Гидрология

Кудяков Э. Х., Нестерова Н. В., Землянскова А. А., Никитина П. А., Макарьева О. М.

Научная статья
УДК 556
DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-95-109
EDN: PJOCQS

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ФОРМИРОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ В БАССЕЙНЕ РЕКИ ДЕТРИН (МАГАДАНСКАЯ ОБЛАСТЬ)

Эмиль Халильевич Кудяков[1], Наталия Вадимовна Нестерова[2]✉, Анастасия Александровна Землянскова[2], Полина Андреевна Никитина[2], Ольга Михайловна Макарьева[2]
[1] Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия
[2] Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург, Россия
✉ n.v.nesterova@spbu.ru, ORCID: 0000-0003-0677-4982

Аннотация. Статистика по Магаданской области свидетельствует, что в регионе ежегодно происходят катастрофические паводки, ущерб от которых исчисляется сотнями миллионов рублей. В регионе отсутствует оперативная система прогноза опасных гидрологических явлений. Целью исследования является анализ основных факторов формирования катастрофических дождевых паводков в пос. Усть-Омчуг, а также оценка возможности использования распределенной гидрологической модели «Гидрограф» для разработки системы краткосрочного прогноза стока рек Магаданской области на примере бассейна р. Детрин. На основе данных гидрометеорологических наблюдений сети Росгидромет показано, что на территории Тенькинского района происходит изменение климата. С 1967 года количество осадков в регионе повысилось на 16 %, при этом основной рост наблюдался в августе и сентябре. Прогноз изменения количества осадков на 2041–2060 гг. в сравнении с периодом 1981–2010 гг. по данным моделей климата показал, что ожидается увеличение годовой суммы осадков на 10–15 % и более, а также рост годового стока рек на 30 % и более. Для оценки применимости гидрологической модели «Гидрограф» в качестве основы системы оперативного прогноза паводков в пос. Усть-Омчуг были проведены параметризация и верификация модели на исторических данных. Результаты моделирования на суточном расчетном интервале времени за период 1966–2024 гг. приняты удовлетворительными. Для воспроизведения катастрофических паводков 2013 и 2019 гг. использована модель численного прогноза погоды WRF с пространственным разрешением 3 км и заблаговременностью от 3–6 ч до 1 суток. Модель WRF значительно завышает количество твердых осадков, а в теплый период, несмотря на удовлетворительное воспроизведение сроков выпадения жидких осадков, занижает их количество. Неравномерное выпадение осадков в горных условиях и редкая сеть метеорологических станций уменьшают заблаговременность и точность прогноза опасных гидрологических явлений. Для повышения надежности прогностической системы и учета разнообразия погодных условий необходимо применение ансамблевого подхода на основе использования входных данных множества гидрометеорологических моделей. Научная новизна заключается в комплексном применении гидрологического моделирования и модели численного прогноза погоды для оценки паводков на слабоизученных бассейнах рек горной криолитозоны.

Ключевые слова: гидрологическое моделирование, речной сток, опасные гидрологические явления, паводки; прогноз, Магаданская область, модель «Гидрограф», модель численных прогнозов погоды WRF

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Санкт-Петербургского государственного университета, проект «Разработка методики оперативного прогноза опасных гидрометеорологических явлений в условиях Дальневосточного федерального округа (на примере Магаданской области)» (шифр проекта 124032000031-2).

Для цитирования: Кудяков Э. Х., Нестерова Н. В., Землянскова А. А., Никитина П. А., Макарьева О. М. Анализ условий формирования и моделирование дождевых паводков в бассейне реки Детрин (Магаданская область) // Географический вестник = Geographical bulletin. 2026. № 2(77). С. 95–109. EDN: PJOCQS DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-95-109

© Кудяков Э. Х., Нестерова Н. В., Землянскова А. А., Никитина П. А., Макарьева О. М., 2026

Лицензировано под CC BY 4.0. Чтобы посмотреть копию этой лицензии, посетите https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Гидрология

Кудяков Э. Х., Нестерова Н. В., Землянскова А. А., Никитина П. А., Макарьева О. М.

Original article
DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-95-109
EDN: PJOCQS

RAIN FLOODS IN THE DETRIN RIVER BASIN (MAGADAN REGION): ANALYSIS IN THE FORMATION CONDITIONS AND MODELING

Emil Kh. Kudyakov[1], Nataliia V. Nesterova[2]✉, Anastasiia A. Zemlianskova[2], Polina A. Nikitina[2], Olga M. Makarieva[2]
[1] Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia
[2] St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia
✉ n.v.nesterova@spbu.ru, ORCID: 0000-0003-0677-4982

Abstract. Statistics for the Magadan Region show that catastrophic floods occur in the region every year, and the damage from them is estimated at hundreds of millions of rubles. There is no system for short-term forecasting hazardous hydrological phenomena in the region. The study aims to analyze the main factors in the formation of catastrophic rain floods in the Ust-Omchug village, as well as to assess the possibility of using the Hydrograf distributed hydrological model to develop a system for short-term forecasting of river flow in the Magadan Region using the example of the Detrin River basin. The impact of climate change on runoff formation is examined based on the hydrometeorological observation data from the Roshydromet network. Since 1967, precipitation in the region has increased by 16 %, with the largest increase observed in August and September. The forecast of changes in precipitation for 2041–2060 compared to the period 1981–2010, based on climate models, has shown that an increase in annual precipitation of 10–15 % or more is expected, as well as an increase in annual river runoff of 30 % or more.

To assess the applicability of the Hydrograf hydrological model as the basis for a short-term flood forecasting system for Ust-Omchug, we carried out parameterization and verification of the model on the basis of historical data. The results of modeling based on a daily simulated time interval for the period 1966–2024 were accepted as satisfactory. The WRF numerical weather prediction model with a spatial resolution of 3 km and a lead time of 3–6 hours to 1 day was used to reproduce the catastrophic floods of 2013 and 2019.

The WRF model significantly overestimates the amount of solid precipitation, while in the warm period it underestimates the amount of liquid precipitation despite the satisfactory reproduction of its timing. Uneven precipitation in mountainous conditions and a sparse network of meteorological stations reduce the timing and accuracy of forecasting hazardous hydrological phenomena. In order to improve the reliability of the forecasting system and to take into account the diversity of weather conditions, it is necessary to apply an ensemble approach based on the use of input data from a variety of hydrometeorological models. The scientific novelty of the study lies in complex application of hydrological modeling and a numerical weather prediction model for flood assessment in poorly studied river basins of the mountain cryolithozone.

Keywords: hydrological modeling, river runoff, hazardous hydrological phenomena, floods, forecast, Magadan Region, Hydrograph model, WRF numerical weather prediction model

Funding. The work was carried out with the support from St. Petersburg State University, project “Development of a methodology for operational forecasting of dangerous hydrometeorological phenomena in the Far Eastern Federal District (using the example of the Magadan Region)” (project ID 124032000031-2).

For citation: Kudyakov E. Kh., Nesterova N. V., Zemlianskova A. A., Nikitina P. A., Makarieva O. M. Rain floods in the Detrin river basin (Magadan region): analysis in the formation conditions and modeling. *Geographical Bulletin*, 2026, no. 2(77), pp. 95–109. EDN: PJOCQS DOI: 10.17072/2079-7877-2026-2-95-109

Введение

С каждым годом в связи с наблюдающимися изменениями климата и увеличением ущерба от опасных гидрологических явлений (ОГЯ) все более актуальной задачей становится их прогнозирование [9]. Горные речные бассейны наиболее часто подвержены воздействию таких опасных явлений, как наводнения, которые наносят экономический ущерб и приводят к гибели людей [2; 4; 36].

Территория Магаданской области относится к горной криолитозоне. Регион, несмотря на очень низкую плотность населения, относится к важнейшим горнодобывающим территориям страны, занимая первое место в России по добыче россыпного золота [17].

Статистика по Магаданской области свидетельствует, что катастрофические паводки в регионе происходят ежегодно, а ущерб от них составляет сотни миллионов рублей. Наиболее значительными среди них в Магаданской области оказались события 2013 г. (ущерб составил более 600 млн руб.), 2014 г. (700 млн руб.), 2016 г. (250 млн руб.), 2017, 2019 гг. В 2014 году в результате паводка была закрыта областная дорога «Магадан – Балаганное – Талон». В августе-сентябре 2016, 2017, 2024, 2025 годов наблюдалось разрушение мостов, в результате чего федеральные и региональные автодороги «Колыма» и «Тенькинская» перекрывались, что приводило к блокаде некоторых населенных пунктов. В 2019 году в Магаданской области интенсивность паводка на Колымском и Усть-Среднеканском водохранилищах стала рекордной за последние 80 лет (с 1939 г.) [1].

В небольших удаленных поселках Магаданской области даже непродолжительное закрытие автодорог и относительно небольшой ущерб могут приводить к значительному снижению качества жизни людей. Поселок

Усть-Омчуг является центром Тенькинского муниципального округа Магаданской области, находится в 260 км от г. Магадана и расположен в долине р. Детрин при впадении в нее р. Омчуг. На территории округа имеется множество рудных и россыпных месторождений золота компаний ОАО «Полюс», ОАО «Рудник им. Матросова», ЗАО «Нелькобазолото», ОАО «Золоторудная компания «Павлик», АО «Сусуманзолото». В августе 2013 года в поселке прошел катастрофический паводок, ущерб от которого составил порядка 60 млн руб., в результате чего были повреждены жилые здания, объекты социальной значимости (школа, детский сад, больница и др.) (рис. 1).

