водосборов выполнено с применением инструментов группы Гидрология в ArcGIS Spatial Analyst. В качестве исходного набора данных использована новейшая глобальная цифровая модель рельефа (ЦМР) EDTM (*англ.* Ensemble Digital Terrain Model) с шагом сетки 90 м (Ho et al., 2025), которая создана на основе объединения и коррекции нескольких глобальных ЦМР. Бассейны ручьёв площадью менее 5 км² были исключены из анализа в связи со значительными ошибками при их выделении по ЦМР. Для выделения площади, занятой гольцами в бассейне р. Колымы, использованы шесть различных

карт типов растительности и землепользования (*англ.* Land Cover/Land Use Map), созданных на основе спутниковых данных (*табл. 1*). Глубина проработки легенды этих карт (число выделенных классов) в основном обратно пропорциональна их пространственному разрешению — если на карте (Барталев и др., 2016) выделено 23 класса растительности и землепользования только в пределах территории России, то на карте ESA (*англ.* European Space Agency) WorldCover 2021 — 11 классов для всего мира. Исключением является карта GLC_FCS30D (*англ.* Global 30 m land-cover dynamic monitoring product with fine classification system), легенда которой содержит 35 классов растительности при размере ячейки 30 м.

Таблица 1. Основные характеристики использованных карт растительности и землепользования

| Название продукта | Размер пикселя, м | Источник данных (спутник и сенсор) | Год актуализации | Число классов | Ссылка |
|--|-------------------|------------------------------------|------------------|---------------|-------------------------|
| Карта растительности России | 230 | Terra и Aqua (MODIS) | 2023 | 23 | (Барталев и др., 2016) |
| Copernicus Moderate Dynamic Land Cover | 100 | PROBA-V (e2v), Sentinel-2 (MSI) | 2020 | 23 | (Buchhorn et al., 2020) |
| GLCLU-2019 | 30 | Landsat-8 (OLI) | 2019 | 19 | (Hansen et al., 2022) |
| ESA WorldCover 2021 | 10 | Sentinel-2 (MSI) | 2021 | 11 | (Zanaga et al., 2022) |
| Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series | 10 | Sentinel-2 (MSI) | 2024 | 11 | (Karra et al., 2021) |
| GLC_FCS30D | 30 | Landsat-8 (OLI) | 2022 | 35 | (Zhang et al., 2021) |

Примечание: GLCLU-2019 (*англ.* Global Land Cover and Land Use 2019), MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), PROBA-V (*англ.* PRoject for OnBoard Autonomy-Vegetation), MSI (*англ.* Multispectral Instrument), OLI (*англ.* Operational Land Imager).

Таблица 2. Классы растительности и землепользования, использованные для выделения гольцов

| Название продукта | Классы для выделения гольцов | Описание класса | Оценка точности выделения, % | Площадь гольцов, доля (в %) от S бассейна р. Колымы |
|--|--|---|-----------------------------------|---|
| Карта растительности России | Открытые грунты и выходы горных пород | Земли, суммарное проективное покрытие которых менее 20 % растительностью всех видов | Нет данных | 6,80 |
| Copernicus Moderate Dynamic Land Cover | Отсутствие растительности или редкая растительность; мхи и лишайники | Земли с открытой почвой, песком или камнями, на которых в любое время года растительный покров не превышает 10 %; мхи и лишайники | 94,5 (точность) | 0,23 |
| GLCLU-2019 | Пустыни и семиаридные участки | Земли, на которых доля открытой почвы больше 25 % | 79 (точность), 87 (полнота) | 6,60 |
| ESA WorldCover 2021 | Отсутствие растительности или редкая растительность | Земли с открытой почвой, песком или камнями, на которых в любое время года растительный покров не превышает 10 % | 92,1 (точность) | 1,19 |
| Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series | Отсутствие растительности или редкая растительность | Земли с открытой почвой, песком или камнями, на которых в любое время года растительный покров менее 10 % | Нет данных | 1,67 |
| GLC_FCS30D | Отсутствие растительности или редкая растительность | Нет данных | 77,38 (точность), 79,45 (полнота) | 8,43 |

Классы, соответствующие гольцам, представлены на всех картах. Они объединяют участки каменистых пустынь, полностью лишённые растительности или со слабо развитым растительным покровом из мхов и лишайников. Критерии, по которым выделяются лишённые растительности участки по разным картам растительности и землепользования, существенно различаются. Они приведены в документации этих карт и систематизированы в *табл. 2*. Различия в критериях выделения объясняют также многократную разницу в оценке площади гольцов в бассейне р. Колымы по разным данным — от 0,23 до 8,4 % от общей площади бассейна (*табл. 2*). Кроме того, в документации представлены оценки точности выделения разных классов. Ошибки ложного детектирования при выделении площадей, лишённых растительности, как правило, меньше, чем в среднем для всех классов. Однако значение полноты (*англ.* Recall), которое характеризует вероятность ошибки пропуска объектов, известно только для данных GLCLU-2019 и GLC_FCS30D.

Оценка достоверности выделения гольцов по тематическим продуктам (*табл. 1–2*) выполнена для территории двух речных бассейнов — КВБС (с площадью 21,3 км²) и бассейна р. Анмангынды до устья р. Тарым ($S = 412,2$ км²), для которых ранее было выполнено детальное картографирование типов местности и растительных ассоциаций на основе полевых обследований и дешифрирования высокодетальных спутниковых снимков с сервисов Google (Васильев, 2022, 2023). На этих картах, использованных в качестве проверочного набора данных, представлены 24 типа местности и растительных ассоциаций, в том числе «Пустыни горные эпилитно-лишайниковые каменистые с единичными кедровыми стланиками», соответствующие гольцам. Оценка точности выделения гольцов по разным тематическим продуктам выполнена стандартным способом на основе построения матрицы ошибок.

Гидрологические данные и материалы специальных наблюдений

Гидрологические наблюдения на территории Магаданской обл. выполняются Колымским управлением по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета. В 1980 г. в регионе измерения расходов воды проводились на 74 гидропостах, по состоянию на 2023 г. функционируют только 14 расходных постов. В связи с малым количеством данных за современный период, в настоящей работе использовались материалы за 1970–1990 гг., когда наблюдения велись на наибольшем количестве постов. Информация о расходе воды была оцифрована из Гидрологических ежегодников по 65 гидропостам, площадь которых составляет от 2,8 до 534 310 км². Из этих 65 постов выбраны 34, для которых данные наблюдений доступны более чем за половину лет из рассматриваемого периода.

В работе также используются данные о стоке руч. Морозова, правого притока руч. Контактного (КВБС), водосбор которого на 98 % покрыт глыбово-щебнистыми осыпями (гольцами). Его площадь составляет 0,63 км², диапазон высот — 1200–1690 м, средний уклон склонов — около 33°. Среднегодовое годовое количество стока за период 1971–1990 гг. равно 450 мм. Коэффициент стока (отношение слоя стока к осадкам) за период наблюдений в среднем составил 0,95, а в восьми случаях изменялся от 1,01 до 1,36. Коэффициент стока выше единицы указывает на то, что летом на водосборе дополнительный вклад в сток вносит таяние ранее накопленного гольцового льда.

