

**ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ
СТОКА РЕК КРИОЛИТОЗОНЫ В
УСЛОВИЯХ ГОРНОДОБЫВАЮЩЕЙ
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ В РЕЧНЫХ
ДОЛИНАХ (НА ПРИМЕРЕ ДОБЫЧИ
ЗОЛОТА В БАСЕЙНЕ Р. СУСУМАН,
МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)**

П.А. Никитина¹, А.Н. Шихов²,
О.М. Макарьева^{3,1}, А.А. Землянская^{3,1},
Н.В. Нестерова^{1,4}

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

²Пермский государственный национальный
исследовательский университет, г. Пермь,
Россия;

³Северо-Восточный государственный
университет, г. Магадан, Россия;

⁴Государственный гидрологический
институт, г. Санкт-Петербург, Россия

nikitinapolina243@gmail.com

**THE PROCESSES OF RIVER RUNOFF
FORMATION IN THE PERMAFROST
ZONE PERMAFROST UNDER MINING
ACTIVITY IN RIVER VALLEYS (ON
THE EXAMPLE OF GOLD MINING IN
THE SUSUMAN RIVER BASIN, THE
MAGADAN REGION)**

Polina A. Nikitina¹, Andrey N. Shikhov²,
Olga M. Makarieva^{3,1},

Anastasiia A. Zemlianskova^{3,1},

Nataliia V. Nesterova^{1,4}

¹Saint Petersburg State University, St. Petersburg,
Russia;

²Perm State University, Perm,
Russia;

³Northeastern State University, Magadan,
Russia;

⁴State Hydrological Institute,
St. Petersburg, Russia

nikitinapolina243@gmail.com

Аннотация. Добыча золота на россыпных месторождениях Восточной Сибири и Дальнего Востока играет важную роль в экономике этих регионов. Магаданская область в данной отрасли занимает первое место в России. Однако увеличение объемов добычи сопровождается негативными последствиями для природной среды, включая изменение русел рек, уничтожение растительного покрова, увеличение мутности воды и др. Эти изменения могут стать источником опасных гидрометеорологических явлений, таких как паводки. Настоящее исследование посвящено оценке воздействия изменения климата и антропогенных факторов на формирование стока рек в Сусуманском районе, одном из центров золотодобычи в Магаданской области, с помощью математической модели «Гидрограф». Объектом исследования выбран бассейн реки Сусуман, где добыча золота и гидрометеорологические наблюдения начались в 30-х гг. прошлого века. По спутниковым данным Sentinel-2 доля нарушенных земель в

Abstract. Gold mining in placer deposits in Eastern Siberia and the Far East plays an important role in the economy of these regions. The Magadan region ranks first in Russia, in this industry. However, an increase in production volumes is accompanied by negative impact on the natural environment, including changes in riverbeds, destruction of vegetation, the increased water turbidity, etc. These changes can become a source of dangerous hydrometeorological phenomena such as floods. This study is devoted to assessing the impact of climate change and technogenic factors on the formation of river flow in the Susuman district, one of the gold mining centers in the Magadan region, using the Hydrograph mathematical model. The object of study was the Susuman River basin, where gold mining and hydrometeorological observations began in the 30s of the last century. According to Sentinel-2 satellite data, the proportion of mining-impacted lands in the Susuman river basin (up to the village of Tongora) is estimated at 8.8 % of the total area of the basin, including 3 % completely devoid of

Nikitina P. A., Shikhov A. N., Makarieva O. M., Zemlianskova A. A., Nesterova N. V. The processes of river runoff formation in the permafrost zone permafrost under mining activity in river valleys (on the example of gold mining in the Susuman river basin, the Magadan region). *Hydrosphere. Hazard processes and phenomena*, 2023, vol. 5, iss. 3, pp. 244–255. (In Russian; abstract in English). DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.244.

бассейне р. Сусуман (до п. Тонгора) оценена в 8,8 % от общей площади бассейна, в том числе 3 % полностью лишено растительности. На первом этапе исследований проведено моделирование процессов формирования стока в бассейне р. Сусуман за период 1966–1987 гг. без учета нарушенных территорий. Средний критерий Нэша-Сатклиффа за период моделирования составил 0,59, невязка годового слоя стока – 12 мм или 4 %. Результаты моделирования в значительной мере зависят от качества и репрезентативности входных метеорологических данных об осадках. Следующим этапом станет разработка параметров нарушенных ландшафтов и численных экспериментов по их верификации на основе гидрологической модели.

Ключевые слова: добыча золота; речной сток; нарушение земель; бассейн р. Сусуман; гидрологическая модель «Гидрограф».

Введение

Важным сектором экономики Восточной Сибири и Дальнего Востока является добыча золота на рудных и россыпных месторождениях. История развития отрасли в Магаданской области берет свое начало с 30-х гг. прошлого столетия. Рост объемов добычи россыпного золота сопровождается увеличением негативного воздействия на природную среду, в частности приводит к изменению морфологических и гидрографических характеристик водосборов рек [Lawtence et al., 2021]. Отсутствие системы мониторинга воздействия золотодобычи на окружающую среду в России не позволяет оценить масштабы экологических и экономических проблем, вызываемых такой деятельностью. Инвентаризация земель, подвергшихся воздействию, завершена только для бассейна р. Амур. На основе анализа данных дистанционного зондирования Земли показано, что площадь нарушенных земель составляет около 7 % площади бассейнов реки Амур (4200 км²), но оценка их влияния на сток не проводилась [Egidarev, Simonov, 2015]. В Магаданской области площадь земель,

vegetation. At the first stage of research, modeling of runoff formation processes in the Susuman river basin was carried out for the period 1966-1987 without taking into account mining-impacted areas. The average Nash-Sutcliffe criterion for the modeling period was 0.59 of the annual runoff layer is 12 mm or 4 %. Modeling results are highly dependent on the quality and representativeness of the input meteorological precipitation data. The next stage will be the development of parameters of mining-impacted landscapes and numerical experiments to verify them based on a hydrological model.