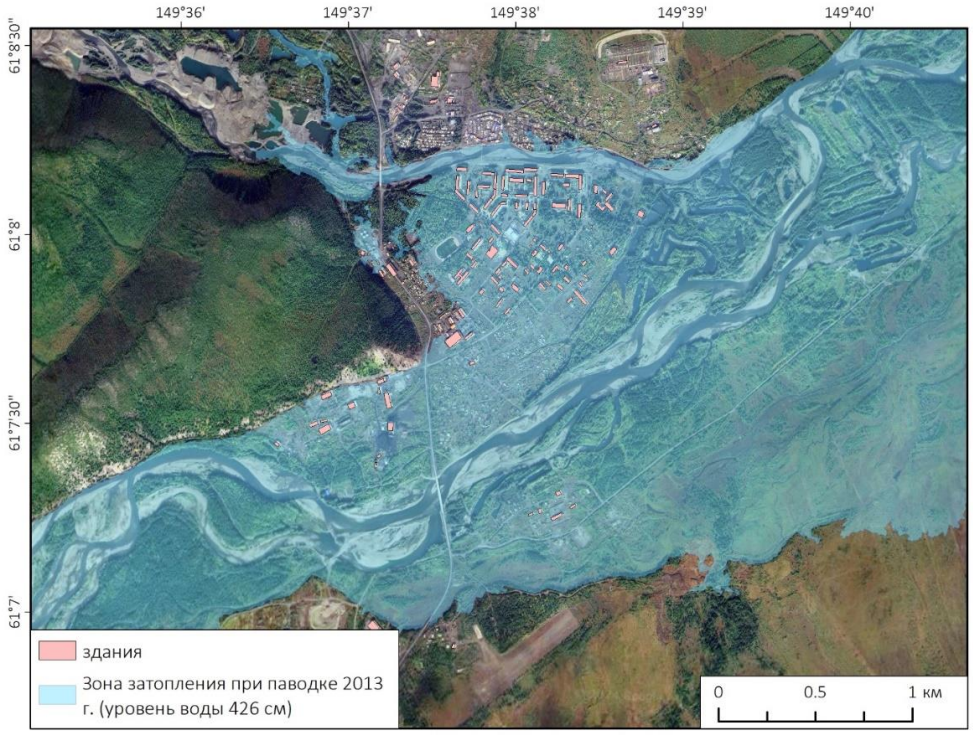


Рис. 1. Восстановленная по цифровой модели рельефа местности
и максимальному уровню воды в р. Детрин зона затопления пос. Усть-Омчуг в период паводка 19.08.2013
Fig. 1. The flood zone of the Ust-Omchug village estimated according to the digital elevation model
and the maximum water level in the Detrin River during the flood on August 19, 2013

В настоящее время поселок быстро развивается, здесь построены новый спортивный комплекс, объекты культурной инфраструктуры. Исследование выполнено по запросу администрации Тенькинского муниципального округа. Его целью является анализ основных факторов формирования катастрофических дождевых паводков в пос. Усть-Омчуг, а также оценка возможности использования распределенной гидрологической модели «Гидрограф» для разработки системы краткосрочного прогноза стока рек Тенькинского муниципального округа Магаданской области на примере бассейна р. Детрин.

Задачами исследования являются:

1) определить основные факторы формирования катастрофических паводков в пос. Усть-Омчуг;

2) оценить изменения гидрометеорологических факторов формирования опасных гидрологических явлений в период с 1966 по 2024 г. на основе данных гидрометеорологических наблюдений и в будущем на основе климатических моделей;

3) провести апробацию распределенной гидрологической модели «Гидрограф» в задаче моделирования процессов формирования стока в бассейне р. Детрин с использованием метеорологических данных из разных источников.

Результаты и их обсуждение

Объект исследования. Река Детрин является правым притоком р. Колымы, р. Омчуг – крупный левый приток р. Детрин. Долину слияния двух рек, в которой расположен пос. Усть-Омчуг, окружают горные хребты, входящие в систему Охотско-Колымского нагорья, абсолютные высоты вершин составляют до 2000 м.

Климат района континентальный, по данным метеорологической станции Усть-Омчуг продолжительность холодного периода составляет более 200 дней, минимальные средние месячные температуры воздуха наблюдаются в январе-декабре (–33,3° С), максимальные в июле могут достигать +19° С. Средняя годовая температура воздуха за период 1991–2020 гг. составила –9,5° С, а амплитуда – 51° С. Среднее годовое количество осадков составляет 361 мм (1991–2024 гг.), наибольшее среднемесячное количество осадков отмечается в августе (78 мм), в отдельные годы – до 200 мм (2013 г.). Суточный максимум количества осадков за последние 20 лет, равный 48 мм, был зафиксирован

в 2010 г. Снежный покров в среднем начинает формироваться в конце сентября, а устойчивый покров – в начале октября. Накопление снежного покрова происходит равномерно, в марте в среднем его высота достигает 30 см. В период оттепелей снег может стаять на 10 и более см. Полный сход снежного покрова наблюдается в мае. Климатические изменения подтверждаются рядом научных статей [23; 24; 32; 33; 40].

Долина рек Детрин и Омчуг в районе поселка хорошо разработана и достигает ширины 5,0 км, разбивается на несколько проток, отделенных друг от друга косами и островами, сложенными аллювиальным материалом. В паводок ширина р. Детрин достигает более 800 м, в межень ширина основной протоки составляет около 60 м. Глубина реки на плесах – до 3,0 м, на перекатах – 0,2 м. Ложе реки галечное, местами скальное. Ледостав образуется во второй половине октября, вскрытие реки начинается в конце мая. Во время паводков на реке происходит карчеход, который образует на поймах после спада воды значительные навалы, создающие подпор и условия для увеличения уровня воды. Гидрологический режим рек относится к типу, характерному для Дальнего Востока, и отличается высокими дождевыми паводками с гребнями, которые соединяются с весенним половодьем и часто превышают его по максимальным значениям расхода воды.

Площадь бассейна реки Детрин в створе гидрологического поста – устье р. Омчуг – составляет 3490 км^2, средняя высота – 920 м, средний уклон – 169 ‰. В двух километрах от поста находится действующая метеорологическая станция Усть-Омчуг. Пост открыт 07.06.1955 г.

В пойме рек Детрин и Омчуг проводится добыча золота, общая площадь нарушенных территорий по состоянию на 2022 г. составляет 10,3 км^2 (0,29 % от площади бассейна), при этом 3,3 км^2 разработано после 2016 г. [34]. Разработка русел и пойменных территорий рек Детрин и Омчуг проводится в непосредственной близости к поселку. 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 повышению интенсивности ливневых паводков.

Влияние изменения климата на гидрологический режим р. Детрин. Современные изменения. Территория Северо-Востока России в последние десятилетия подвергается наиболее заметным климатическим изменениям, что приводит к выраженной трансформации гидрологического режима [16; 27]. Многочисленные исследования показывают увеличение общего стока воды крупных арктических рек [2; 31; 35].

На основе месячных данных о количестве осадков на метеорологической станции Усть-Омчуг, а также о величинах месячного стока воды на р. Детрин проведена оценка современных изменений климатических характеристик (1967–2024) и речного стока в бассейне р. Детрин (1957–2023 гг.).

По данным м/с Усть-Омчуг, за период 1967–2024 гг. произошло увеличение годового количества осадков на 51 мм (16 %). Основной вклад в увеличение жидких осадков внесли осадки в августе и сентябре (прирост на 50 % и 30 % соответственно), а твердых – в марте (+114 %) и ноябре (+39 %). При этом отмечается сокращение осадков в июле и январе на 8 %. С 2009 по 2014 год практически ежегодно наблюдалось выпадение экстремального количества осадков в июле-августе – от 100 до 196 мм в течение нескольких дней (2013 г.).

Период, в течение которого собиралась информация о расходах воды на р. Детрин, составляет 65 лет (с 1957 по 2023 г.). Рост осадков в августе привел к увеличению слоя стока в данном месяце на 25 % (13 мм) с 1957 г., однако статистически значимого увеличения максимальных расходов воды за теплый период (май-сентябрь) не наблюдается.

Важно отметить, что при установленном уровне опасных явлений расход воды соответствует 25 % обеспеченности (повторяемость раз в 4 года), а за весь период наблюдений такая величина была зафиксирована не менее 15 раз.

Прогноз изменения осадков и речного стока в будущем. Для анализа прогноза изменения годовой суммы осадков, суммы осадков в холодный и теплый период и слоя речного стока за период с 2041 по 2060 г. использовались проекции моделей CMCC-ESM2 [26], CNRM-CM6-1-HR [38], INM-CM5-0 [39] (сценарий SSP 4,5). Данные получены с ресурсов Copernicus [21] в формате netCDF, шаг по времени – 1 месяц. Шаг сетки данных составляет от 0,5° для модели CNRM-CM6-1-HR до 2° для модели INM-CM5-0. Климатический сценарий SSP 4,5 характеризуется умеренным антропогенным радиационным воздействием (рост на 4,5 Ватт/м^2) со стабилизацией во второй половине XXI в. и рассматривается как один из наиболее вероятных.

Анализ прогноза изменения количества осадков на 2041–2060 гг. по сравнению с периодом 1981–2010 гг. показал, что ожидается рост годовой суммы осадков на 10–15 % и более (рис. 2). Значительное увеличение количества осадков прогнозируется в холодный период, в теплый период – на 20 % и более. Согласно моделям климата CMCC-ESM2 и CNRM-CM6-1-HR, это приведет к значительному росту годового стока рек – на 30 % и более, а на локальных участках в два раза (рис. З**Ошибка! Источник ссылки не найден.**), что также будет способствовать повышению вероятности возникновения опасных гидрологических явлений. Это согласуется с оценками, приведенными в работе [25], где для р. Колымы возрастание осадков более чем на 10 % приведет к увеличению годового стока на 4–32 % в зависимости от температурного сценария.