Оценка компонентов водного баланса по данным реанализа и наблюдений

Данные реанализов ERA5 (Hersbach et al., 2020) и ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021) рассмотрены за период 1971–1990 гг., когда были доступны наблюдения за стоком по наибольшему числу постов. Из них были извлечены средние месячные значения основных компонентов водного баланса: осадков (*англ.* total precipitation), испарения (*англ.* total evaporation) и стока (*англ.* runoff) — и рассчитаны средние значения по бассейну р. Колымы и 82 входящим в него частным бассейнам, а также по участкам гольцов в каждом из этих бассейнов, где гольцы занимают площадь не менее 10 км². Поскольку данные ERA5-Land более детальны

(шаг сетки 10 км), а также для них меньше невязка водного баланса (разность между годовым слоем осадков и суммой слоёв испарения и стока), в дальнейшей работе использовались только они. Пространственное распределение средних годовых значений основных элементов водного баланса в бассейне р. Колымы по данным реанализа ERA5-Land показано на *рис. 1*.

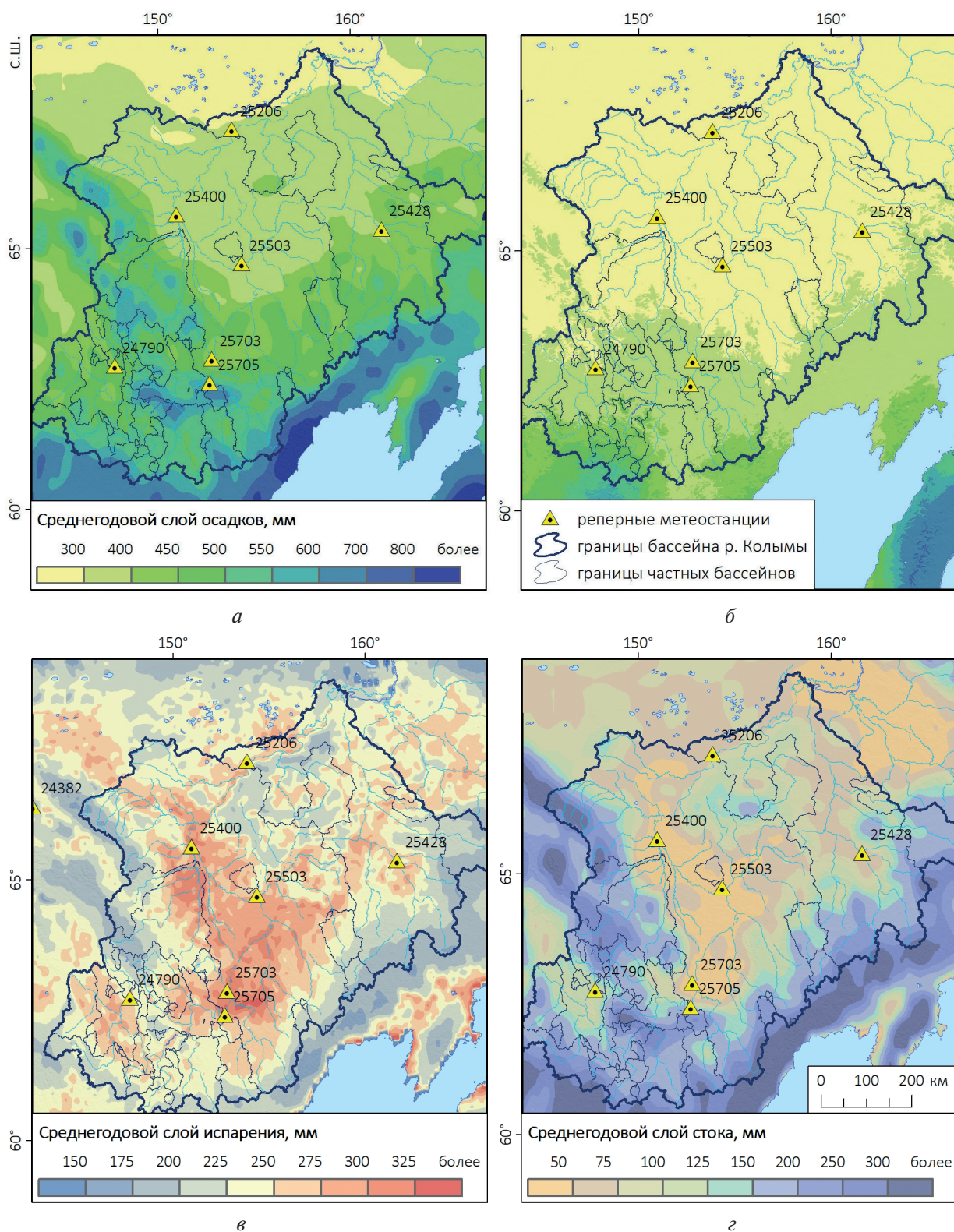


Рис. 1. Средние годовые значения компонентов водного баланса в бассейне р. Колымы за 1971–1990 гг.: а — слой осадков по данным ERA5-Land; б — слой осадков по данным WorldClim 2.0; в — слой испарения по данным ERA5-Land; г — слой стока по данным ERA5-Land

Оценка применимости данных ERA5-Land для изучаемого региона предполагала их сопоставление с данными наблюдений, а также с оценками, ранее представленными в литературе. Так, выполнено сопоставление средней за 1971–1990 гг. годовой суммы осадков по данным наблюдений и реанализа для 14 реперных метеостанций Росгидромета, из которых 7 находятся в пределах изучаемого бассейна, ещё 7 — вблизи его границ. Значения осадков по реанализу были извлечены из ближайшего узла сетки. Также выполнено сопоставление средней годовой суммы осадков по данным ERA5-Land с данными проекта WorldClim 2.0 Historical Climate Data (Fick, Hijmans, 2017), которые представляют собой результат интерполяции средней годовой суммы осадков по данным сети метеостанций с учётом рельефа, с шагом сетки ~1 км (см. *рис. 1б*). В проекте WorldClim 2.0 использован период осреднения 1970–2000 гг., что близко к рассматриваемому периоду 1971–1990 гг. Расхождение между годовой суммой осадков по данным метеостанций (1971–1990) и WorldClim 2.0 (1970–2000) не превышает 5 %.

Выполнено сопоставление среднегодового слоя стока по данным наблюдений с аналогичной величиной по данным реанализа. При этом рассматривались только бассейны, где наблюдения велись как минимум в течение 11 лет из рассматриваемого периода в 21 год. Также исключены бассейны ручьёв и малых рек ($S < 100 \text{ км}^2$), поскольку формирование стока на такой малой площади сильно зависит от локальных условий, которые не учитываются в реанализе. В итоге объём выборки сократился до 34 бассейнов.