Keywords: gold mining; river runoff; land disturbance; the Susuman River basin; «Hydrograph» hydrological model.

нарушенных в результате добычи золота и полностью лишённых растительности составляет более 720 км², в том числе 260 км² – прирост их площади за последние 4–6 лет [Shikhov et al., 2023].

Разработка месторождений золота в Магаданской области осуществляется тремя методами, которые по-разному воздействуют на окружающую среду: дражный, карьерный и открытая разработка. Дражный метод применяется для добычи россыпного золота, когда специальный механизм (драга), расположенный в русле реки, черпает породу, которой сложена долина и пойма реки, с целью дальнейшей переработки. Для эффективной работы драги необходим определенный уровень воды в дражном котловане, который регулируется благодаря искусственным плотинам и шлюзам. Вследствие разработки образуются галечно-эфельные отвалы, а промытый песок оседает на дно образовавшегося котлована. Основной особенностью карьерной разработки являются вскрышные работы, которые могут выполняться несколькими способами: а) с использованием взрывчатки; б) гидравлической оттайкой;

в) рыхлением. При применении гидравлической оттайки изменяется мощность многолетнемерзлых пород, а также увеличивается интенсивность глубинной и боковой эрозии. Рыхление и массовые взрывы приводят к уменьшению альбедо, что также может приводить к увеличению сезонно-талого слоя. Открытая добыча подразумевает повторную переработку ранее использованных массивов пород.

Таким образом, на участках речных долин и в руслах рек формируется сложная система искусственных водоемов (рисунок 1). Многочисленные пруды-отстойники и русловая сеть антропогенного происхождения подвержены процессам заиливания и заболачивания. Образуются дамбы, которые в периоды интенсивных осадков могут прорываться и приводить к формированию катастрофических

паводков. Прорывные паводки и склоновый сток транспортируют в реки большой объем загрязняющих веществ. Наиболее характерным для рек золотодобывающих районов является загрязнение взвешенными веществами и тяжелыми металлами [Jarsjö et al., 2017; Илюшина и др., 2023]. Распространение многолетнемерзлых пород и антропогенные изменения геокриологического режима приводят к тому, что восстановление ландшафтов на нарушенных участках занимает продолжительное время. На основе данных космических снимков выявлено, что в пределах Тенькинского, Сусуманского и Ягоднинского районов Магаданской области, около 2 % площади территории нарушены в результате золотодобычи, из них только на 10 % наблюдаются процессы восстановления растительного покрова [Илюшина и др., 2023].



Рисунок 1. Спутниковый снимок нарушенных ландшафтов в долине р. Сусуман (Сусуманский район Магаданской области) с сервиса Google Earth

Figure 1. Landscapes impacted by gold mining in the Berelekh river valley (Susumansky district of Magadan region) (satellite image from Google Earth service)

Магаданская область относится к региону повышенного экономического риска вследствие воздействия опасных гидрометеорологических явлений [Zemtsov et al., 2014]. Расчеты производились на основе двух формул расчета

риска «Мирового индекса риска» (WRI) и «Региональный Российский индекс риска» (RRIR). Полученные значения WRI в работе [Zemtsov et al., 2014] сравнимы с территориями Краснодарского края, для которого характерны

регулярные наводнения, сели и нестабильная метеорологическая обстановка. Оба региона определены в категорию очень высокого риска воздействия. Оценка риска опасных гидрометеорологических явлений по методу RRIR, определила Магаданскую область как территорию высокого риска, и она уступает Краснодарскому краю в рассчитанных значениях RRIR. С повышенными экономическим и социальным рисками также связан нестационарный климат Дальнего Востока. Согласно [Третий оценочный ..., 2022], в регионе ожидается увеличение водности рек, что повышает риски затопления. К 2050 г. прогнозируют увеличение экстремумов суточного количества осадков, повышение среднегодовой температуры воздуха на 5 °С и деградацию многолетней мерзлоты. Перечисленные происходящие процессы изменения природной среды способствуют формированию экстремальных паводков. Обобщая приведенные факты, можно сказать, что на сток рек района исследования влияют климатические и антропогенные факторы.

В литературных источниках практически нет информации о количественном изменении речного стока вследствие горнодобывающей деятельности. Схожим процессом, влияющим на подстилающую поверхность путем удаления растительного покрова, является лесной пожар. На территориях, лишенных растительного покрова часто максимальные расходы воды с малых водосборов в разы, превышают максимальные величины, наблюдаемые в ненарушенных условиях [Gartner et al., 2004; Moody et al., 2008]. Также нарушенные территории могут способствовать формированию катастрофических паводков [Neary, Gottfried, 2002; Pausas et al., 2008]. В работе [Семенова и др., 2015] для водосбора, расположенного в зоне распространения многолетней мерзлоты,

показано увеличение объема ливневых паводков после пожара на 30–40 %.

По аналогии с территориями, лишенными растительности в результате лесных пожаров, можно предположить наличие эффекта комплексирования климатических и антропогенных (горнодобывающая деятельность) факторов формирования паводков на территории Магаданской области.

Одним из центров золотодобычи Магаданской области является Сусуманский район. В г. Сусумане в последние годы катастрофические наводнения наблюдались в 2016 и 2019 гг. Для предотвращения паводков в г. Сусуман в 2016 г.¹ были проведены мероприятия по берегоукреплению. Однако, они не помогли избежать наводнения в этот и последующие годы. Из средств массовой информации, достоверно известно о трех случаях, нанесших значительный ущерб: 13–14 июня 1995 г.², 27–28 августа 2016 г.³, 6–7 августа 2019 г.⁴ В то же время в регионе отсутствует система прогнозирования опасных гидрологических явлений ввиду редкой гидрометеорологической сети наблюдений. Например, в бассейне р. Сусуман с 1987 г. не измеряются расходы воды, хотя ранее здесь действовали гидрологические посты.