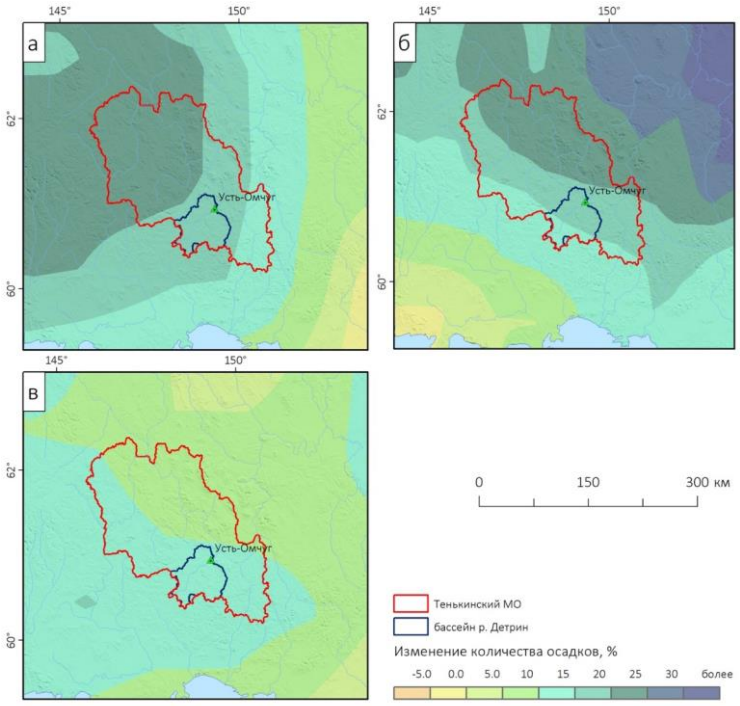


Рис. 2. Прогноз изменений количества осадков в летний период 2041–2060 гг.
по сравнению с периодом 1981–2010 гг. для Тенькинского района МО по данным моделей климата:
а) CMCC-ESM2; б) CNRM-CM6-1-HR; в) INM-CM5-0
Fig. 2. Forecast of precipitation changes in the warm period 2041–2060 compared with the period 1981–2010
for the Tenkinsky District of the Magadan Region according to climate models:
a) CMCC-ESM2; b) CNRM-CM6-1-HR; c) INM-CM5-0

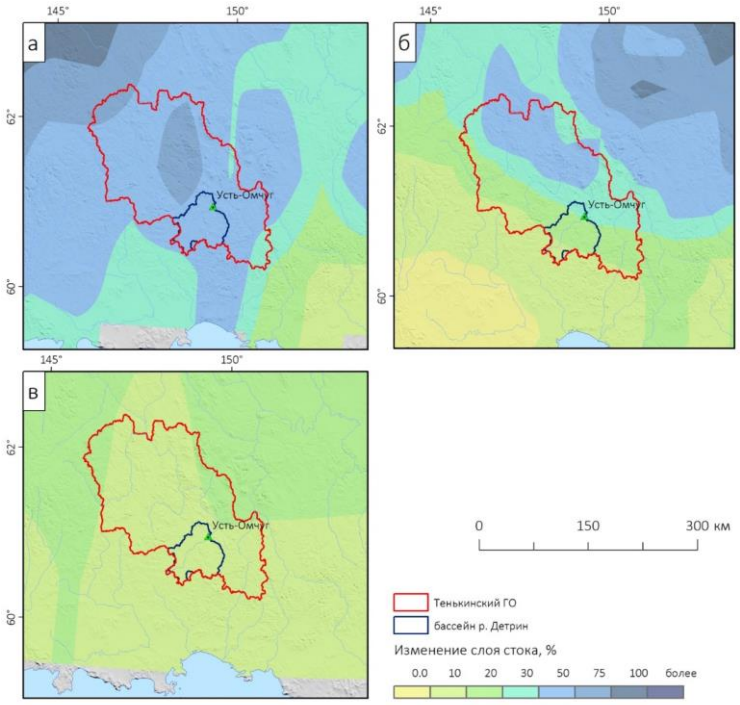


Рис. 3. Прогноз изменения годового слоя стока в период 2041–2060 гг. по сравнению с периодом 1981–2010 гг.
для Тенькинского района по данным моделей климата:
а) CMCC-ESM2; б) CNRM-CM6-1-HR; в) INM-CM5-0
Fig. 3. Forecast of changes in the annual runoff layer in the period 2041–2060 compared with the period 1981–2010
for the Tenkinsky District according to climate models:
a) CMCC-ESM2; b) CNRM-CM6-1-HR; c) INM-CM5-0

Гидрология

Кудяков Э. Х., Нестерова Н. В., Землянскова А. А., Никитина П. А., Макарьева О. М.

Прогнозирование опасных гидрологических явлений в бассейне р. Детрин. В настоящее время существует большое количество различных методов прогнозирования опасных гидрологических явлений. Многие страны мира разрабатывают и используют автоматизированные системы краткосрочного гидрологического прогнозирования для предупреждения о наводнениях. Примером реализации такой системы является Европейская система оповещения о наводнениях (EFAS), в структуру которой входят глобальные и региональные модели прогноза погоды, модель расчета водного баланса почвы и имитационная модель затопления [22].

В России до сих пор не существует единой государственной системы краткосрочного прогноза речного стока, однако на региональных уровнях разрабатываются системы прогноза стока, адаптированные под конкретные задачи потребителя. Например, в работе [5] излагаются основные принципы построения и правила использования автоматизированной системы краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна р. Кубани и Черноморского побережья Кавказа. Среднесибирским УГМС разработан и используется программный комплекс на базе концептуальной модели формирования стока, позволяющий рассчитывать и прогнозировать приток в Саяно-Шушенское и Красноярское водохранилища [6]. Коллективом под руководством Б. И. Гарцмана внедрена система краткосрочных прогнозов уровней воды на Дальнем Востоке для бассейна р. Уссури [8]. Группой авторов [20] разработана система OpenForecast для оперативного прогноза речного стока по гидропостам России на основе метеорологических прогнозов модели ЧПП ICON, гидрологической модели GR4J и технологий искусственного интеллекта (https://openforecast.github.io/). Система «ГИС Амур» стала первой в России территориально-распределенной системой, выполняющей автоматические гидрологические прогнозы с помощью, ГИС-ВЕБ-технологий [18]. Однако для Магаданской области такой системы не существует.

Одной из задач данного исследования является оценка применимости гидрологической модели «Гидрограф» в качестве основы метода краткосрочного прогноза стока в пос. Усть-Омчуг.

Распределенная детерминированная гидрологическая модель «Гидрограф» [37] позволяет рассчитывать характеристики стока и переменные состояния ландшафтов в бассейнах рек зоны распространения многолетней мерзлоты [28]. Использование в качестве входной информации ограниченного числа метеорологических переменных (температура и влажность воздуха, осадки) дает возможность применять модель на малоизученных бассейнах. Модель «Гидрограф» успешно применялась для оценки стока рек малых, средних, крупных бассейнов Российской Арктики, включая рр. Лена, Индигирка, Яна, Колыма и др. [12; 14; 28, 29].

Использование моделей численного прогноза погоды (ЧПП) с заблаговременностью 3–6 и менее часов совместно с методами моделирования формирования стока позволяет выпустить заблаговременный прогноз опасных гидрологических явлений.

В качестве тестовых случаев моделирования ОГЯ приняты ливневые паводки, наблюдавшиеся в бассейне р. Детрин в 2013 и 2019 гг. Для моделирования ливневых паводков был использован прогноз осадков, полученный по модели ЧПП WRF.

Weather Research and Forecasting (WRF) – модель численного прогноза погоды, предназначенная для моделирования атмосферных процессов, широко используется в метеорологических исследованиях и оперативном прогнозе погоды [7]. Модель имеет достаточное разрешение для описания локальной синоптической обстановки – 3 км (0,04°), поэтому она была выбрана для апробации методики оценки характеристик стока с помощью модели «Гидрограф» на 3- и 6-часовом интервале. Модель запускалась на начальных данных прогноза глобальной модели ЧПП GFS/NCEP с заблаговременностью прогноза на каждые сутки 3 и 6 ч.

Параметризация гидрологической модели «Гидрограф» в бассейне р. Детрин. Ранее параметризация модели «Гидрограф» для объектов в бассейне р. Колымы проводилась на данных Колымской водно-балансовой станции (1947–1997 гг.) [29]. К настоящему моменту накоплены новые данные на стационаре Анмангындинская наледь [30]. Оба объекта считаются репрезентативными для условий горной криолитозоны Северо-Востока.

На основе данных стационаров геокриологические процессы и режим формирования стока в бассейне р. Детрин условно в целях моделирования можно разделить на четыре основных типа.

На склонах северной экспозиции с редколесьем и сфагново-лишайниковой растительностью, а также в долинах ручьев, где распространены заболоченные леса, сразу после снеготаяния весной талая вода стекает по поверхности мерзлой почвы. Небольшая ее часть в этот период проникает в поры мерзлого грунта, замерзает там и затем вновь переходит в жидкую фазу по мере протаивания деятельного слоя. Сфагново-лишайниковый напочвенный покров является хорошим теплоизолятором, поэтому глубина протаивания мала (до 0,5–0,7 м), а мерзлый горизонт льдистый и плохо проводит влагу. Летнее оттаивание льдистого грунта обеспечивает увлажненность мхов независимо от осадков.

На водоразделах и в верхних частях склонов в пределах распространения каменных осыпей весенние талые воды свободно проникают в мерзлый грунт, и накопленные в нем «запасы холода» практически полностью расходуются на образование льда, занимающего небольшую долю порового пространства. По приближенным расчетам [3], максимально возможная льдистость достигает 5 %, что при пористости 0,35 составляет около 15 % пространства пор. К полному сходу снега в слое от поверхности до мерзлого водоупора температура отложений близка к нулевой, и они сохраняют высокую проницаемость. По мере дальнейшего прогревания грунта ледяные

включения вытаивают, стекающая вниз вода частично формирует быстрый грунтовый сток, частично фиксируется на мерзлом водоупоре и образует лед, полностью занимающий поры грунта. Глубина промерзания составляет до 2 м. Максимальная водоудерживающая способность каменной осыпи мала, поэтому летне-осенние осадки стекают по мерзлотному водоупору с минимальными потерями.

Средние части южных склонов, покрытые зарослями кедрового стланика и типичной для горной тундры растительностью, характеризуются схожими с каменными осыпями условиями, однако здесь необходимо учитывать влияние растительного покрова.

В долинах ручьев и рек распространены лиственничные леса и редколесья с густым мохово-лишайниковым покровом, здесь часто встречаются талики, а в случае распространения мерзлых пород в связи с близостью водотоков мерзлота имеет высокую температуру.

Схематизация бассейна реки Детрин – выделение четырех основных стокоформирующих комплексов (СФК) – проведена согласно описанию выше (рис. 4). Бассейн был покрыт сеткой расчетных точек (РТ), соответствующей узлам сетки модели ЧПП. Каждой РТ соответствует один СФК.