Оценка вклада гольцов в сток рек бассейна р. Колымы выполнена для 57 бассейнов, в которых площадь гольцов превышает 10 км^2 . Из них только для 28 постов доступны данные наблюдений за стоком более чем за половину рассматриваемого периода (свыше 10 лет). Слой стока с гольцов оценивался по следующей формуле:

$$H_g = R_g S_g k,$$

где H_g — расчётный слой стока с гольцов, приведённый к площади бассейна (в мм); R_g — среднее годовое количество осадков, выпадающих на гольцах (в мм); S_g — доля площади гольцов в бассейне (в ед.); k — коэффициент стока с гольцов, принятый равным 0,95 согласно вышеописанным данным наблюдений. Расчёт был выполнен на основе суммы осадков как по данным ERA5-Land, так и по данным WorldClim 2.0.

Отношение H_g к среднегодовому слою стока H даёт вклад стока с гольцов в годовой слой стока. Величина \hat{H} найдена как по данным реанализа (для всей площади бассейна Колымы), так и по данным наблюдений для тех бассейнов, по которым эти данные доступны. Таким образом, получены две оценки вклада гольцов в годовой слой стока — отношение H_g/H , где обе величины вычислены по данным ERA5-Land, а также аналогичное отношение, где H_g рассчитана на основе данных WorldClim 2.0, а H определена по данным наблюдений.

Результаты и их обсуждение

Оценка площади гольцов в бассейне р. Колымы

Установленные значения метрик точности выделения гольцов по разным тематическим продуктам (*табл. 3*) указывают на то, что все продукты, полученные на основе данных Sentinel-2 (Copernicus Moderate Dynamic Land Cover, ESA WorldCover 2021 и Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series) многократно занижают площадь гольцов. Большая часть площади, которая согласно проверочным данным является гольцами, на этих картах отнесена к тундровой (травянистой и мохово-лишайниковой) растительности. Продукты на основе данных Landsat дают многократно более высокую точность оценки площади гольцов, в первую очередь продукт GLC_FCS30D, для которого F -мера составила 0,85 и 0,88 на проверочных участках КВБС и бассейна р. Анмангынды соответственно. Именно по этим данным была построена карта распространения гольцов в бассейне р. Колымы (*рис. 2*, см. с. 194). По данным CLCLU-2019 и карты растительности России также получена адекватная оценка площади гольцов, но с несколько более существенным занижением, чем по данным GLC_FCS30D.

Во всех случаях ошибки пропусков преобладают над ложным выделением гольцов, что указывает на некоторое занижение площади гольцов в сравнении с проверочными данными.



Рис. 2. Гольцы в бассейне р. Колымы по данным GLC_FCS30D (Hansen et al., 2022). 1 — бассейн р. Анмангынды, 2 — КВБС

Гольцы широко распространены в южной, западной и восточной части бассейна р. Колымы (см. рис. 2). Доля занятой ими площади в среднем по бассейну р. Колымы составляет 8,4 % (по данным GLC_FCS30D), увеличиваясь до 15,7 % в бассейне Верхней Колымы (до поста Оротук). В отдельных речных бассейнах площадью свыше 1000 км² доля гольцов достигает 48 %. Средняя абсолютная высота гольцов по данным ЦМР EDTM составляет 1125 м, а нижняя граница распространения находится на высотах 800–1000 м (к северу её высота несколько снижается). Для гольцов характерны значительные уклоны — в среднем 20,8°, при-

чём реальное значение может быть ещё выше, поскольку величина $20,8^\circ$ получена по ЦМР с размером пикселя 90 м. Таким образом, средние уклоны на участках гольцов в бассейне р. Колымы сопоставимы со значениями для экспериментального бассейна руч. Морозова (КВБС) (33°). Это позволяет считать условия в бассейне руч. Морозова репрезентативными для гольцовых ландшафтов бассейна р. Колымы.

Таблица 3. Оценка точности выделения гольцов по разным картам растительного покрова

| Название продукта | Тестовый участок | Площадь гольцов | | TP, км ² | TN, км ² | FP, км ² | FN, км ² | Precision | Recall | F-мера |
|--|------------------|-----------------|--------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-----------|--------|--------|
| | | Факт | Оценка | | | | | | | |
| Карта растительности России | КВБС | 7,33 | 2,99 | 2,82 | 14,17 | 0,17 | 4,50 | 0,94 | 0,39 | 0,55 |
| | Анмангында | 136,50 | 109,90 | 96,20 | 261,90 | 13,68 | 40,30 | 0,88 | 0,70 | 0,78 |
| Copernicus Moderate Dynamic Land Cover | КВБС | 7,33 | 0 | 0 | 14,34 | 0 | 7,33 | — | 0 | — |
| | Анмангында | 136,50 | 0,92 | 0,87 | 275,50 | 0,06 | 135,70 | 0,94 | 0,01 | 0,01 |
| CLCLU-2019 | КВБС | 7,33 | 5,09 | 4,77 | 14,02 | 0,32 | 2,56 | 0,94 | 0,65 | 0,77 |
| | Анмангында | 136,50 | 104,90 | 95,80 | 266,50 | 9,08 | 40,70 | 0,91 | 0,70 | 0,79 |
| ESA WorldCover 2021 | КВБС | 7,33 | 0 | 0 | 14,34 | 0 | 7,33 | 1,00 | 0 | 0 |
| | Анмангында | 136,50 | 0,65 | 0,65 | 275,60 | 0 | 135,90 | 1,00 | 0 | 0,01 |
| Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Time Series | КВБС | 7,33 | 1,18 | 1,17 | 14,33 | 0,01 | 6,16 | 0,99 | 0,16 | 0,28 |
| | Анмангында | 136,50 | 7,62 | 7,53 | 275,53 | 0,09 | 129,00 | 0,99 | 0,06 | 0,10 |
| GLC_FCS30D | КВБС | 7,33 | 6,38 | 5,81 | 13,78 | 0,56 | 1,51 | 0,91 | 0,79 | 0,85 |
| | Анмангында | 136,50 | 129,20 | 116,30 | 262,80 | 12,90 | 20,20 | 0,90 | 0,85 | 0,88 |

Примечание: TP — площадь совпадения гольцов, TN — площадь совпадения не гольцов, FP — ложное выделение гольцов, FN — пропуски гольцов, Precision — точность.