Целью данного исследования является количественная оценка вклада климатического изменения и антропогенного воздействия (нарушение ландшафтов речных долин и деформация русел) в формирование опасных гидрометеорологических явлений на реках Магаданской области, в том числе, на основе методов моделирования. В качестве объекта исследования принят бассейн р. Сусуман, на территории которого добыча золота и гидрометеорологические наблюдения были начаты в 30-х гг. прошлого века. На первом этапе решены следующие задачи: 1) на основе космических снимков проведена оценка площади

¹ Укрепление дамбы [Эл. ресурс] URL: https://www.49gov.ru/press/press_releases/?id_4=17630&ysclid=lniwydvia5496350774, дата обращения на сайт 10.09.2023 г.

² Наводнение 1995 года [Эл. ресурс] URL: <https://furyrec.livejournal.com/15078.html?ysclid=lnsvgph1kj217793867>, дата обращения 10.09.2023 года

³ Наводнение 2016 года [Эл. ресурс] URL: <https://ria.ru/20160828/1475464820.html?ysclid=lnsvhat67z163375361>, дата обращения 10.09.2023 г.

⁴ Наводнение 2019 года [Эл. ресурс] URL: <https://vesmatoday.net/news/post/8921-v-susumanskom-rayone-ysclid=lnsvhrsky303296341>, дата обращения 10.09.2023 г.

нарушенных земель в бассейне р. Сусуман; 2) проведена параметризация и верификация гидрологической модели для бассейна р. Сусуман.

Объект исследования

Бассейн р. Сусуман расположен в Сусуманском районе Магаданской области. Река является левым притоком р. Берелёх, которая является притоком второго порядка для р. Колымы. Относится к верховьям р. Колымы и берет свое начало в нескольких километрах к югу от горы Морджот – обособленного массива, входящего в хребет Черского [Шпикерман и др., 2016]. Площадь бассейна в створе Тонгора составляет 932 км², его характеристики представлены в таблице 1. Река протекает по территории распространения сплошной многолетней мерзлоты на высотах 691–1968 м, что относится к зоне подгольцовых редколесий. Также на таких высотах выделяются обнаженные

горные породы и скалистые тундровые участки [Королев, 1985].

Климат территории резко континентальный, с длительным (7 и более месяцев) холодным периодом года, с абсолютным минимумом –60,6 °С в январе. Тёплый период года длится с третьей декады мая по сентябрь. Максимальные температуры наблюдаются в июле, абсолютный максимум составил 35 °С. Средняя многолетняя температура (1937–2023 гг.) по данным метеостанции Сусуман (655 м), составляет –12,5 °С, средняя многолетняя сумма осадков – 312 мм.

Гидрологический режим реки относится к дальневосточному типу и отличается высокими дождевыми паводками, которые соединяются с весенним половодьем, а иногда и превышают его по максимальным значениям расхода воды. Летом река переходит в непродолжительную фазу межени, а зимой перемерзает.

Таблицы 1. Характеристики водосбора р. Сусуман (пост р. Сусуман – пос. Тонгора)

Table 1. Characteristics of Sysyman river basin (the Susuman river – Tongora village)

Показатель, единица измерения	Значение
Код поста	01076
Период наблюдений за расходом воды	1941–1987
Площадь водосбора, км ²	932
Максимальная/минимальная/средняя высота водосбора, м	1968/691/1001
Средневзвешенный уклон, °	5,53
Средний/максимальный суточный расход воды за период наблюдений, м ³ /с	8,42/346

Материалы и методы

Оценка площади нарушенных земель в бассейне р. Сусуман по спутниковым данным

Использование спутниковых снимков миссии Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м и повторяемостью съемки каждые 2–3 дня позволяет объективно оценить площади нарушенных при золотодобыче земель и их динамику, несмотря на относительно невысокую повторяемость безоблачных дней в летний сезон и короткую продолжительность вегетационного периода. В рамках настоящей работы по снимкам Sentinel-2 были решены следующие задачи:

– оценена площадь земель, нарушенных при золотодобыче и полностью лишенных

растительности (в полуавтоматическом режиме на основе нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI).

– оценена площадь всех земель с признаками нарушения золотодобычей на основе текстурных признаков (методом визуального дешифрирования).

Методика оценки площади нарушенных земель по разновременным снимкам, полученным в вегетационный период (в июле-августе), детально описана в работе [Shikhov et al., 2023].

Моделирование процессов формирования стока с учетом нарушенных территорий

Для исследования процесса формирования стока используется распределенная, физически обоснованная гидрологическая модель

«Гидрограф» [Виноградов, Виноградова, 2010]. Модель «Гидрограф» применяется в масштабе от единичной почвенной колонки до бассейнов крупных рек без изменения структуры и набора параметров для идентичных ландшафтов. Результатами моделирования является сток воды в замыкающем створе, водный баланс, распределенные переменные состояния ландшафтов – характеристики снежного покрова, температура и влажность почвы на разных горизонтах, глубина протаивания и промерзания и другие. В качестве входной информации модель использует данные о температуре и дефиците влажности воздуха и количестве осадков суточного или часового разрешения. Упрощенная входная информация позволяет применять модель на малоизученных бассейнах.