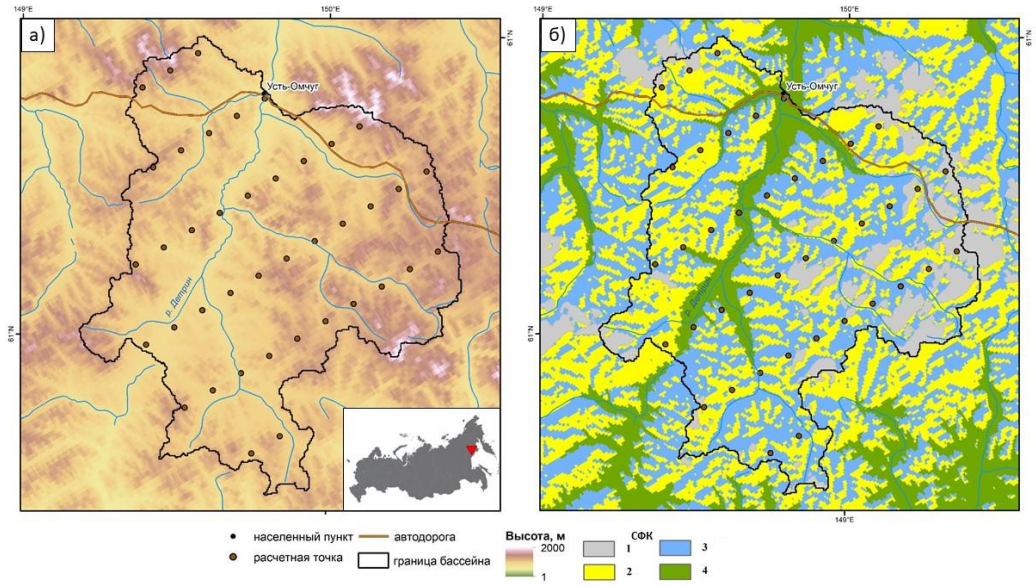


Рис. 4. Схема бассейна р. Детрин:
а) рельеф бассейна; б) стокоформирующие комплексы:
1 – гольцы, 2 – склоны южной экспозиции, 3 – склоны северной экспозиции, 4 – речные долины
Fig. 4. Scheme of the Detrin River basin:
a) basin relief; б) runoff formation complexes:
1 – rocky talus, 2 – south-oriented slopes, 3 – north-oriented slopes, 4 – river valleys

Для учета неравномерности распределения осадков в горном бассейне и общей тенденции повышения количества осадков с высотой местности при интерполяции метеорологических данных из метеостанции Усть-Омчуг в расчетные точки их величина корректировалась с учетом высотных градиентов, полученных на основе материалов наблюдений Колымской водно-балансовой станции [11]. Такой подход в целом позволяет рассчитывать адекватное среднемноголетнее годовое распределение элементов водного баланса для горного бассейна, однако не решает проблему неоднородности выпадения осадков по территории.

Верификация модели «Гидрограф» за период 1966–2023 гг. Для верификации модели «Гидрограф» проведено непрерывное моделирование стока р. Детрин с суточным разрешением за период 1966–2023 гг. (период наличия гидрометеорологических данных) с использованием данных метеорологической станции Усть-Омчуг. Получены основные характеристики водного баланса, рассчитаны значения критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (NS), построены гидрографы стока (табл. 1, рис. 5).

Анализ результатов расчета показал, что во внутригодовом разрезе отмечается завышение стока половодья, особенно в маловодные годы. Отдельные паводки как занижаются, так и завышаются, что, скорее всего, связано с выпадением локальных ливней в горных условиях, которые остаются не охваченными наблюдениями метеорологической станции, расположенной в гидрологическом створе. Рассчитанные максимальные ежедневные расходы воды хорошо согласуются по времени подъема и спада пиков. Отклонение максимальных рассчитанных и наблюденных расходов воды в среднем составляет 26 % в сторону завышения величин моделью. Медианная величина критерия эффективности NS для суточных расходов воды достигает 0,59. Наблюденный и рассчитанный среднемноголетний годовой слой стока за 1966–2023 гг. составил 291 и 325 мм соответственно (отклонение 12 %).

Таблица 1.
Table 1

Рассчитанные и наблюденные характеристики годового водного баланса и критерий Нэша-Сатклиффа, р. Детрин – устье р. Омчуг, 1966–2023 гг.
Simulated and observed annual water balance characteristics and the Nash-Sutcliffe criteria, the Detrin River – the mouth of the Omchug River, 1966–2023

Yo	*Ys*	*P*	*E*	*Qo*	*Qs*	*NS (av, med, max, min)*
291	325	458	135	1080	1368	0,21/0,59/0,89/–4,27

Примечания: Yo и Ys – наблюденный и рассчитанный среднемноголетний годовой слой стока, мм; P – осадки, мм; E – испарение, мм; Qo и Qs – максимальный среднесуточный наблюденный и рассчитанный расход, м^3/с; av – среднее значение NS; med – медианная величина критерия эффективности NS; max и min – максимальное и минимальное значение NS.
Notes: Yo and Ys – the observed and calculated average annual runoff layer, mm; P – precipitation, mm; E – evaporation, mm; Qo and Qs – the maximum average daily observed and calculated flow, m^3/s; av – the average NS value; med – the median NS efficiency criterion value; max and min – the maximum and minimum NS values.

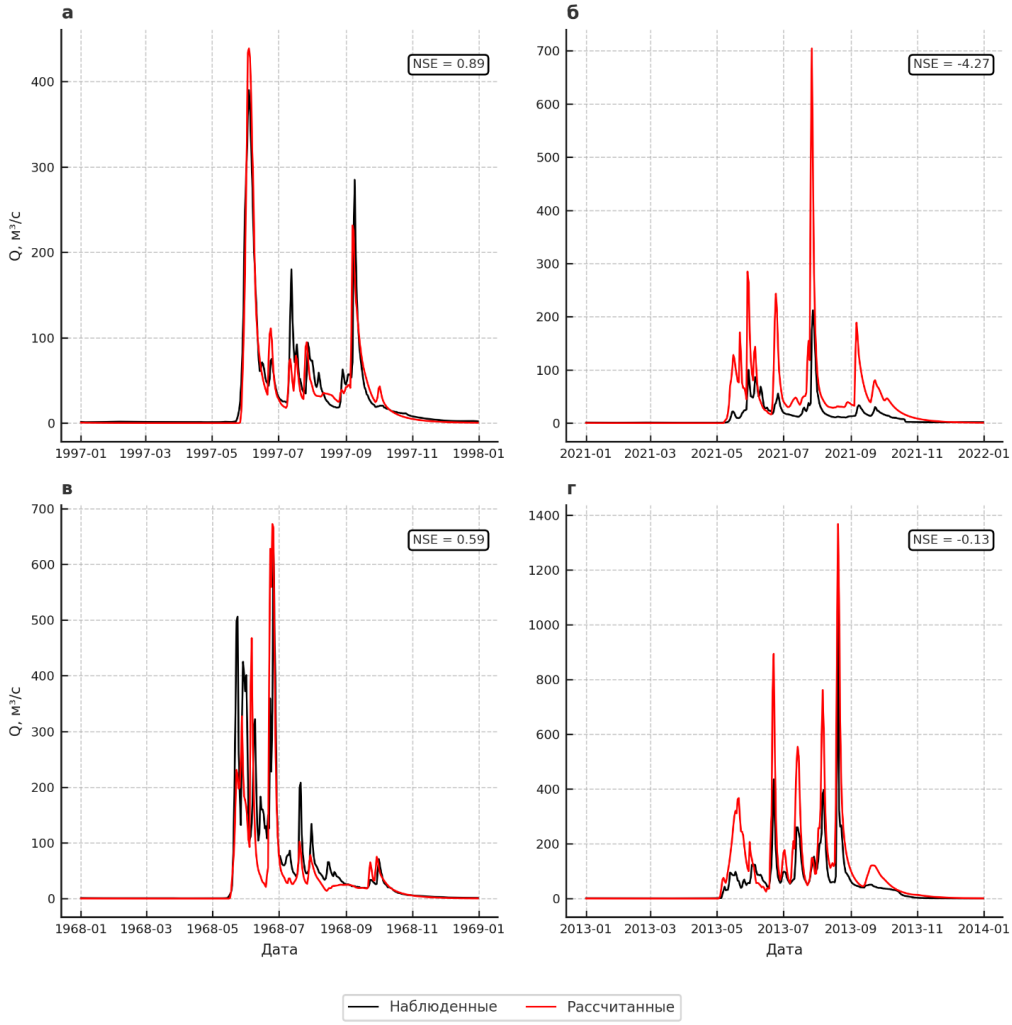


Рис. 5. Пример рассчитанных и наблюденных гидрографов стока в бассейне р. Детрин, 1966–2023 гг.:
а) год с максимальным критерием NS (0,89) – 1997; б) год с минимальным NS (–4,27) – 2021;
в) год с медианным NS (0,59) – 1968; г) год с максимальным наблюденным расходом воды, NS (–0,13) – 2013
Fig. 5. Example of simulated and observed streamflow hydrographs in the Detrin River basin, 1966–2023:
a) year with the maximum NS criterion (0.89) – 1997; б) year with the minimum NS (-4.27) – 2021;
в) year with the median NS (0.59) – 1968; г) year with the maximum observed discharge, NS (-0.13) – 2013

На рисунке 5 (б, г) – в годы с отрицательными значениями критерия NS – можно отметить хорошее совпадение фаз гидрографа и значительное превышение рассчитанного стока над наблюденным в отдельные паводки. Это связано с неравномерностью выпадения осадков на территории горного бассейна, которую невозможно учесть при использовании данных единственной метеорологической станции.

На основе данных об осадках, полученных в 2024 г. в пунктах наблюдений на высоте 744 и 1027 м в бассейне р. Анмангында (правый приток р. Детрин), и данных м/с Усть-Омчуг (545 м) было проведено сравнение суточных величин осадков при условии, что хотя бы в одном пункте выпало 10 или более мм. В поселке Усть-Омчуг может выпадать на 16 мм больше или на 33 мм меньше, чем в горах, в одну и ту же дату. Так, в июле 2024 года вдоль Тенькинской трассы на 137–159 км за двое суток выпало от 45 до 70 мм, в то время как на метеостанции в поселке – всего 10 мм. Обратная ситуация наблюдалась в середине сентября 2024 г. – на метеостанции выпало 26 мм, а на высоте более 1000 м только 10 мм (рис. 6).