Сопоставление величин слоя осадков и стока по данным наблюдений и реанализа

По результатам сравнения годовой суммы осадков по реанализу ERA5-Land с данными метеостанций выявлено завышение значений в среднем на 40 %, что выше, чем в большинстве регионов России по ранее опубликованным данным (Григорьев и др., 2022). Наиболее существенное расхождение обнаружено для метеостанции Сусуман (на 62 %), минимальное — для метеостанции Среднекан (на 26 %). Похожие результаты получены при сравнении данных ERA5-Land с данными WorldClim 2.0 (в среднем по площади бассейна р. Колымы до створа Колымское-1 — на 46 %). Завышение осадков по реанализу относительно наблюдений может быть связано как с особенностями самих данных реанализа, так и с недоучётом твёрдых осадков на метеостанциях вследствие их выдувания (Сушанский, 2002). Значительное завышение характерно для метеостанций, расположенных в долинах рек (Сусуман, Оймякон), и может быть обусловлено тем, что в ячейку сетки реанализа ($0,1^\circ$) попадают как сами долины, так и прилегающие горы, где количество осадков значительно больше. Аналогичные результаты были получены ранее для максимальной за год высоты снежного покрова (Жунусова и др., 2025), причём наибольшие расхождения реанализа и данных наблюдений также установлены для метеостанции Сусуман.

При сопоставлении слоя стока по данным наблюдений и реанализа для речных бассейнов площадью свыше 100 км² выявлено, что завышение стока по реанализу значительно ниже, чем завышение осадков. Для бассейна Верхней Колымы (до створа с. Оротук) годовой слой стока составляет 236 и 264 мм по данным наблюдений и реанализа соответственно, тогда как

слой осадков в гольцах — 401 и 511 мм соответственно по данным WorldClim и реанализа. Это указывает в том числе на сильное завышение испарения по реанализу, что также подтверждается и при сравнении с ранее опубликованными результатами по бассейнам рек северо-востока России (Макарьева и др., 2019).

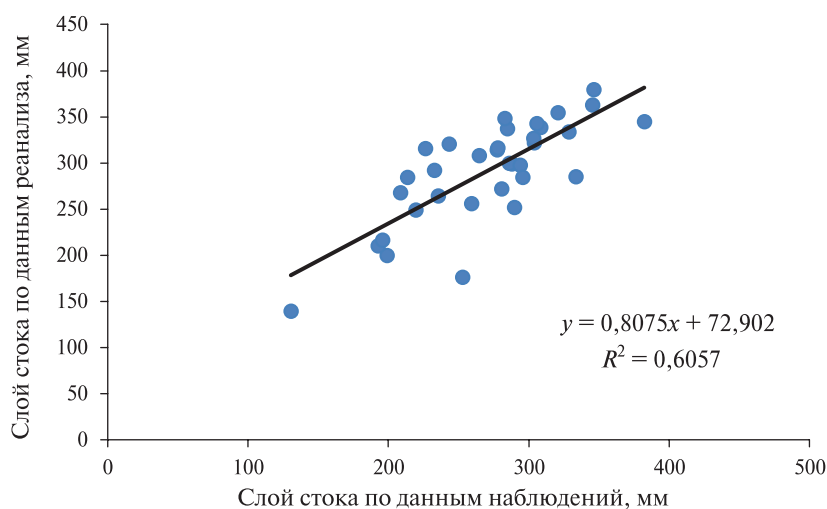


Рис. 3. Связь годового слоя стока по данным наблюдений и реанализа для 34 частных водосборов в бассейне р. Колымы

Если рассматривать отдельные частные бассейны, то на некоторых из них сток по данным реанализа существенно меньше, чем по данным наблюдений, тогда как на других наблюдается завышение в пределах 20–70 мм (рис. 3). Коэффициент корреляции Спирмена (R_S) между величиной среднегодового слоя стока по данным наблюдений и реанализа, рассчитанный для 34 бассейнов, составил 0,75.

Оценка значимости гольцов как предиктора среднего годового стока и вклада стока с гольцов в средний годовой сток

На рис. 4 (см. с. 197) показан расчётный слой стока с гольцов (в мм) и его вклад в общий годовой слой стока (в %). Обе величины получены на основе данных реанализа. Пространственное распределение обоих показателей соответствует распределению самих гольцов, а величина слоя стока с гольцов также определяется и годовой суммой осадков. Годовой слой стока с гольцов, рассчитанный по данным реанализа, достигает 400 мм и более на отдельных территориях в бассейне Верхней Колымы. Это близко к наблюдаемым значениям годового слоя стока в бассейне руч. Морозова, который в среднем за 1969–1996 гг. составил 453 мм.

Для бассейна р. Колымы до с. Оротук вклад стока с гольцов составил 28,9 % на основе данных реанализа и 25,4 % по данным WorldClim и наблюдений за стоком. Для наиболее изученного бассейна р. Анмангынды доля площади гольцов по данным GLC_FCS30D оценена в 33,4 % площади бассейна, а вклад их в общий слой стока — 51,4 % по данным об осадках ERA5-Land и 55,0 % по данным об осадках из проекта Worldclim 2.0. Для бассейна руч. Контактного на КВБС доля площади гольцов по данным GLC_FCS30D равна 30,1 % от общей площади бассейна, а их вклад в слой стока — 52,2 % согласно данным об осадках ERA5-Land и 39,1 % согласно данным об осадках Worldclim 2.0. Такое значительное расхождение обусловлено существенным занижением осадков по данным Worldclim 2.0 в сравнении с реанализом.

Выявлена умеренная статистически значимая корреляция ($R_S = 0,47$) между долей площади гольцов в бассейнах и среднегодовым слоем стока для 34 бассейнов, по которым данные наблюдений имеются как минимум за 11 лет. Корреляция между средним годовым стоком

и долей площади гольцов в бассейне выше, чем аналогичная корреляция со средним уклоном поверхности в бассейне ($R_S = 0,40$) и со средним годовым количеством осадков по данным WorldClim 2.0 ($R_S = 0,42$), но ниже, чем со среднегодовым количеством осадков по данным реанализа ($R_S = 0,68$).