Параметризация модели осуществляется путем выделения однородных ландшафтов по характеристикам почвенно-растительного

покрова, влияющих на формирование стока. Благодаря разделению водосбора на стокоформирующие комплексы (СФК), модель позволяет учитывать изменения в ландшафте, такие как лесные пожары [Семенова и др., 2015], вырубка деревьев и урбанизация, которые могут быть описаны с использованием динамического набора параметров, что делает ее пригодной для численных экспериментов в целях исследования процессов формирования стока. Модель неоднократно применялась для расчетов характеристик стока рек в условиях горной криолитозоны Северо-Востока России [Макарьева и др., 2020].

В качестве входной гидрометеорологической информации используется суточные данные метеостанции Сусуман (24790) и суточные значения расхода воды гидропоста р. Сусуман – пос. Тонгора (01076).

Таблица 2. Значения параметров нарушенного ландшафта для бассейна р. Сусуман

Table 2. Values of the parameters of the disturbed landscape for Susuman river basin

Показатель, единица измерения	Значение
Общая площадь нарушенных земель, км ² /%	82,1/8,8
Площадь нарушенных земель, лишенных растительности, км ² /%	27,0/3,0
Прирост площади нарушенных земель за 2016–2022 гг., км ² /%	10,3/1,1
Площадь участков нарушений с восстанавливающейся растительностью, км ² /%	43,8/4,7
Площадь буферных зон, км ²	170,2
Площадь нарушенных земель в буферной зоне, км ² /%	60,1/35,3

Результаты

Оценка площади нарушенных земель в бассейне р. Сусуман по спутниковым данным

Добыча золота в бассейне р. Сусуман началась более 80 лет назад и продолжается в настоящее время [Khristov, 2018]. В целом, в бассейне р. Сусуман, до замыкающего створа пос. Тонгора, площадь нарушенных территорий составляет 82,1 км² (8,83 %) из них 10,3 км² – прирост с 2016 г (рисунок 2а, таблица 2). При этом наиболее существенное воздействие золотодобычи на наземные экосистемы связано с добычей россыпного золота в речных долинах. Для оценки степени преобразованности речных долин построена буферная зона вдоль русел рек общей шириной 1000 м, ее площадь на территории бассейна составляет 170 км².

Учитывая как нынешние, так и исторические горные выработки, на которых растительность уже восстановилась, а также искусственные водоемы, более 35 % площади долинных ландшафтов в бассейне р. Сусуман преобразованы золотодобычей (рисунок 2б). Такое серьезное воздействие на поймы приводит к существенному увеличению мутности воды [Илюшина и др., 2023].

Наряду с деградацией земель в исследовании оценивалось восстановление растительности на исторических участках золотодобычи. Анализ значений NDVI по снимкам Landsat, полученным в 2000, 2009 и 2021 гг., показал значительное восстановление растительности в районах, пострадавших от добычи золота до 2000 г. Участки нарушений возрастом от 20–30 лет и более уже невозможно