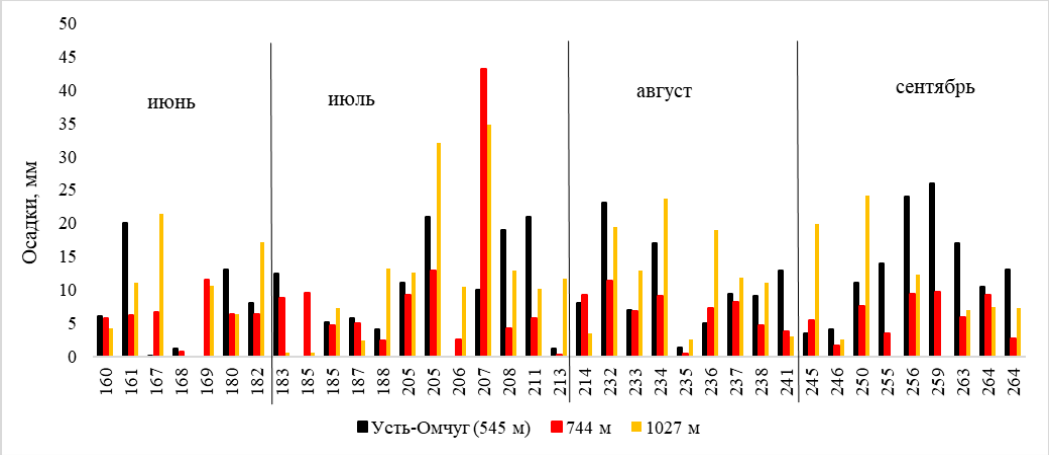


Рис. 6. Сравнение осадков на метеорологической станции Усть-Омчуг
и пунктах мониторинга осадков в горных условиях, бассейн р. Детрин, 2024 г.
Fig. 6. Comparison of daily precipitation at the Ust-Omchug meteorological station
and precipitation gauges in mountainous conditions, Detrin River basin, 2024

Результаты моделирования стока с использованием модели «Гидрограф» можно признать удовлетворительными. Погрешность расчета связана с недостаточной информацией о количестве осадков, выпадающих в горах, что не раз отмечалось в других работах [9; 10; 13; 15; 19; 37], а также с недоучетом доли участия подземных вод в питании реки и влияния нарушенных ландшафтов [15] и наледей [10] на формирование стока.

Моделирование стока реки Детрин на основе данных модели ЧПП. Использование моделей ЧПП с заблаговременностью 3–6 и менее часов совместно с методами моделирования формирования стока позволяет выпустить заблаговременный прогноз опасных гидрологических явлений.

На примере бассейна реки Детрин с использованием данных метеорологических станций и прогноза модели WRF рассчитаны гидрографы стока за 2013–2022 гг., в том числе гидрограф исторического паводка 2013 г. На основе наблюденных расходов воды проведена верификация результатов «прогноза» и оценка применимости комплекса моделей «Гидрограф» – WRF в бассейне р. Детрин.

На рисунке 7 представлены результаты моделирования гидрографов стока для р. Детрин – пос. Усть-Омчуг за 2013 г. Зеленым цветом показан гидрограф стока, полученный с использованием данных модели WRF с заблаговременностью 1 сутки. Можно отметить несоответствие наблюденных и рассчитанных расходов весеннего половодья, то есть завышенных снегозапасов. В периоды летних паводков фазы максимальных расходов совпадают, однако расход экстремального паводка в августе 2013 г. завышен в полтора раза. Красным цветом показан гидрограф стока, рассчитанный на основе данных метеорологической станции Усть-Омчуг. Интерполяция данных в расчетные точки производится с учетом высотных градиентов температуры воздуха и осадков. В период июля-августа 2013 года рассчитанный сток превышает наблюденный, в период паводка в августе 2013 г. максимальный расход превышен на 20 %. Синим цветом показан гидрограф стока, рассчитанный на основе комбинирования зимних метеоданных по метеостанции и летних данных по модели WRF.

На рисунке 8 представлены результаты моделирования гидрографов стока для р. Детрин – пос. Усть-Омчуг в 2019 г. В этот период доступны данные WRF заблаговременностью от 1 до 4 суток. Гидрографы стока как по данным WRF, так и по данным метеостанции значительно превышают наблюденные величины. Наиболее значительные отклонения характерны для периода половодья, а также периода осенней межени, во всех случаях рассчитанные значения более чем в два раза выше наблюденных. Заблаговременность прогноза метеорологических данных никак не влияет на результаты прогноза стока.

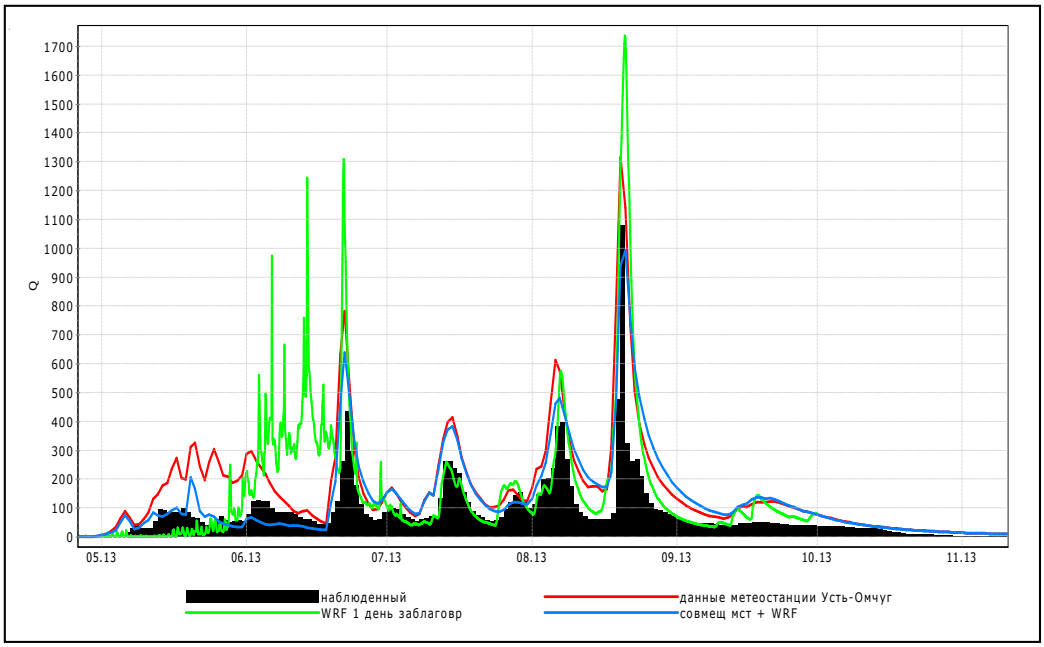


Рис. 7. Рассчитанные и наблюденный гидрографы стока в бассейне р. Детрин, 2013 г.
с использование данных WRF заблаговременностью 1 сутки и данных метеорологической станции Усть-Омчуг
Fig. 7. Simulated and observed streamflow hydrographs in the Detrin River basin, 2013
using WRF data with a lead time of 1 day and in advance and data from the Ust-Omchug meteorological station

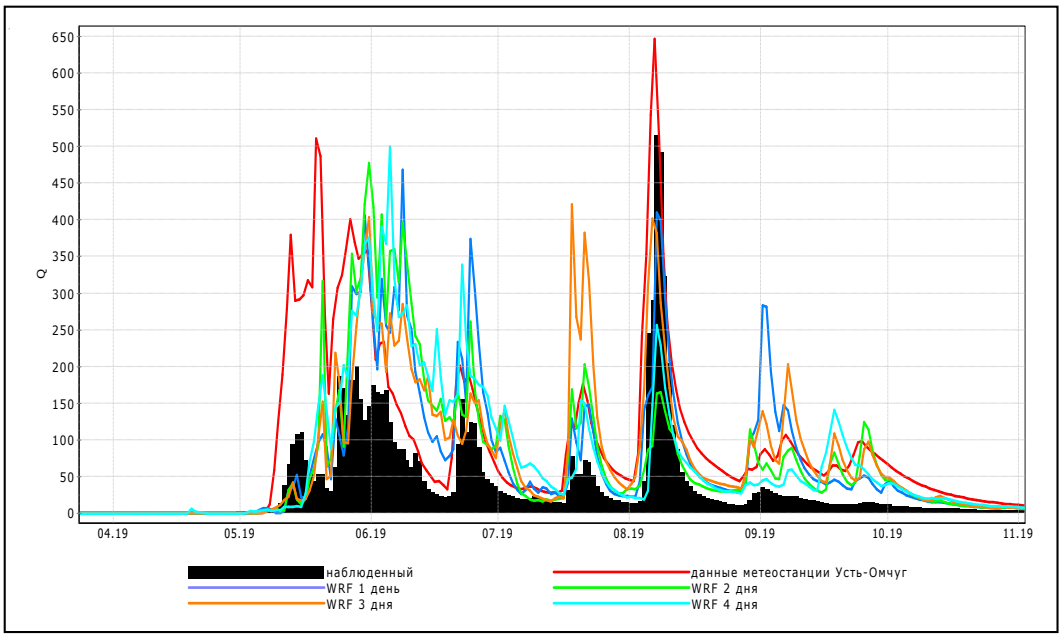


Рис. 8. Рассчитанные и наблюденный гидрографы стока в бассейне р. Детрин, 2019 г.
с использование данных WRFзаблаговременностью 1–4 сутки
и рядов данных метеорологической станции Усть-Омчуг
Fig. 8. Simulated and observed streamflow hydrographs in the Detrin River basin, 2019
using WRF data with a lead time of 1–4 days and data from the Ust-Omchug meteorological station

Анализ результатов показал, что запас воды в снежном покрове, по данным модели WRF, значительно завышен и не позволяет точно моделировать период половодья. Данные модели WRF позволяют адекватно воспроизводить сроки прохождения летних паводков, однако значительно завышают их величину. Несмотря на удовлетворительное качество моделирования стока в исторический период (период верификации), в современный период модель «Гидрограф» значительно завышает рассчитанные величины расходов воды как по данным модели WRF, так и метеорологической станции.