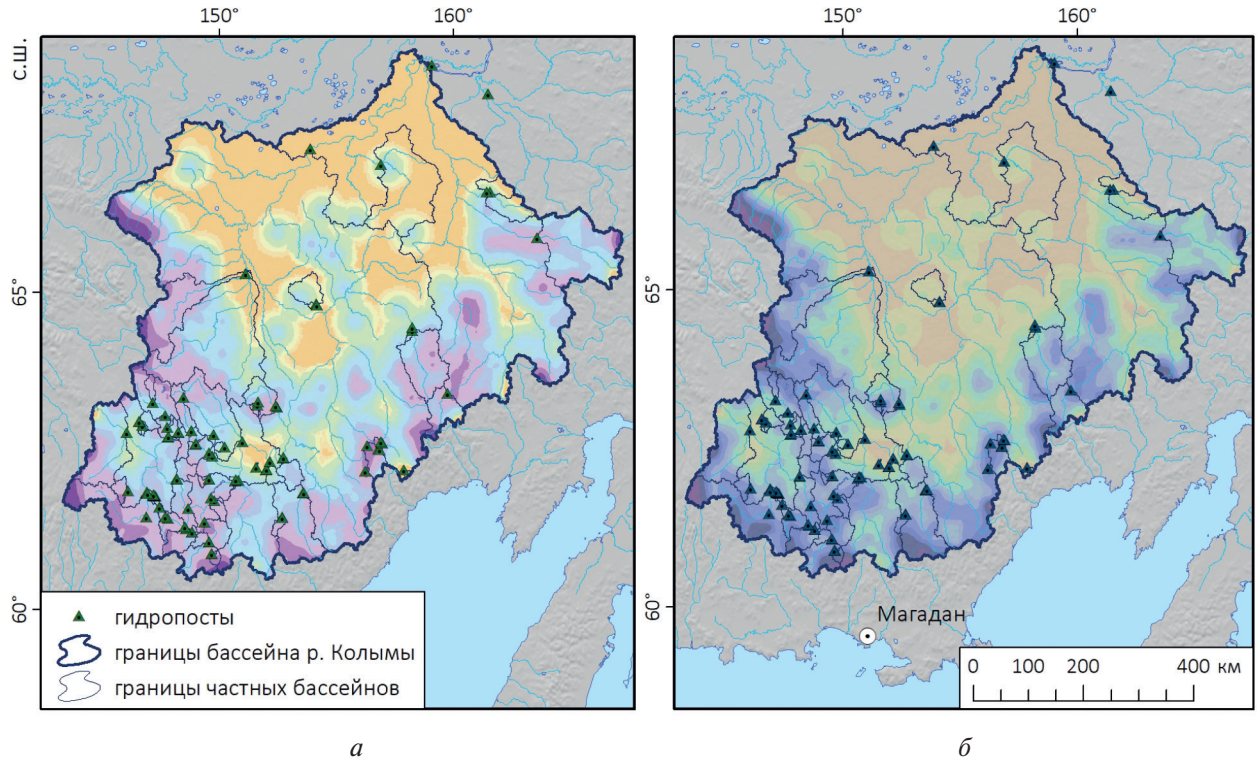


Рис. 4. Вклад гольцов в годовой слой стока по данным ERA5-Land: а — доля стока с гольцов от суммарного годового стока (в %); б — слой стока с гольцов (в мм)

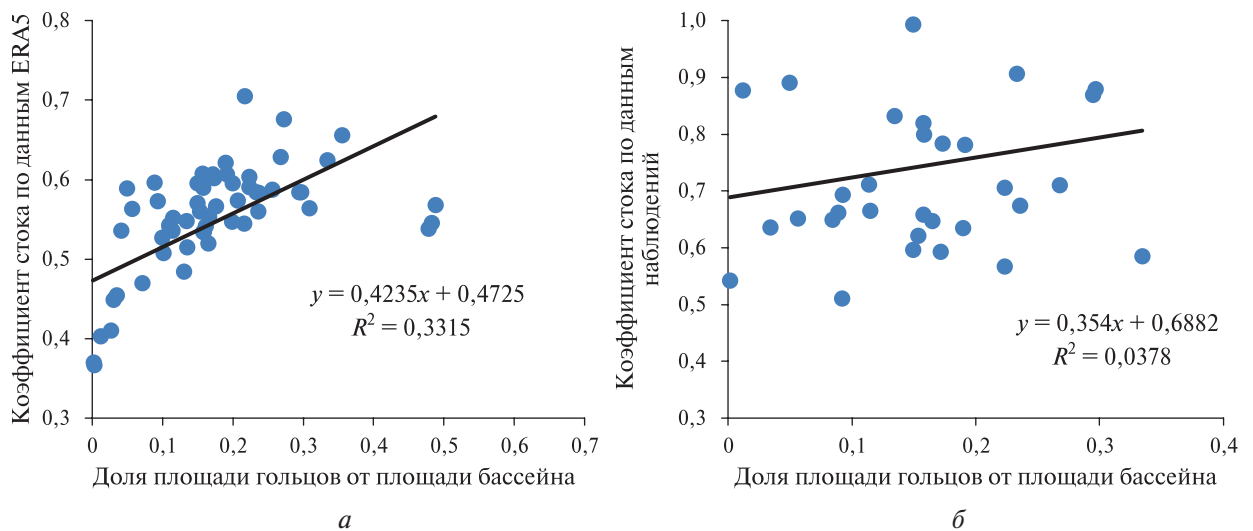


Рис. 5. Зависимость между расчётными значениями коэффициента стока и площадью гольцов в бассейне: а — для стока по данным ERA5-Land; б — для стока по данным наблюдений

Была построена множественная линейная регрессия среднегодового слоя стока (по данным наблюдений) от нескольких предикторов для этих 34 бассейнов. В качестве предикторов использованы доля площади гольцов в бассейне, средняя высота и уклон поверхности,

рассчитанные по ЦМР EDTM, годовая сумма осадков по данным WorldClim 2.0 и реанализа, а также годовой слой испарения по данным реанализа. В результате значение R^2 (доля объяснённой вариации наблюдаемого стока) составило 0,66. Достаточно высокая доля необъяснённой вариации (34 %) может объясняться наличием значительного числа пропусков в данных наблюдений за стоком, а также тем, что некоторые важные предикторы (такие как глубина сезонного протаивания пород или характеристики почвы) здесь не учитывались.

Также выполнен расчёт коэффициента стока по данным реанализа (для всех бассейнов) и по данным наблюдений за стоком и суммам осадков по данным WorldClim (для 34 выбранных бассейнов) и оценены зависимости коэффициента стока от доли площади, занятой гольцами в бассейне (рис. 5, см. с. 197). Обе зависимости статистически значимы, но указывают на наличие лишь умеренной корреляции между коэффициентом стока и долей площади гольцов в бассейне. Зависимость, полученная на основе данных реанализа, оказалась более сильной ($R_S = 0,54$), чем на основе данных наблюдений ($R_S = 0,39$). Это можно объяснить отсутствием во второй выборке бассейнов с высокой долей площади, занятой гольцами, так как не по всем таким бассейнам есть данные наблюдений за стоком. Таким образом, доля площади гольцов в бассейне не объясняет большую часть различий по величине коэффициента стока между рассматриваемыми бассейнами.

Заключение

В рамках настоящей работы впервые получена оценка распространения гольцовых ландшафтов в бассейне р. Колымы, которые покрывают 8,4 % от общей площади бассейна, и до 48 % на частных водосборах (если рассматривать только водосборы площадью свыше 100 км²). По результатам сравнения разных спутниковых карт растительного покрова наиболее подходящим для оценки площади гольцов оказался продукт GLC_FCS30D на основе снимков Landsat (Zhang et al., 2021). Точность оценки площади гольцов при сравнении с проверочными данными, выраженная в значении F -меры, оказалась достаточно высокой (0,88 и 0,85 для двух проверочных участков соответственно), при этом ошибки пропуска преобладают над ложным выделением. Сам по себе полученный результат уже важен для гидрологического моделирования, поскольку гольцы характеризуются специфическими условиями формирования стока, сильно отличающимися от других типов местности.