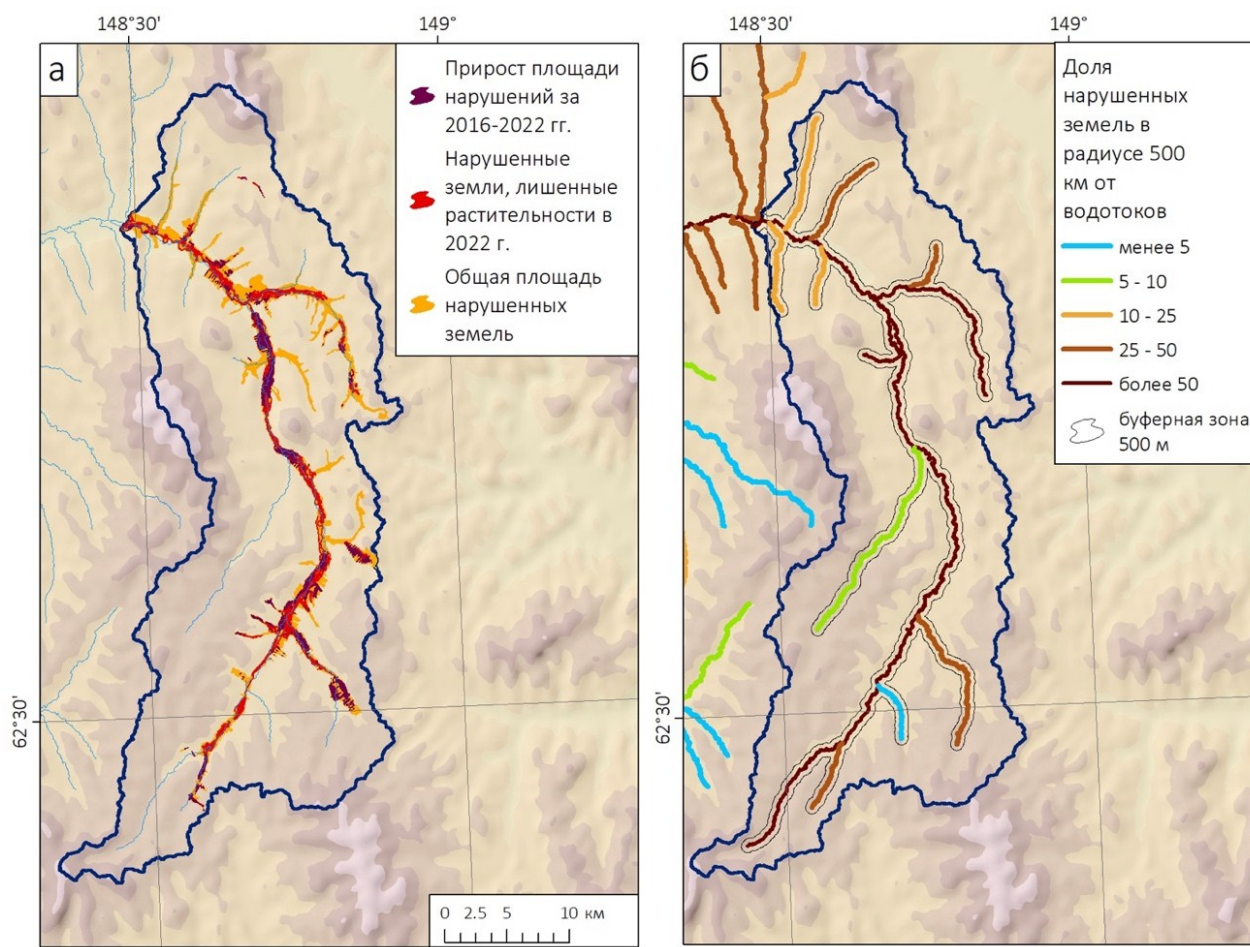


Рисунок 2. Пространственное распределение нарушенных земель в долине р. Сусуман по снимкам Sentinel-2: а) Нарушенные территории для всего бассейна реки; б) Распределение долей нарушенных территорий в буферных зонах

Figure 2. Spatial distribution of mining-impacted areas in the Sysyman river valley according to Sentinel-2 images: а) Disturbed territories for the entire river basin; б) Distribution of the shares of disturbed territories in buffer zones

выявить на основе разности NDVI. Основным отличительным признаком нарушенных земель, на которых уже восстановился растительный покров, является характерная текстура изображения, связанная с густой сетью искусственных водоемов и проток, а также сформированных драгой элементов рельефа. Такие участки хорошо различимы на снимках летнего периода, и они были выделены в интерактивном режиме (оцифрованы вручную). Их общая площадь составила 43,8 км², или 4,7 % от всей площади бассейна р. Сусуман в замыкающем створе пос. Тонгора. (таблица 2).

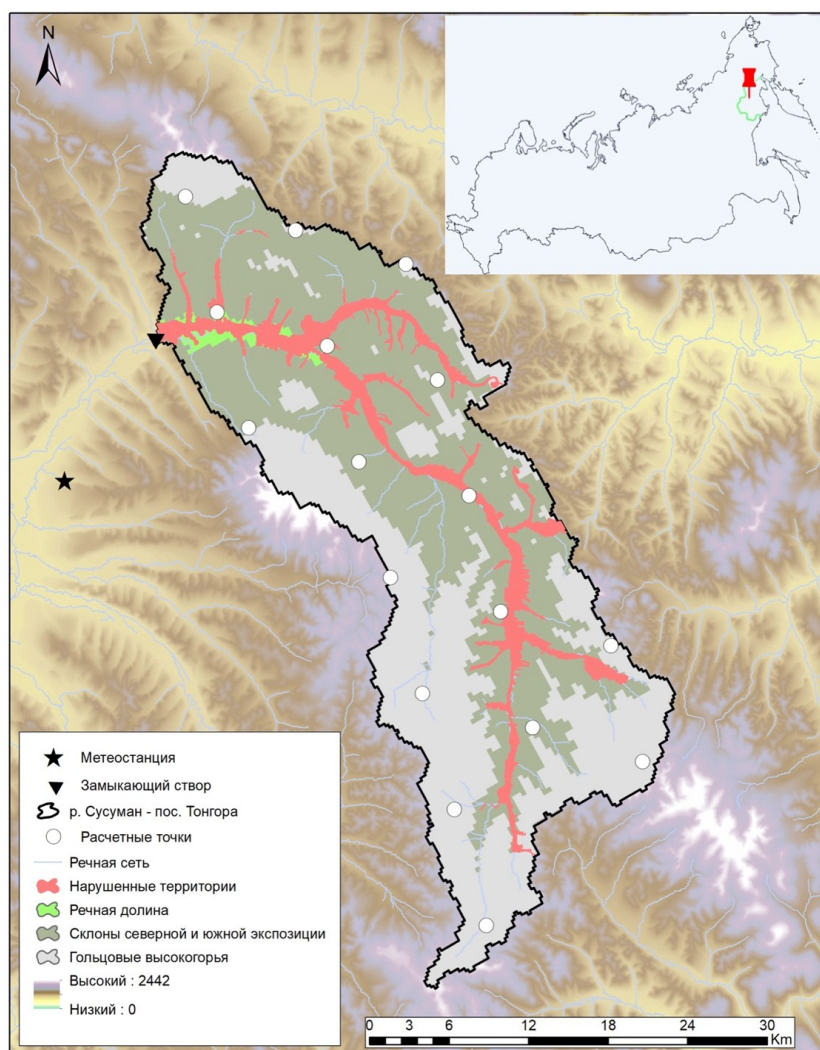
Параметризация и верификация гидрологической модели в бассейне р. Сусуман

На первом этапе исследования была проведена оценка применимости модели

«Гидрограф» для расчетов характеристик стока в исследуемом бассейне. Моделирование процессов формирования стока проводилось без учета нарушенных территорий, а для параметризации бассейна р. Сусуман использовалась ранее опубликованная схема параметров модели для бассейнов верховьев р. Колымы [Макарьева и др., 2020], разработанная на основе анализа материалов Колымской водно-балансовой станции (1948–1997 гг.) [Makarieva et al., 2017]. Согласно предложенной схеме, в пределах бассейнов было выделено четыре стокоформирующих комплекса: гольцы, склоны северной экспозиции, склоны южной экспозиции и речная долина (таблица 2, рисунок 3).