В целом результаты работы подтверждают принципиальную возможность применения метода детерминированного гидрологического моделирования для расчета срочных максимальных расходов воды при

использовании данных глобальных и региональных моделей прогноза погоды на территории Магаданской области. Однако при образовании локальных конвективных ячеек, которые модели ЧПП не могут воспроизвести, оценка максимального количества осадков, а следовательно, и расходов воды как завышается, так и занижается. Для повышения качества расчета рекомендуется использовать ансамбль моделей прогнозирования погоды и данные метеорологических станций.

Выводы

Опасные гидрологические явления на реках Детрин и Омчуг наблюдаются в пос. Усть-Омчуг (Магаданская область) в среднем каждые пять лет.

На основе данных гидрометеорологических наблюдений сети Росгидромет показано, что на территории Тенькинского района происходит изменение климата, в том числе увеличение осадков и водности рек в летне-осенний период. По данным м/с Усть-Омчуг, за период 1967–2024 гг. произошло увеличение годового количества осадков на 51 мм (16 %). Основной вклад в увеличение жидких осадков внесли осадки в августе (прирост на 50 %). В летне-осенний период ежегодно наблюдается превышение количества осадков относительно нормы 1967–1991 гг. на 2–151 %. Такие изменения будут способствовать увеличению стока в конце лета – начале осени. Прогноз изменения количества осадков на 2041–2060 гг. в сравнении с периодом 1981–2010 гг. по данным моделей климата также показал, что ожидается рост годовой суммы осадков на 10–15 % и более, а также увеличение годового стока рек на 30 % и более.

С целью оценки применимости гидрологической модели «Гидрограф» как ядра оперативной системы прогноза паводков в пос. Усть-Омчуг была проведена параметризация и верификация модели на основе исторических данных. Моделирование стока на суточном интервале за период с 1966 по 2023 г. показало, что отклонение расчетных величин среднемноголетнего годового стока от наблюденных не превышает 12 %, а медианный коэффициент Нэша – Сатклиффа за весь период составляет 0,59. В условиях ограниченности данных результаты моделирования приняты удовлетворительными.

Для оценки характеристик паводков 2013 и 2019 гг., которые нанесли значительный ущерб пос. Усть-Омчуг, использовались данные наблюдений метеорологической станции и модели численного прогноза погоды WRF. Показано, что модель WRF значительно завышает количество твердых осадков, что негативно сказывается на результатах прогноза стока в период половодья. Несмотря на удовлетворительное воспроизведение сроков выпадения значительных сумм жидких осадков, их количество сильно варьируется и не всегда совпадает с наблюденными данными.

На примере реки Детрин выделяются основные факторы формирования опасных дождевых паводков в горной криолитозоне Дальнего Востока, среди них – выпадение значительных сумм осадков в результате циклонов с длительным периодом существования, изменение климата и увеличение количества осадков в летний и осенний период, негативное воздействие горнодобывающей деятельности на состояние пойм и русел рек.

Неравномерное выпадение осадков в горных условиях и редкая сеть метеорологических станций значительно уменьшает заблаговременность и точность прогноза опасных гидрологических явлений. Для повышения надежности прогностической системы и учета разнообразия погодных условий необходимо применение ансамблевого подхода на основе использования входных данных множества гидрометеорологических моделей.

Библиографический список

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) : сайт. URL: https://gmvo.skniivh.ru/ (дата обращения: 21.09.2025)

2. *Алексеевский Н. И., Магрицкий Д. В., Михайлов В. Н.* Антропогенные и естественные изменения гидрологических ограничений для природопользования в дельтах рек Российской Арктики // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2015. № 1. С. 14–31. EDN: TRKBFR

3. *Банцекина Т. В.* Особенности гидротермического режима слоя сезонного протаивания крупнообломочных склоновых отложений в весенне-летний период (на примере Верхнеколымского нагорья): автореф. дис. … канд. геогр. наук / Институт мерзлотоведения СО РАН. Якутск, 2003. 23 с. EDN: ZNOUYD

4. *Болгов М. В., Борщ С. В., Хазиахметов Р. М.* Опасные гидрологические явления: методы анализа, расчета и прогнозирования, смягчение негативных последствий // Вода и экология: проблемы и решения: тезисы докладов VII Всероссийского гидрологического съезда (Санкт-Петербург, 19–21 ноября 2013 г.). СПб, 2013. С. 6–12.

5. *Борщ С. В., Симонов Ю. А., Христофоров А. В.* Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра РФ. Выпуск 356. Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани. М.: ТРИАДА ЛТД, 2015. 247 с.

6. *Бураков Д. А., Карепова Е. Д., Шайдуров В. В.* Математическое моделирование стока: теоретические основы, современное состояние, перспективы // Вестник Красноярского государственного университета. Гуманитарные науки. 2006. № 4. С. 3–19. EDN: YZMMMX

7. *Вербицкая Е. М., Романский С. О.* Результаты испытаний краткосрочных оперативных прогнозов мезомасштабной модели WRF-ARW «ХАБ-15» в пунктах Дальневосточного региона России // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. 2016. № 43. С. 32–62. EDN: XACOUZ

8. *Гарцман Б. И.* Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. Владивосток: Дальнаука, 2008. 223 с. ISBN: 978-5-8044-0967-9 EDN: QKICTT

9. *Жунусова О. Р., Нестерова Н. В., Макарьева О. М.* Моделирование максимальных характеристик стока малых рек горной криолитозоны на основе данных плювиографов // Арктика и Антарктика. 2024. № 4. С. 157–173. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.4.72657 EDN: YUMZKE

10. *Землянскова А. А., Макарьева О. М.* Моделирование процессов формирования стока рек горной криолитозоны северо-востока России с наледным питанием на примере р. Анмангында // Арктика и Антарктика. 2024. № 2. С. 1–20. DOI: 10.7256/2453-8922.2024.2.69780 EDN: EAMLTK

11. *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) EDN: UYVYJJ

12. *Макарьева О. М., Нестерова Н. В., Виноградова Т. А., Бельдиман И. Н., Колупаева А. Д.* Расчет характеристик катастрофических паводков неизученной реки Цемес (г. Новороссийск, Черноморское побережье России) на основе гидрологической модели «Гидрограф» // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2019. Т. 64, № 1. С. 24–43. DOI: 10.21638/spbu07.2019.102 EDN: TMRZMD

13. *Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н.* Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М.: Институт водных проблем РАН, 2018. 300 с. DOI: 10.31857/S9785907036222000001 ISBN: 978-5-907036-22-2 EDN: VWLMHQ

14. *Нестерова Н. В., Макарьева О. М., Виноградова Т. А., Лебедева Л. С.* Моделирование процессов формирования стока зоны Байкало-Амурской магистрали на основе данных полигона «Могот» // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2018. № 1–2. С. 18–36. DOI: 10.35567/1999-4508-2018-1-2 EDN: YUVQHP

15. *Никитина П. А., Шихов А. Н., Макарьева О. М., Землянскова А. А., Нестерова Н. В.* Процессы формирования стока рек криолитозоны в условиях горнодобывающей деятельности в речных долинах (на примере добычи золота в бассейне р. Сусуман, Магаданская область) // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2023. Т. 5, № 3. С. 244–255. DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.244 EDN: HEZEMC

16. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 1, 2. М.: Росгидромет, 2008. URL: http://climate2008.igce.ru/ (дата обращения: 21.09.2025)

17. Справка о состоянии и перспективах использования минерально-сырьевой базы Магаданской области на 15.09.2022 (от 14.01.2021 г. № 049–00016–21–00). СПб: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2021.

18. *Фролов А. В., Асмус В. В., Борщ С. В., Вильфанд Р. М., Жабина И. И., Затягалова В. В., Кровотынцев В. А., Кудрявцева О. И., Леонтьева Е. А., Симонов Ю. А., Степанов Ю. А.* «ГИС Амур»: система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях // Метеорология и гидрология. 2016. № 3. С. 5–21. EDN: VPFJSB

19. *Хамутова М. В., Кушников В. А., Богомолов А. С., Резчиков А. Ф.* Модели и методы прогнозирования данных системы управления процессами подготовки к наводнению и ликвидации его последствий // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2023): труды XVI междунар. конф. (Москва, 26–28 сентября 2023 г.). М., 2023. С. 1508–1514. DOI: 10.25728/mlsd.2023.1508 EDN: BAJKAY

20. *Ayzel G., Abramov D.* OpenForecast: An Assessment of the Operational Run in 2020–2021 // Geosciences. 2022. Vol. 12, No. 2. DOI: 10.3390/geosciences12020067 EDN: XDIOEG

21. Climate Data Store : website. URL: https://cds.climate.copernicus.eu/ (Assessed 27 October 2025)

22. European Flood Awareness System (EFAS) : website. URL: https://www.copernicus.eu/en/european-flood-awareness-system (дата обращения: 27.10.2025)

23. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge / V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani et al. New York: Cambridge University Press, 2023. 2391 p.