Неточности полученной оценки могут быть связаны с ошибочным отнесением к гольцам других типов поверхности, также лишённой растительного покрова, а именно участков разработки месторождений золота и угля, а также участков формирования наледей (наледных полян). Площадь земель, нарушенных при разработке полезных ископаемых в Магаданской обл., ранее оценивалась в 726 км² (Shikhov et al., 2023). Пересечение этого набора данных и выделенных участков гольцов показало, что 291 км² нарушенных земель отнесены в данных GLC_FCS30D к тому же классу, что и гольцы. Это составляет 0,65 % от общей площади гольцов в бассейне р. Колымы. В свою очередь, площадь пересечения между выделенными участками гольцов и наледными полянами, определёнными по базе данных (Makarieva et al., 2022), составляет 173,5 км² или 0,5 % от площади гольцов в бассейне. Таким образом, эти ошибки оказывают незначительное влияние на оценку площади гольцов. Суммарная площадь гольцов в бассейне р. Колымы с учётом этих поправок оценена в 44 256 км².

Вторым этапом работы была приближённая оценка стока с гольцов и его вклада в годовой слой речного стока, которая выполнена на основе двух источников данных об осадках (реанализ ERA5-Land и интерполированные данные наблюдений WorldClim), а также двух источников данных о стоке (реанализ ERA5-Land и данные наблюдений на постах). При этом выявлено завышение осадков по данным ERA5-Land относительно наблюдений более чем на 40 % и значительно меньшее завышение слоя стока (в бассейне Верхней Колымы в основном в пределах 10–20 %). Полученные по разным данным оценки вклада стока с гольцов в общий объём стока в бассейне р. Колымы хорошо коррелированы друг с другом. Для бассейна р. Колымы до с. Оротук вклад стока с гольцов составил 28,9 % на основе данных реанализа

и 25,4 % на основе данных WorldClim и наблюдений за стоком. В отдельных частных бассейнах в горной части водосбора р. Колымы на гольцах формируется более половины годового слоя стока. Например, для р. Анмангынды, 33,4 % бассейна которой покрыто гольцами, годовой слой стока с гольцов (в пересчёте на весь бассейн) составляет 286 мм при оценке по данным реанализа и 266 мм в год при оценке по данным WorldClim (в предположении величины коэффициента стока с гольцов, равной 0,95). Полученные оценки пространственного распределения гольцов и стока с них могут служить одним из предикторов паводковой опасности территории, в том числе (при использовании данных реанализа) и для бассейнов, где нет данных наблюдений за стоком.

Также на основе корреляционного анализа и построения множественной линейной регрессии оценена значимость доли площади гольцов в бассейнах в сравнении с другими предикторами годового стока рек (для 34 бассейнов площадью свыше 100 км², по которым есть данные наблюдений за стоком более чем за половину лет рассматриваемого периода). Доля площади гольцов оказалась вторым по значимости фактором, влияющим на годовой сток, после среднегодового количества осадков по данным реанализа ERA5-Land. Но в совокупности рассмотренные предикторы объясняют лишь 66 % различий по величине среднегодового слоя стока между рассматриваемыми бассейнами.

Основными ограничениями результатов становится неопределённость данных об осадках (существенное расхождение данных наблюдений и реанализа при очень редкой сети метеостанций), редкость сети гидропостов и неполные ряды данных, а также возможные различия по величине коэффициента стока, который был принят равным для всей площади гольцов. Очевидно, что оценку стока с гольцов по данным реанализа можно рассматривать как оценку по верхней границе, учитывая существенное завышение осадков относительно данных наблюдений.

Перспективы развития полученных результатов связаны как с их использованием при моделировании формирования стока в бассейне р. Колымы, так и с уточнением по современным данным. При этом малоизученным вопросом остаётся влияние потепления климата на сток с гольцов в криолитозоне, поскольку потепление приводит к деградации гольцового льда и, как следствие, к изменению процесса формирования стока.

Исследование выполнено при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета в рамках проекта «Разработка методики оперативного прогноза опасных гидрометеорологических явлений в условиях Дальневосточного федерального округа (на примере Магаданской области)» (Pure ID 131127765).

Литература

1. Банцеккина Т. В. Особенности гидротермического режима слоя сезонного протаивания крупнообломочных склоновых отложений в весенне-летний период на примере Верхнеколымского нагорья: дис. ... канд. геогр. наук. Якутск, 2003. 137 с.
2. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. Бояринцев Е. Л. Азональные факторы формирования дождевого стока на территории Колымской ВБС // Тр. ДВНИГМИ. 1988. Вып. 135. С. 67–93.
4. Бояринцев Е. Л., Сербов Н. Г., Попова Н. И. Формирование водного баланса весеннего половодья малых горных водосборов Верхней Колымы (по материалам Колымской воднобалансовой станции) // Вестн. Северо-Восточного науч. центра ДВО РАН. 2006. № 4. С. 12–19.
5. Васильев А. И. Ландшафты Колымской водно-балансовой станции // География и краеведение в Якутии и сопредельных территориях Сибири и Дальнего Востока: Материалы 2-й Всероссийской научно-практич. конф. к 100-летию Якутской Автономной Советской Социалистической Республики (ЯАССР). Якутск: ИМЗ СО РАН, 2022. С. 31–36.
6. Васильев А. И. Современное состояние ландшафтов водосборного бассейна реки Анмангынды // Устойчивость природ. и техн. систем криолитозоны в условиях изменения климата: Материалы Всероссийской конф. с международ. участием, посвященной 150-летию М. И. Сумгина. Якутск: ИМЗ СО РАН, 2023. С. 182–186.