Таблица 3. Распределение СФК исследуемого бассейна**Table 3.** Distribution of the RFCs of the studied basins

Тип СФК	Отметка высот/средняя высота, м	Площадь бассейна р. Сусуман, км ² (%)
Гольцы	> 1000	415 (44,6)
Склоны	700–1000	486 (52,2)
Речная долина	<700	2,6 (0,3)
Количество РТ	–	17

**Рисунок 3.** Распределение СФК в бассейне р. Сусуман**Figure 3.** Runoff formation complexes in the basin of the Susuman river

В качестве входной метеорологической информации использовались суточные данные метеостанции Сусуман (655 м) (среднесуточная температура и дефицит влажности воздуха, суточное количество осадков). При моделировании учитывалось распределение метеорологических элементов с высотой: ходовой ход градиента температуры учитывает зимние температурные инверсии, характерные для

региона; градиент осадков с высотой был рассчитан согласно данным об осадках на метеорологических постах, опубликованных в [Справочник..., 1966].

Непрерывное моделирование стока воды с суточным расчетным интервалом осуществлялось за период наличия метеорологической информации и рядов суточных расходов воды (1966–1987 гг.).

Результатом расчетов являются суточные гидрографы стока воды, элементы водного баланса и переменные состояния бассейнов.

В таблице 3 представлены рассчитанные и наблюдаемые значения элементов годового водного баланса и критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (NS) [Nash, Sutcliffe, 1970]. Рассчитанный и наблюдаемый среднемноголетние слой стока для р. Сусуман за

весь период расчета составили 297 и 285 мм (невязка 4,2 %). Средний рассчитанный слой осадков с учетом высотных градиентов составил 423 мм (от 301 до 564 мм), расчетная величина испарения – 124 мм. Средние и медианные значения критерия эффективности NS для р. Сусуман составляют 0,59 и 0,61 (от –0,21 до 0,90).

Таблица 4. Рассчитанные и наблюдаемые характеристики стока, и критерий эффективности моделирования р. Сусуман (пост р. Сусуман – пос. Тонгора)

Table 4. Simulated and observed runoff characteristics and criteria of the modelling effectiveness of Sysyman river (the Susuman River – Tongora village)

Показатель, единица измерения	Значение
Рассчитанный слой стока, мм	297
Наблюденный слой стока, мм	285
Рассчитанный слой осадков, мм	423
Рассчитанный слой испарения, мм	124
Критерий эффективности Нэша-Сатклиффа (NS): средний/медиана/максимальный/минимальный	0,59/0,61/0,90/–0,21

На рисунке 4 представлены примеры сравнения рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока на р. Сусуман для трех лет с хорошим, удовлетворительным и неудовлетворительным качеством расчета (оцениваемым по критерию NS).

Наибольшие расхождения между рассчитанными и наблюдаемыми значениями расхода воды приходится на периоды половодья. В некоторые годы гидрографы половодья практически совпадают, в другие наблюдается значительное занижение или завышение количества снега. Последние десятилетия Гидрометеослужба не проводит наблюдения за осадками в горных частях бассейна р. Колымы, однако даже кратковременный опыт проведения водно-балансовых исследований в бассейне р. Анмангынды (2020–2023 гг.) показывает, что метеорологические станции в значительной степени нерепрезентативны для горных территорий. Ограниченность входных метеорологических данных не позволяет повысить эффективность моделирования.

Заключение

Работа посвящена исследованию процессов формирования стока рек Магаданской области. В настоящее время гидрологический режим рек трансформируется как в результате климатических, так и антропогенных факторов, важнейшим из которых в регионе исследования является добыча золота. На первом этапе работы были решены две задачи. Для ключевого объекта – горного бассейна р. Сусуман – проведена оценка площади нарушенных территорий за период 2000–2022 гг. Общая площадь нарушенных территорий в 2022 г. составляла 82,1 км² или 8,8 %. Проведена параметризация и верификация распределенной гидрологической модели «Гидрограф» для бассейна р. Сусуман без учета нарушенных территорий. Период моделирования составил 1966–1987 гг. Средний критерий Нэша-Сатклиффа составил 0,59, невязка слоя стока 12 мм или 4 %. Результаты моделирования в значительной мере зависят от качества и репрезентативности входных метеорологических данных об осадках. Следующим этапом станет определение параметров нарушенных ландшафтов и

проведение численных экспериментов на основе оценки влияния россыпной золотодобычи на гидрологической модели «Гидрограф» для речной сток.