24. *Langer M., Nitzbon J., Groenke B., Assmann L. M., Schneider von Deimling T., Stuenzi S. M., Westermann S.* The evolution of Arctic permafrost over the last 3 centuries from ensemble simulations with the CryoGridLite permafrost model // The Cryosphere. 2024. Vol. 18, No. 1. P. 363–385. DOI: 10.5194/tc-18-363-2024 EDN: LZUIIR

25. *Lisina A. A., Krylenko I. N., Kalugin A. S., Motovilov Yu. G., Sazonov A. A., Frolova N. L.* Assessment of the Kolyma Runoff under current climate changes // Water Resources. 2023. Vol. 50, No. 3. P. 318–322. DOI: 10.1134/S0097807823700513 EDN: RLFTUW

26. *Lovato T., Peano D., Butenschön M., Materia S., Iovino D., Scoccimarro E., Galli G., Fogli P. G., Cherchi A., Bellucci A., Alessandri A., Di Pietro P., Palermo F., Sanna A., Sclauzero G., Solidoro C., Masina S., Gualdi S., Navarra A.* CMIP6 simulations with the CMCC Earth System Model (CMCC-ESM2) // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2022. Vol. 14, No. 3. DOI: 10.1029/2021MS002814 EDN: WZOTFL

27. Madsen K. K., Harrison F. A., Markwardt C. B., An H., Grefenstette B. W., Bachetti M., Miyasaka H., Kitaguchi T., Bhalerao V., Boggs S., Christensen F. E., Craig W. W., Forster K., Fuerst F., Hailey C. J., Perri M., Puccetti S., Rana V., Stern D., Walton D. J., Westergaard N. J., Zhang W. W. Calibration of the NuSTAR high-energy focusing X-ray telescope // The Astrophysical Journal Supplement Series. 2015. Vol. 220, No. 1. DOI: 10.1088/0067-0049/220/1/8 EDN: VGFMWD

28. *Makarieva O. M., Nesterova N., Haghighi A. T., Ostashov A., Zemlyanskova A.* Challenges of hydrological engineering design in degrading permafrost environment of Russia // Energies. 2022. Vol. 15, No. 7. DOI: 10.3390/en15072649 EDN: UMPTEG

29. *Makarieva O. M., 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. Vol. 10, No. 2. P. 689–710. DOI: 10.5194/essd-10-689-2018 EDN: UYBVMO

30. *Makarieva O M.., Zemlianskova A., Abramov D., Nesterova N., Ostashov A.* Geocryological Conditions of Small Mountain Catchment in the Upper Kolyma Highland (Northeastern Asia) // Geosciences. 2024. Vol. 14, No. 4. DOI: 10.3390/geosciences14040088 EDN: MKMKAU

31. *Mann H. B.* Nonparametric tests against trend // Econometrica. 1945. Vol. 13. P. 245–259.

32. *Meier W. N., Stroeve J.* An updated assessment of the changing Arctic sea ice cover // Oceanography. 2022. Vol. 35, No. 3–4. P. 10–19. DOI: 10.5670/oceanog.2022.114 EDN: WGCTFW

33. *Rasheed M. W., Tang J., Sarwar A., Shah S., Saddique N., Khan M. U., Imran Khan M., Nawaz S., Shamshiri R. R., Aziz M., Sultan M.* Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: A comprehensive review // Sustainability. 2022. Vol. 14, No. 18. DOI: 10.3390/su141811538 EDN: EJMTDX

34. *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, No. 14. DOI: 10.3390/rs15143564 EDN: QLDJUS

35. *Shiklomanov A., Lammers R.* River ice responses to a warming Arctic – Recent evidence from Russian rivers // Environmental Research Letters. 2019. Vol. 9, No. 3. DOI: 10.1088/1748-9326/9/3/035008 EDN: BLSVHW

36. *Streletskiy D. A., Suter L. J., Shiklomanov N. I., Porfiriev B. N., Eliseev D. O.* Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost // Environmental Research Letters. 2019. Vol. 14, No. 2. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6 EDN: AHATIK

37. *Vinogradov Y. B., Semenova O. M., Vinogradova T. A.* An approach to the scaling problem in hydrological modelling: The deterministic modelling hydrological system // Hydrological Processes. 2010. Vol. 25. P. 1055–1073. DOI: 10.1002/hyp.7901 EDN: OHZSJV

38. *Voldoire A., Saint-Martin D., Senesi S., Decharme B., Alias A., Chevallier M., Valcke S., Beau I., Belamari S., Berthet S., Cassou C., Cattiaux J., Cauquoin A., Centurioni L., Christophe Y., Colin J., Delire C., Deque M., Douville H., Ethe C., Geoffroy O., Gueremy J. F., Michou M., Msadek R., Nabat P., Nogues-Paegle J., Peano D., Ribes A., Salas-y-Mélia D., Sanchez E., Terray L., Voldoire A.* Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM-CM6-1 // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2019. Vol. 11. P. 2177–2213. DOI: 10.1029/2019MS001683 EDN: BSYOTJ

39. *Volodin E. M.* Possible climate change in Russia in the 21st century based on the INM-CM5-0 climate model // Russian Meteorology and Hydrology. 2022. Vol. 47. P. 327–333. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-5-13 EDN: OFXMNA

40. *Young S. S.* Global and regional snow cover decline: 2000–2022 // Climate. 2023. Vol. 11, No. 8. DOI: 10.3390/cli11080162 EDN: TYQBFG

References

1. *Avtomatizirovannaya informatsionnaya sistema gosudarstvennogo monitoringa vodnykh ob"ektov* (AIS GMVO) [Automated Information System for State Monitoring of Water Bodies (AIS GMVO)]. (In Russ.) URL: https://gmvo.skniivh.ru/ (Assessed 21 September 2025).

2. Alekseevskii N. I., Magritskii D. V., Mikhailov V. N. Antropogennye i estestvennye izmeneniya gidrologicheskikh ogranichenii dlya prirodopol'zovaniya v del'takh rek Rossiiskoi Arktiki [Anthropogenic and Natural Changes in Hydrological Constraints on Nature Management in River Deltas of the Russian Arctic]. *Vodnoe khozyaistvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2015, no. 1, pp. 14–31. (In Russ.)

3. Bantsekina T. V. *Osobennosti gidrotermicheskogo rezhima sloya sezonnogo protaivaniya krupnooblomochnykh sklonovykh otlozhenii v vesenne-letnii period (na primere Verkhnekolymskogo nagor'ya)* [Features of the Hydrothermal Regime of the Seasonal Thaw Layer of Course-Detrital Slope Deposits in the Spring–Summer Period (using the Upper Kolyma Upland as an Example)]. Extended abstract of Cand.Sc. dissertation, Institut merzlotovedeniya SO RAN. Yakutsk, 2003, 23 p. (In Russ.)

4. Bolgov M. V., Borshch S. V., Khaziakhmetov R. M. Opasnye gidrologicheskie yavleniya: metody analiza, rascheta i prognozirovaniya, smyagchenie negativnykh posledstvii [Hazardous hydrological phenomena: methods of analysis, calculation and forecasting, mitigation of negative consequences]. In *Voda i ekologiya: problemy i resheniya: Tezisy dokladov VII Vserossiiskogo gidrologicheskogo s"ezda. (Sankt-Peterburg, 19–21 noyabrya 2013 g.)* Saint Peterburg, 2013, pp.6–12. (In Russ.)

5. Borshch S. V., Simonov Yu. A., Khristoforov A. V. *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra RF. Vyp. 356. Sistema prognozirovaniya pavodkov i rannego opoveshcheniya o navodneniyakh na rekakh Chernomorskogo poberezh'ya Kavkaza i basseina Kubani* [Proceedings of the Hydrometeorological Research Center of the Russian Federation. Issue 356. Flood forecasting and early warning system for floods on the rivers of the Black Sea coast of the Caucasus and the Kuban basin]. Moscow: TRIADA LTD, 2015. 247 p. (In Russ.)

6. Burakov D. A., Karepova E. D., Shaidurov V. V. Matematicheskoe modelirovanie stoka: teoreticheskie osnovy, sovremennoe sostoyanie, perspektivy [Mathematical modeling of runoff: theoretical foundations, current status, and prospects]. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo universiteta. Gumanitarnye nauki*, 2006, no. 4, pp. 3–19. (In Russ.)

7. Verbitskaya E. M., Romanskii S. O. Rezul'taty ispytanii kratkosrochnykh operativnykh prognozov mezomasshtabnoi modeli WRF-ARW "KHAB-15" v punktakh Dal'nevostochnogo regiona Rossii [Results of testing short-term operational forecasts of the mesoscale WRF-ARW "KHAB-15" model at points in the Far East of Russia]. *Rezul'taty ispytaniya novykh i usovershenstvovannykh tekhnologii, modelei i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov*, 2016, no. 43, pp. 32–62.

8. Gartsman B. I. *Dozhdevye navodneniya na rekakh yuga Dal'nego Vostoka: metody raschetov, prognozov, otsenok riska* [Rain floods on the rivers of the southern Far East: methods of calculations, forecasts, and risk assessments]. Vladivostok: Dal'nauka, 2008. 223 p. (In Russ.)

9. Zhunusova O. R., Nesterova N. V., Makaryeva O. M. Modeling the maximum runoff characteristics of small rivers in the mountain permafrost zone based on pluviograph data. *Arctic and Antarctic*. 2024, no. 4, pp. 157–173. (In Russ.) DOI: 10.7256/2453-8922.2024.4.72657

10. Zemlyanskova A.A., Makaryeva O.M. Modeling the processes of runoff formation in rivers in the mountain permafrost zone of northeastern Russia with icing feeding on the example of the Anmangynda River. *Arctic and Antarctic*, 2024, no. 2, pp. 1–20. (In Russ.) DOI: 10.7256/2453-8922.2024.2.69780

11. 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, vol. 24, no. 1, pp. 43–56. (In Russ.) DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(43-56)

12. Makarieva, O.M., Nesterova, N.V., Vinogradova, T.A., Beldiman, I.N., Kolupaeva, A.D. Calculation of catastrophic floods characteristics of ungauged Tsemes river (Novorossiysk, the Black sea coast of Russia) on the basis of hydrological model "Hydrograph". *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 2019, vol. 64, no. 1, pp. 24–43. (In Russ.)

13. Motovilov Yu. G., Gel'fan A. N. *Modeli formirovaniya stoka v zadachakh gidrologii rechnykh basseinov* [Runoff Formation Models in River Basin Hydrology Problems]. Moscow: Institut vodnykh problem RAN, 2018. 300 p. (In Russ.)

14. Nesterova N. V., Makaryeva O. M., Vinogradova T. A., Lebedeva L. S. Simulating of the Baikal-Amur railway zone runoff formation on the basis of the Mogot trail ground data. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2018, no. 1, pp. 18–36. (In Russ.) DOI: 10.35567/1999-4508-2018-1-2

15. 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, no. 3, pp. 244–255. (In Russ.) DOI: 10.34753/HS.2023.5.3.244

16. *Otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Assessment Report on Climate Change and Its Consequences in the Russian Federation]. Vol. 1, 2. Moscow: Rosgidromet, 2008. (In Russ.) URL: http://climate2008.igce.ru/ (Assessed 21 September 2025).