7. *Высоцкая А. А., Медведков А. А.* Климатогенные изменения ландшафтов курумов на западе Средне-сибирского плоскогорья в зональных условиях средней тайги // *Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География*. 2024. Т. 79. № 4. С. 17–29. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.2.
8. *Григорьев В. Ю., Фролова Н. Л., Киреева М. Б., Степаненко В. М.* Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446. DOI: 10.31857/S2587556622030062.
9. *Жунусова О. Р., Землянскова А. А., Макарьева О. М. и др.* Сравнение данных реанализа ERA5-Land с прямыми измерениями характеристик снежного покрова в Магаданской области // *Лёд и снег*. 2025. Т. 65. № 4. С. 628–642. DOI: 10.7868/S2412376525040089.
10. *Куваев В. Б.* Холодные гольцовые пустыни в приполярных горах Северного полушария. М.: Наука, 1985. 80 с.
11. *Кузнецов А. С., Насыбулин Ш. С.* Особенности формирования стока на реках бассейна Верхней Колымы // *Сб. работ Магаданской гидрометеорол. обсерватории*. 1970. Вып. 3. С. 98–121.
12. *Лебедева Л. С.* Формирование речного стока в зоне многолетней мерзлоты Восточной Сибири: дис. ... канд. геогр. наук. Якутск, 2018. 125 с.
13. *Макарьева О. М., Нестерова Н. В., Лебедева Л. С., Виноградова Т. А.* Моделирование процессов формирования стока рек высокогорной криолитозоны Восточной Сибири (на примере хребта Сунтар-Хаята) // *География и природ. ресурсы*. 2019. № 1. С. 178–186. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-1(178-186).
14. *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. Т. 24. № 1. С. 43–56. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(43-56).
15. *Медведков А. А.* Как глобальное потепление меняет природу сибирской тайги? // *Природа*. 2016. № 12. С. 40–47.
16. *Насыбулин П. С.* Репрезентативность характеристик стока Колымской водно-балансовой станции для территории верхней Колымы // *Природные ресурсы Северо-Востока СССР*. Владивосток: АН ДВИС ИБПС, 1976. С. 32–41.
17. *Суцанский С. И.* Особенности формирования элементов, составляющих водный баланс, в бассейне руч. Морозова // *Колыма*. 1999. № 1. С. 33–40.
18. *Суцанский С. И.* История создания, методы, объекты и некоторые результаты исследований Колымской водно-балансовой станции // *Факторы формирования общего стока малых горных рек в Субарктике (по материалам Колымской водно-балансовой станции)* / под. ред. В. Е. Глотова, Н. В. Ухова. Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 2002. С. 18–35.
19. *Buchhorn M., Smets B., Bertels L. et al.* Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: Version 3 Globe 2015–2019: Product User Manual // <https://zenodo.org>. 08.09.2020. DOI: 10.5281/zenodo.3938963.
20. *Fick S. E., Hijmans R. J.* WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // *Intern. J. Climatology*. 2017. V. 37. Iss. 12. P. 4302–4315. DOI: 10.1002/joc.5086.
21. *Hansen M. C., Potapov P. V., Pickens A. H. et al.* Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data // *Environmental Research Letters*. 2022. V. 17. No. 3. Article 034050. DOI: 10.1088/1748-9326/ac46ec.
22. *Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al.* The ERA5 global reanalysis // *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.* 2020. V. 146. Iss. 730. P. 1999–2049. DOI: 10.1002/qj.3803.
23. *Ho Y.-F., Grohmann C. H., Lindsay J. et al.* GEDTM30: global ensemble digital terrain model at 30 m and derived multiscale terrain variables // *PeerJ*. 2025. V. 13. Article e19673. DOI: 10.7717/peerj.19673.
24. *Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z. et al.* Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning // *2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.* 2021. P. 4704–4707. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
25. *Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S.* Water balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997 // *Earth System Science Data*. 2018. V. 10. Iss. 2. P. 689–710. DOI: 10.5194/essd-10-689-2018.
26. *Makarieva O., Nesterova N., Shikhov A. et al.* Giant aufeis — unknown glaciation in North-Eastern Eurasia according to Landsat images 2013–2019 // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Iss. 17. Article 4248. DOI: 10.3390/rs14174248.
27. *Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al.* ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth System Science Data*. 2021. V. 13. Iss. 9. P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
28. *Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O. et al.* Satellite-based mapping of gold-mining-related land-cover changes in the Magadan region, northeast Russia // *Remote Sensing*. 2023. V. 15. Iss. 14. Article 3564. DOI: 10.3390/rs15143564.

29. *Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D. et al.* ESA WorldCover 10 m 2021 v200 // <https://zenodo.org/28.10.2022>. DOI: 10.5281/zenodo.7254221.
30. *Zhang X., Liu L., Chen X. et al.* GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery // *Earth System Science Data*. 2021. V. 13. Iss. 6. P. 2753–2776. DOI: 10.5194/essd-13-2753-2021.

Distribution of rocky talus in Kolyma River basin and its impact on river runoff

A. A. Zemlianskova¹, A. N. Shikhov^{1,2}, O. M. Makarieva¹,
O. R. Zhunusova¹, N. V. Nesterova¹

¹ *Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia*
E-mail: and3131@inbox.ru

² *Perm State University, Perm 614990, Russia*

Rocky talus (goltsy) is widespread within the mountain permafrost zone. They are characterized by several features of the runoff formation process and, therefore, are of interest for hydrological modeling and forecasting. In this study, the maps of spatial distribution of rocky talus in the Kolyma River basin have been developed based on six different satellite derived land cover/land use (LULC) products. The accuracy of rocky talus identification in these LULC products is assessed by comparison with landscape maps for the Anmangynda River basin and the Kolyma Water Balance Station (KWBS). The maximum *F*-measure values (0.88 and 0.85) were obtained when identifying rocky talus using Landsat-based Global 30 m land-cover dynamic monitoring product with fine classification system (GLC_FCS30D) data with a cell size of 30 m. It was found that rocky talus covers 44 256 km² or 8.4 % of Kolyma River basin area. Using long-term precipitation data from the ERA5-Land reanalysis and weather stations, as well as runoff observations for 1971–1990, the contribution of runoff forming on rocky talus to annual runoff in Kolyma River basin was estimated. The runoff/precipitation ratio in rocky talus was assumed to be 0.95 based on historical observation data. It was found that the proportion of the rocky talus area to the total basin area is a more significant predictor for the average annual runoff than the average slope, but less significant than the amount of precipitation according to the ERA5-Land data. The results of rocky talus mapping and assessing their contribution to the annual runoff can be one of the predictors of flood hazard, including ungauged basins.

Keywords: Kolyma River basin, rocky talus, satellite-derived land cover/land use maps, ERA5-Land reanalysis, hydrological observations, precipitation, runoff, runoff coefficient

Accepted: 19.12.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-188-203

References

1. Bantsekina T. V., *Osobennosti gidrotermicheskogo rezhima sloya sezonnogo protaivaniya krupnooblomochnykh sklonovykh otlozhenii v vesenneletnii period na primere Verkhnekolym'skogo nagor'ya: Diss. ... kand. geogr. nauk* (Peculiarities of hydrothermal regime of seasonal thawing layer in coarsely clastic rocks during the spring summer period (with an example of Upper Kolyma highland): Cand. geogr. sci. thesis), Yakutsk, 2003, 137 p. (in Russian).
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAS, 2016, 208 p. (in Russian).
3. Boyarintsev E. L., Azonal factors of rainfall runoff formation in the territory of Kolyma Water Balance Station, *Trudy Dal'nevostochnogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo gidrometeorologicheskogo instituta*, 1988, V. 135, pp. 67–93 (in Russian).