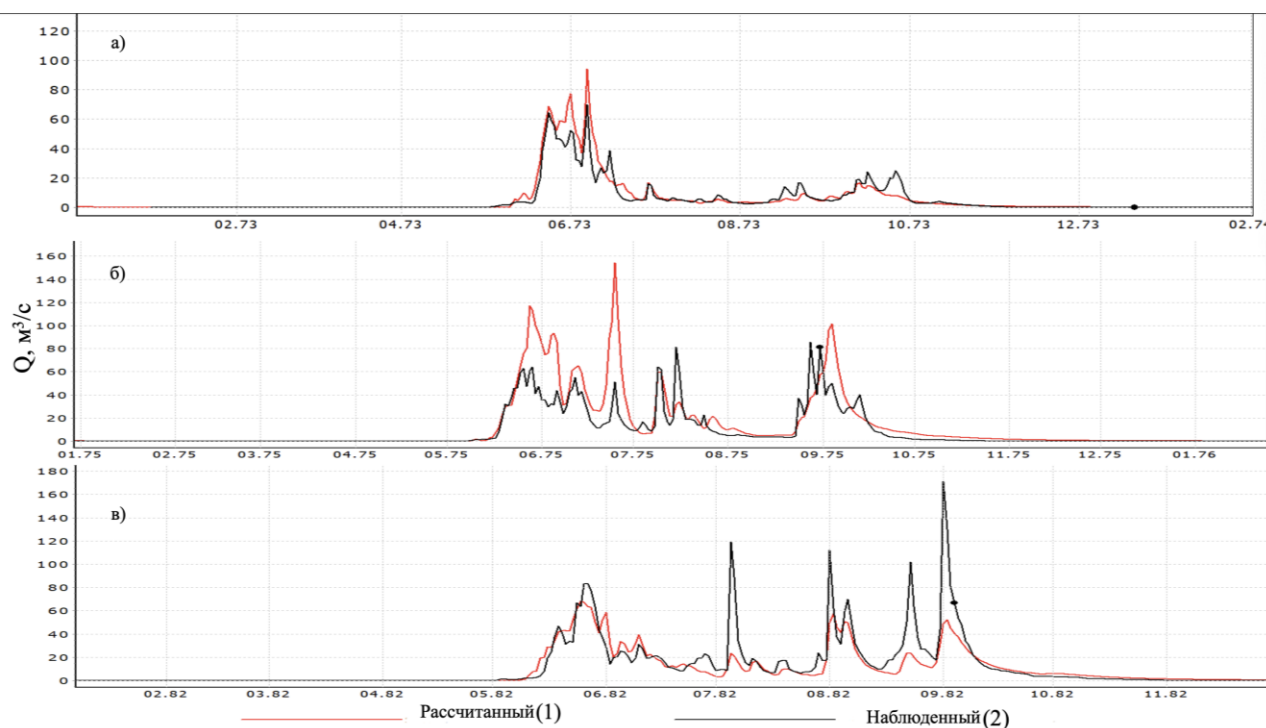


Рисунок 4. Рассчитанный (1) и наблюдаемый (2) гидрографы стока р. Сусуман – п. Тонгора: а) 1973 г. NS = 0,81; б) 1975 г. NS = 0,16; в) 1982 г. NS = 0,64

Figure 4. Calculated (1) and observed (2) flow hydrographs of Susuman river –Tongora village: а) 1973 г. NS = 0,81; б) 1975 г. NS = 0,16; в) 1982 г. NS = 0,64

Благодарности

Исследование проводится в рамках проекта Российского научного фонда и правительства Магаданской области № 23–17–20011 «Оценка рисков опасных явлений для инфраструктуры Магаданской области, вызванных климатически- и антропогенно-

обусловленной трансформацией многолетнемерзлых пород».

Acknowledgments

The study is conducted with the support of the Russian Science Foundation and the Government of the Magadan region (project 23-17-20011).

Литература

- Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. М.: Издательский центр «Академия», 2010. 298 с.
- Илюшина П.Г., Шихов А.Н., Макарьева О.М. Картографирование негативного воздействия золотодобывающих предприятий на природную среду криолитозоны по спутниковым данным (на примере Магаданской области) // Исследование Земли из космоса. 2023. №1. С. 41–52.
- Королев Ю.Б. Картографирование растительного покрова в связи с оценкой его гидрологической роли (на примере Верхней Колымы). Автореф.

References

- Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. Current changes in river water regime in the Don River Basin. *Water resources*, 2013, vol. 40, pp. 573–584.
- Egidarev E.G., Simonov E.A. Assessment of the Environmental Effect of Placer Gold Mining in the Amur River Basin. *Water Resources*, 2015, vol. 42(7), pp. 897–908.
- Gartner J.E., Bigio E.R., Cannon S.H. *Compilation of post wildfire runoff-event data from the western United States*. (online: USGS Open-File Report 2004–1085 <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1085>).

Дис. ... канд. биол. наук. Днепропетровск, 1985. 24 с.

Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока в малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водобалансовой станции) // Криосфера Земли. 2020. Том 24, № 1. С. 43–56.

Семенова О.М., Лебедева Л.С., Волкова Н.В., Шалина Е.В. Использование спутниковых данных для исследования процессов формирования стока в бассейне р. Витимкан (зона распространения многолетней мерзлоты) // Исследование Земли из космоса. 2015. №. 3. С. 15–26. DOI: 10.7868/S0205961415030124

Справочник по климату СССР Чукотский национальный округ и Магаданская область. Вып. 34, ч. 2, М.: Гидрометеиздат, 1966. 288 с.

Христов В.К. Страницы истории: 80 лет Сусуманскому ГОКу, 65 лет Сусуманскому району. Магадан: Охотник, 2018. 279 с.

Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Под ред. Катцов В.М. СПб.: Научное издание. 2022. 124 с.

Шпикерман В.И., Васькин А.Ф., Желебогло О.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. М-б 1:1 000 000. Третье поколение. Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-55 (Сусуман). Геологическая карта, составлена: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2016.

Dzhamalov R.G., Frolova N.L., Kireeva M.B. Current changes in river water regime in the Don River Basin // Water resources. 2013. Vol. 40. P. 573–584.

Egidarev E.G., Simonov E.A. Assessment of the Environmental Effect of Placer Gold Mining in the Amur River Basin // Water Resources. 2015. Vol. 42(7). P. 897–908.

Gartner J.E., Bigio E.R., Cannon S.H. Compilation of post wildfire runoff-event data from the western United States. (online: USGS Open-File Report 2004–1085 <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1085>).

Jarsjö J., Chalov S.R., Pietron J., Alekseenko A.V., Thorslund J. Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia // Reg. Environ. Change. 2017. Vol. 17. P. 1991–2005.

Iliushina P.G., Shikhov A.N., Makarieva O.M. Mapping of the negative impact of gold mining on the natural environment of permafrost zone from satellite data (case of Magadan region). *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Observation and Remote Sensing]*, 2023, no. 1, pp. 41–52 (In Russian).

Jarsjö J., Chalov S.R., Pietron J., Alekseenko A.V., Thorslund J. Patterns of soil contamination, erosion and river loading of metals in a gold mining region of northern Mongolia. *Reg. Environ. Change*, 2017, vol. 17, pp. 1991–2005.

Khristov, V.K. *History Pages. 80 Years of Susuman GOK. 65 Years of Susumansky District*. Magadan, Russia: Okhotnik publisher, 2018. 280 p. (In Russian).