17. *Spravka o sostoyanii i perspektivakh ispol'zovaniya mineral'no-syr'evoi bazy Magadanskoi oblasti na 15.09.2022 (ot 14.01.2021 g. № 049–00016–21–00)* [Information on the Status and Prospects for the Use of the Mineral Resource Base of the Magadan Region as of 15.09.2022 (dated 14.01.2021 No. 049–00016–21–00)]. Saint Peterburg: FGBU «VSEGEI», 2021. (In Russ.)

18. Frolov A. V., Asmus V. V., Zatyagalova V. V., Krovotyntsev V. A., Borshch S. V., Vil'fand R. M., Zhabina I. I., Kudryavtseva O. I., Leont'eva E. A., Simonov Y. A., Stepanov Y. A. Gis-Amur system of flood monitoring, forecasting, and early warning. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, no. 3, pp. 5–21. (In Russ.)

19. Khamutova M. V., Kushnikov V. A., Bogomolov A. S., Rezchikov A. F. Models and methods for forecasting data for the control system for flood preparation and liquidation processes. In *Upravlenie razvitiem krupnomasshtabnykh sistem (MLSD'2023): Trudy XVI Mezhdun. konf. (Moskva, 26–28 sentyabrya 2023 g.).* Moscow, 2023, pp. 1508–1514. (In Russ.) DOI: 10.25728/mlsd.2023.1508

20. Ayzel G., Abramov D. OpenForecast: An Assessment of the Operational Run in 2020–2021. *Geosciences*, 2022, vol. 12, no. 2. DOI: 10.3390/geosciences12020067

21. Climate Data Store. URL: https://cds.climate.copernicus.eu/ (Assessed 27 October 2025).

22. European Flood Awareness System (EFAS). URL: https://www.copernicus.eu/en/european-flood-awareness-system (Assessed 27 October 2025).

23. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge. New York: Cambridge University Press, 2023. 2391 p.

24. Langer M., Nitzbon J., Groenke B., Assmann L. M., Schneider von Deimling T., Stuenzi S. M., Westermann S. The evolution of Arctic permafrost over the last 3 centuries from ensemble simulations with the CryoGridLite permafrost model. *The Cryosphere*, 2024, vol. 18, no. 1, pp. 363–385. DOI: 10.5194/tc-18-363-2024

25. Lisina A. A., Krylenko I. N., Kalugin A. S., Motovilov Yu. G., Sazonov A. A., Frolova N. L. Assessment of the Kolyma Runoff under current climate changes. *Water Resources*, 2023, vol. 50, no. 3, pp. 318–322. DOI: 10.1134/S0097807823700513

26. Lovato T., Peano D., Butenschön M., Materia S., Iovino D., Scoccimarro E., Galli G., Fogli P. G., Cherchi A., Bellucci A., Alessandri A., Di Pietro P., Palermo F., Sanna A., Sclauzero G., Solidoro C., Masina S., Gualdi S., Navarra A. CMIP6 simulations with the CMCC Earth System Model (CMCC-ESM2). *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2022, vol. 14, no. 3. DOI: 10.1029/2021MS002814

27. Madsen K. K., Harrison F. A., Markwardt C. B., An H., Grefenstette B. W., Bachetti M., Miyasaka H., Kitaguchi T., Bhalerao V., Boggs S., Christensen F. E., Craig W. W., Forster K., Fuerst F., Hailey C. J., Perri M., Puccetti S., Rana V., Stern D., Walton D. J., Westergaard N. J., Zhang W. W. Calibration of the NuSTAR high-energy focusing X-ray telescope. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2015, vol. 220, no. 1. DOI: 10.1088/0067-0049/220/1/8

28. Makarieva O. M., Nesterova N., Haghighi A. T., Ostashov A., Zemlyanskova A. Challenges of hydrological engineering design in degrading permafrost environment of Russia. *Energies*, 2022, vol. 15, no. 7. DOI: 10.3390/en15072649

29. Makarieva O. M., 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, vol. 10, no. 2, pp. 689–710. DOI: 10.5194/essd-10-689-2018

30. Makarieva O. M., Zemlianskova A., Abramov D., Nesterova N., Ostashov A. Geocryological Conditions of Small Mountain Catchment in the Upper Kolyma Highland (Northeastern Asia). *Geosciences*, 2024, vol. 14, no. 4. DOI: 10.3390/geosciences14040088

31. Mann H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, vol. 13, pp. 245–259.

32. Meier W. N., Stroeve J. An updated assessment of the changing Arctic sea ice cover. *Oceanography*, 2022, vol. 35, no. 3–4, pp. 10–19. DOI: 10.5670/oceanog.2022.114

33. Rasheed M. W., Tang J., Sarwar A., Shah S., Saddique N., Khan M. U., Imran Khan M., Nawaz S., Shamshiri R. R., Aziz M., Sultan M. Soil moisture measuring techniques and factors affecting the moisture dynamics: A comprehensive review. *Sustainability*, 2022, vol. 14, no. 18. DOI: 10.3390/su141811538

34. 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, no. 14. DOI: 10.3390/rs15143564

35. Shiklomanov A., Lammers R. River ice responses to a warming Arctic – Recent evidence from Russian rivers. *Environmental Research Letters*, 2019, vol. 9, no. 3. DOI: 10.1088/1748-9326/9/3/035008

36. Streletskiy D. A., Suter L. J., Shiklomanov N. I., Porfiriev B. N., Eliseev D. O. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters*, 2019, vol. 14, no. 2. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6

37. Vinogradov Y. B., Semenova O. M., Vinogradova T. A. An approach to the scaling problem in hydrological modelling: The deterministic modelling hydrological system. *Hydrological Processes*, 2010, vol. 25, pp. 1055–1073. DOI: 10.1002/hyp.7901

38. Voldoire A., Saint-Martin D., Senesi S., Decharme B., Alias A., Chevallier M., Valcke S., Beau I., Belamari S., Berthet S., Cassou C., Cattiaux J., Cauquoin A., Centurioni L., Christophe Y., Colin J., Delire C., Deque M., Douville H., Ethe C., Geoffroy O.,

Gueremy J. F., Michou M., Msadek R., Nabat P., Nogues-Paegle J., Peano D., Ribes A., Salas-y-Mélia D., Sanchez E., Terray L., Voldoire A. Evaluation of CMIP6 DECK experiments with CNRM-CM6-1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2019, vol. 11, pp. 2177–2213.

39. Volodin E. M. Possible climate change in Russia in the 21st century based on the INM-CM5-0 climate model. *Russian Meteorology and Hydrology*, 2022, vol. 47, pp. 327–333. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-5-5-13

40. Young S. S. Global and regional snow cover decline: 2000–2022. *Climate*, 2023, vol. 11, no. 8. DOI: 10.3390/cli11080162

Статья поступила в редакцию: 26.11.25, одобрена после рецензирования: 24.12.25, принята к опубликованию: 11.06.26.

The article was submitted: 26 November 2025; approved after review: 24 December 2025; accepted for publication: 11 June 2026.

Информация об авторах

Эмиль Халильевич Кудяков
Магистрант, лаборант-исследователь,
Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова;
119049, г. Москва, ул. Ленинские горы, д. 1
ORCID: 0009-0001-2699-3237

Information about the authors

Emil Kh. Kudyakov
Master's Student, Laboratory Researcher,
Lomonosov Moscow State University;
1, Leninskie gory, Moscow, 119049, Russia
ORCID: 0009-0001-2699-3237

e-mail: kudyakov.emil@mail.ru

Наталия Вадимовна Нестерова
Кандидат технических наук, научный сотрудник,
Санкт-Петербургский государственный университет;
199034, г. Санкт-Петербург, наб. Университетская, д. 7–9
ORCID: 0000-0003-0677-4982

Nataliia V. Nesterova
Candidate of Technical Sciences, Researcher,
St. Petersburg State University;
7–9, Universitetskaya emb., St. Petersburg, 199034, Russia.
ORCID: 0000-0003-0677-4982

e-mail: n.v.nesterova@spbu.ru

Анастасия Александровна Землянскова
Кандидат технических наук, научный сотрудник,
Санкт-Петербургский государственный университет;
199034, г. Санкт-Петербург, наб. Университетская, д. 7–9
ORCID: 0000-0002-2249-5708

Anastasiia A. Zemlianskova
Candidate of Technical Sciences, Researcher,
St. Petersburg State University;
7–9, Universitetskaya emb., St. Petersburg,
199034, Russia.
ORCID: 0000-0002-2249-5708

e-mail: anastasiazemlanskova@gmail.com

Полина Андреевна Никитина
Лаборант-исследователь,
Санкт-Петербургский государственный университет;
199034, г. Санкт-Петербург, наб. Университетская, д. 7–9
ORCID: 0000-0003-2439-2291

Polina A. Nikitina
Laboratory Researcher, St. Petersburg State University;
7–9, Universitetskaya emb., St. Petersburg,
199034, Russia
ORCID: 0000-0003-2439-2291

e-mail: nikitinapolina243@gmail.com

Ольга Михайловна Макарьева
Кандидат технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Санкт-Петербургский государственный университет;
199034, г. Санкт-Петербург, наб. Университетская, д. 7–9
ORCID: 0000-0002-2532-4306

Olga M. Makarieva
Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher,
St. Petersburg State University;
7–9, Universitetskaya emb., St. Petersburg,
199034, Russia
ORCID: 0000-0002-2532-4306

e-mail: o.makareva@spbu.ru

Вклад авторов
Кудяков Э. Х. – сбор и обработка материала, написание первоначального текста статьи.
Нестерова Н. В. – идея, научное редактирование текста, обработка материала.
Землянскова А. А. – обработка материала, научное редактирование текста.
Никитина П. А. – сбор материала, визуализация данных.
Макарьева О. М. – идея, научное руководство, научное редактирование текста.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors
Emil Kh. Kudyakov – material collection and processing; writing of the initial draft of the article.
Nataliia V. Nesterova – conceptualization; scientific editing of the text; data processing.
Anastasiia A. Zemlianskova – data processing; scientific editing of the text.
Polina A. Nikitina – material collection; data visualization.
Olga M. Makarieva – conceptualization; scientific supervision; scientific editing of the text.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.