4. Boyarintsev E. L., Serbov N. G., Popova N. I., Formation of the spring high-water balance in small catchments of the Upper Kolyma River mountainous areas (by the Kolyma water-balance station records), *Vestnik Severo-Vostochnogo nauchnogo tsentra DVO RAN*, 2006, No. 4, pp. 12–19 (in Russian).
5. Vasil'ev A. I., Landscapes of the Kolyma Water Balance Station, *Geografiya i kraevedenie v Yakutii i sopredel'nykh territoriyakh Sibiri i Dal'nego Vostoka: Materialy 2-i Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii k 100-letiyu Yakutskoi Avtonomnoi Sovetskoi Sotsialisticheskoi Respubliki (YAASSR)* (Geography and local history in Yakutia and adjacent territories of Siberia and the Far East: Proc. 2nd All-Russia Scientific and Practical Conf. to the 100th anniversary of the Yakut Autonomous Soviet Socialist Republic (YASSR)), Yakutsk: IMZ SO RAN, 2022, pp. 31–36 (in Russian).
6. Vasil'ev A. I., Current state of the landscapes in the Anmangynda River basin, *Ustoichivost' prirodnykh i tekhnicheskikh sistem kriolitozony v usloviyakh izmeneniya klimata: Materialy Vserossiiskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoi 150-letiyu M. I. Sumgina* (Environmental and infrastructure integrity in permafrost regions in the conditions of climate change: Proc. of Russian conf. with international participation on the occasion of 150th anniversary of M. I. Sumgin), Yakutsk: IMZ SO RAN, 2023, pp. 182–186 (in Russian).
7. Vysotskaya A. A., Medvedkov A. A., Climate-driven changes of kurum landscapes in the west of the Central Siberian Plateau within the middle taiga zone, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya*, 2024, V. 79, No. 4, pp. 17–29 (in Russian), DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.79.4.2.
8. Grigor'ev V. Yu., Frolova N. L., Kireeva M. B., Stepanenko V. M., Spatial and temporal variability of ERA5 precipitation accuracy over Russia, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, V. 86, No. 3, pp. 435–446 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622030062.
9. Zhunusova O. R., Zemlyanskova A. A., Makarieva O. M. et al., Comparison of ERA5-Land reanalysis data with direct measurements of snow cover characteristics in the Magadan Region, *Ice and Snow*, 2025, V. 65, No. 4, pp. 628–642 (in Russian), DOI: 10.7868/S2412376525040089.
10. Kuvaev V. B., *Kholodnye gol'tsovye pustyni v pripolyarnykh gorakh Severnogo polushariya* (Cold char deserts in the circumpolar mountains of the Northern hemisphere), Moscow, 1985, 80 p. (in Russian).
11. Kuznetsov A. S., Nasybulin Sh. S., Features of the formation of runoff on the rivers of the Upper Kolyma basin, *Sbornik rabot Magadanskoi gidrometeorologicheskoi observatorii*, 1970, V. 3, pp. 98–121 (in Russian).
12. Lebedeva L. S., *Formirovanie rechnogo stoka v zone mnogoletnei merzloty Vostochnoi Sibiri: dis. ... kand. geogr. nauk* (Formation of river flow in the permafrost zone of Eastern Siberia: Cand. geogr. sci. thesis), Yakutsk, 2018, 125 p. (in Russian).
13. Makarieva O. M., Nesterova N. V., Lebedeva L. S., Vinogradova T. A., Modelling runoff formation processes in the high-mountain permafrost zone of Eastern Siberia (a case study of Suntar-Khayata range), *Geografiya i Prirodnye Resursy (Geography and Natural Resources)*, 2019, No. 1, pp. 178–186 (in Russian).
14. 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, V. 24, No. 1, pp. 37–48, DOI: 10.21782/EC2541-9994-2020-1(37-48).
15. Medvedkov A. A., How is global warming changing the nature of the Siberian taiga?, *Priroda*, 2016, No. 12, pp. 40–47 (in Russian).
16. Nasybulin P. S., The representativity of runoff characteristics at the Kolyma water-balance station for the upper Kolyma area, In: *Prirodnye resursy Severo-Vostoka SSSR* (Natural resources of the USSR North-East), Vladivostok, AN DVIS IBPS, 1976, pp. 32–41 (in Russian).
17. Sushchanskii S. I., Features of the formation of the elements that make up the water balance in the Morozova river basin, *Kolyma*, 1999, No. 1, pp. 33–40 (in Russian).
18. Sushchanskii S. I., History of creation, methods, objects and some results of studies in the Kolyma water balance station, In: *Faktory formirovaniya obshchego stoka malykh gornyykh rek v Subarktike (po materialam Kolymskoi vodno-balansovoi stantsii)* (Factors affecting the formation of a general drainage system of minor mountain rivers in subarctic areas (based on materials from the Kolyma water balance station)), Glotov V. E., Ukhov N. V. (eds.), Magadan, 2002, pp. 18–35 (in Russian).
19. Buchhorn M., Smets B., Bertels L. et al., *Copernicus Global Land Service: Land Cover 100m: Version 3 Globe 2015–2019: Product User Manual*, <https://zenodo.org>, 08.09.2020, DOI: 10.5281/zenodo.3938963.
20. Fick S. E., Hijmans R. J., WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas, *Intern. J. Climatology*, 2017, V. 37, Iss. 12, pp. 4302–4315, DOI: 10.1002/joc.5086.
21. Hansen M. C., Potapov P. V., Pickens A. H. et al., Global land use extent and dispersion within natural land cover using Landsat data, *Environmental Research Letters*, 2022, V. 17, No. 3, Article 034050, DOI: 10.1088/1748-9326/ac46ec.
22. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al., The ERA5 global reanalysis, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 2020, V. 146, Iss. 730, pp. 1999–2049, DOI: 10.1002/qj.3803.
23. Ho Y.-F., Grohmann C. H., Lindsay J. et al., GEDTM30: global ensemble digital terrain model at 30 m and derived multiscale terrain variables, *PeerJ*, 2025, V. 13, Article e19673, DOI: 10.7717/peerj.19673.

24. Karra K., Kontgis C., Statman-Weil Z. et al., Global land use/land cover with Sentinel 2 and deep learning, *2021 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2021, pp. 4704–4707, DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
25. Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S., Water balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997, *Earth System Science Data*, 2018, V. 10, Iss. 2, pp. 689–710, DOI: 10.5194/essd-10-689-2018.
26. Makarieva O., Nesterova N., Shikhov A. et al., Giant Aufeis — unknown glaciation in North-Eastern Eurasia according to Landsat images 2013–2019, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, Iss. 17, Article 4248, DOI: 10.3390/rs14174248.
27. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al., ERA5-land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth System Science Data*, 2021, V. 13, Iss. 9, pp. 4349–4383, DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.
28. Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O. et al., Satellite-based mapping of gold-mining-related land-cover changes in the Magadan region, northeast Russia, *Remote Sensing*, 2023, V. 15, Iss. 14, Article 3564, DOI: 10.3390/rs15143564.
29. Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D. et al., ESA WorldCover 10 m 2021 v200, <https://zenodo.org>, 28.10.2022, DOI: 10.5281/zenodo.7254221.
30. Zhang X., Liu L., Chen X. et al., GLC_FCS30: global land-cover product with fine classification system at 30 m using time-series Landsat imagery, *Earth System Science Data*, 2021, V. 13, Iss. 6, pp. 2753–2776, DOI: 10.5194/essd-13-2753-2021.