Korolev Yu.B. *Kartografirovaniye rastitelnogo pokrova v svyazi s ozenkoj ego gidrologicheskoy roli (na primere Verhnej Kolymy)*. [Mapping of vegetation cover in connection with the assessment of its hydrological role (on the example of the Upper Kolyma)], abstract. Diss. ... Cand. Biol. Sciences'. Dnepropetrovsk, 1985. 24 p. (In Russian).

Lawrence S., Grove J., Davies P., Turnbull J., Rutherford I., Macklin M. Historical dredge mining as a significant anthropomorphic agent in river systems: A case study from south-eastern Australia. *The Holocene*, 2021, vol. 31, no. 7, pp. 1158–1174.

Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. *Water-balance and hydrology database for a mountainous permafrost watershed in the up-streams of the Kolyma River, Russia – the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997*. PANGAEA. 2017. DOI:10.1594/PANGAEA.881731 (дата обращения: 20.12.2023).

Makarieva O.M., Lebedeva L.S., Vinogradova T.A. Modeling of runoff formation processes in small mountain catchments of the cryolithozone (based on materials from the Kolyma Water Balance Station). *The Cryosphere of the Earth*, 2020, vol. 24, no. 1. pp. 43–56. (In Russian).

Moody J.A., Martin D.A., Haire S.L., Kinner D.A. Linking runoff response to burn severity after wildfire. *Hydrological Processes*, 2008, vol. 22, pp. 2063–2074.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual models, part 1-a discussion of principles. *J. Hydrol.*, 1970, vol 10, pp. 282–290.

Lawrence S., Grove J., Davies P., Turnbull J., Rutherford I., Macklin M. Historical dredge mining as a significant anthropomorphic agent in river systems: A case study from south-eastern Australia // *The Holocene*. 2021. Vol. 31. No. 7. P. 1158–1174.

Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. Water-balance and hydrology database for a mountainous permafrost watershed in the up-streams of the Kolyma River, Russia - the Kolyma Water-Balance Station, 1948-1997. PANGAEA. 2017. DOI:10.1594/PANGAEA.881731 (дата обращения: 20.12.2023).

Moody J.A., Martin D.A., Haire S.L., Kinner D.A. Linking runoff response to burn severity after wildfire // *Hydrological Processes*. 2008. Vol. 22. P. 2063–2074.

Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. River flow forecasting through conceptual mgdels, part 1-a discussion of principles // *J. Hydrol.* 1970. Vol. 10. P. 282–290.

Neary D.G., Gottfried G.J. Fires and floods: post-fire watershed responses. In: Viegas V.R. (Ed.), *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. Millpress, Rotterdam, 2002. P. 1–9.

Pausas J.G., Llovet J., Rodrigo A., Vallejo R. Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin? // *International Journal of Wildland Fire*. 2008. Vol. 17. P. 713–723.

Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O., Zemlianskova A., Mozgina M. Satellite-Based Mapping of Gold-Mining-Related Land-Cover Changes in the Magadan Region, Northeast Russia // *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15(14), P. 3564. DOI:10.3390/rs15143564.

Zemtsov S.P., Baburin V.L., Koltermann K.P., Krylenko I.N., Yumina N.M., Litvinov V.Yu. Social risk and vulnerability assessment of hazardous hydrological phenomena in Russia. *Geography, environment, sustainability*. 2014; 7(4). P. 95–117. DOI:10.24057/2071-9388-2014-7-4-95-117.

Neary D.G., Gottfried G.J. Fires and floods: post-fire watershed responses. In: Viegas V.R. (Ed.), *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*. Millpress, Rotterdam, 2002, pp. 1–9.

Pausas J.G., Llovet J., Rodrigo A., Vallejo R. Are wildfires a disaster in the Med-iterranean basin? *International Journal of Wildland Fire*, 2008, vol. 17, pp. 713–723.

Semenova O.M., Lebedeva L.S., Volkova N.V., Shalina E.V. Using satellite data to study the processes of runoff formation in the river basin Vitimkan (permafrost distribution zone). *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Exploration of the Earth from space]*, 2015, no. 3, pp. 5–15. DOI: 10.7868/S0205961415030124 (In Russian).

Shikhov A., Ilyushina P., Makarieva O., Zemlianskova A., Mozgina M. Satellite-Based Mapping of Gold-Mining-Related Land-Cover Changes in the Magadan Region, Northeast Russia. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15(14), 3564. DOI:10.3390/rs15143564.

Shpikerman V.I., Vaskin A.F., Zheleboglo O.V. *Russia 1:1000000 Scale Geological Maps (Third Generation). Verkhoyano-Kolyma series. Sheet Index P-55 (Susuman)*. Publ. Russian Geological Research Institute, 2016. (In Russian).

Spravochnik po klimatu USSR Chukotskii natsionalnyi okrug i Magadanskaia oblast [USSR Climate Handbook Chukotsky National District and Magadan Region], vol. 34(2), Moscow, Gidrometeoizdat Publisher, 1966, 288 p. (In Russian).

Tretii ocenochnyi doklad ob izmeneniyah klimata i ih posledstviyah na territorii Rossiiskoi Federacii. [The third assessment report on climate change and its consequences in Russian Federation. General summary]. Ed. Kattsov V.M. St. Petersburg: High-tech technologies. 2022. 124 p. (In Russian).

Vinogradov Yu.B., Vinogradova T.A. *Mathematical modeling in hydrology*. M., Publ. Center Academy, 2010. 298 p. (In Russian).

Zemtsov S.P., Baburin V.L., Koltermann K.P., Krylenko I.N., Yumina N.M., Litvinov V.Yu. Social risk and vulnerability assessment of hazardous hydrological phenomena in Russia. *Geography, environment, sustainability*, 2014, vol. 7(4), pp. 95–117. DOI:10.24057/2071-9388-2014-7-4-95-117.