

На правах рукописи



Нестерова Наталия Вадимовна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК БАССЕЙНОВ ГОРНЫХ РЕК
РОССИИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ИЗУЧЕННОСТИ В
СОВРЕМЕННОМ КЛИМАТЕ**

1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

Научный руководитель: **Макарьева Ольга Михайловна**, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский государственный университет

Официальные оппоненты: **Болгов Михаил Васильевич**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией моделирования поверхностных вод Института водных проблем Российской академии наук, г. Москва

Гайдукова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», г. Москва

Защита состоится «1» декабря 2022 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.039.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт водных и экологических проблем Сибирского отделения Российской академии наук (ИВЭП СО РАН) по адресу: 656038, Россия, г. Барнаул, ул. Молодежная, 1. Факс: (3852) 240396. E-mail: iwep@iwep.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



д.г.н., доцент,
Ирина Дмитриевна Рыбкина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние десятилетия глобальное потепление оказало воздействие на природные и антропогенные системы на всех континентах и в мировом океане (IPCC, 2014). Во многих регионах России и мира наблюдается изменение динамики и количества атмосферных осадков, режима влажности и температуры почвы, снежного и ледяного покрова, состояния многолетнемерзлых грунтов. Все эти факторы приводят к значительной трансформации гидрологического режима, сезонному перераспределению элементов водного баланса, изменению количества и качества водных ресурсов.

В последние десятилетия, характеризующиеся наиболее выраженным изменением климата, в нашей стране произошло значительное сокращение гидрометеорологической сети и программ наблюдений за гидрологическим циклом. Труднодоступные горные бассейны рек, а также арктические регионы России часто можно отнести к категории гидрологически неизученных. Горные территории не только отличаются разнообразием ландшафтов, рельефа, климатических условий и, как следствие, доминирующих гидрологических процессов, но и являются источником водных ресурсов, имеют решающее значение для поддержания водного режима и устойчивого социально-экономического развития регионов России и мира. Более того, горные речные бассейны наиболее часто подвержены воздействию опасных гидрологических явлений, которые наносят экономический ущерб и приводят к гибели людей.

Современные стандартные методы гидрологических расчетов основаны на методиках, разработанных 40-50 лет назад на основе данных наблюдений в стационарный период климата. Использование разработанных ранее методик не всегда оправданно в условиях изменений климата, а уточнение параметров расчетных формул на основе статистических обобщений для многих регионов практически невозможно из-за отсутствия данных наблюдений. В связи с этим, задача разработки современных подходов к расчетам стока является актуальной. Основой таких подходов может стать комплексное использование методов математического распределенного моделирования гидрологических процессов.

Цель исследования – разработка и совершенствование методики гидрологических расчетов в бассейнах горных рек России, отличающихся климатическими и физико-географическими условиями и характеризующихся различной степенью изученности, на основе метода математического моделирования с учетом современного изменения климата.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

1. Анализ основных проблем гидрологических расчетов горных территорий России в условиях изменения климата.

2. Адаптация гидрологической модели «Гидрограф» (ее алгоритмов и программы ЭВМ) к моделированию процессов формирования стока на внутрисуточном расчетном интервале времени.

3. Аprobация разработанной усовершенствованной модели «Гидрограф» в задачах моделирования гидрографов стока воды с расчетным шагом менее суток и оценки характеристик максимального стока в бассейнах малых рек, характеризующихся формированием быстроразвивающихся ливневых паводков (на примере рек Черноморского побережья Северного Кавказа).

4. Параметризация гидрологической модели «Гидрограф» на основе краткосрочных данных специальных наблюдений, ее верификация и апробация в задачах расчета и прогноза изменений характеристик стока и оценки водного баланса различных ландшафтов на неизученных горных водосборах Северо-Востока России (Восточная Якутия, Магаданская область и полуостров Чукотка).

5. Разработка параметрического обеспечения математической модели «Гидрограф» в целях расчета характеристик стока и элементов водного баланса в бассейнах горных рек южной криолитозоны. Аprobация разработанного набора параметров в задачах оценки максимальных расходов воды различной обеспеченности и расчета характеристик катастрофических паводков неизученных горных рек (на примере рек Иркутской области и Республики Тыва).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Усовершенствованная гидрологическая модель процессов формирования стока «Гидрограф» позволяет использовать входную метеорологическую информацию детального временного разрешения и учитывать внутрисуточную динамику процессов

формирования стока в задачах расчета гидрологических характеристик.

2. Усовершенствованная модель «Гидрограф» (с расчетным шагом от минут до часов) позволяет оценивать характеристики максимального стока в бассейнах малых горных рек, подверженных формированию быстроразвивающихся ливневых паводков. Апробация методики проведена на примере речных бассейнов Черноморского побережья Северного Кавказа.

3. Параметризация гидрологической модели «Гидрограф» на основе краткосрочных данных специальных наблюдений показала свою эффективность в задачах расчета характеристик стока и элементов водного баланса. Использование верифицированной модели с учетом современных климатических данных позволяет производить расчеты в задачах оценки и прогноза изменений гидрологических характеристик на неизученных горных бассейнах рек северной криолитозоны. Апробация методики проведена на примере речных бассейнов Северо-Востока России.

4. Разработанное параметрическое обеспечение гидрологической модели «Гидрограф» позволяет рассчитывать соотношение элементов водного баланса, пространственно-временную динамику переменных состояний бассейнов рек, воспроизводить гидрографы стока, в том числе катастрофических паводков, и оценивать максимальные расходы на неизученных горных реках южной криолитозоны. Верификация набора параметров модели «Гидрограф» и апробация методики проведена на примере речных бассейнов неизученных горных рек Амурской области, Иркутской области и Республики Тыва.

Научная новизна исследования заключается в:

- разработке методики расчета характеристик стока горных рек с учетом внутрисуточной динамики выпадения жидких осадков и процессов формирования стока;

- применении усовершенствованных методов математического моделирования в задачах расчета характеристик стока и элементов водного баланса неизученных речных бассейнов, а также для исследования процессов формирования стока и их современных изменений в горных регионах России, отличающихся физико-географическими условиями, в том числе, в криолитозоне;

- возможности воспроизведения гидрографов катастрофических паводков и оценки их максимальных характеристик на водосборах рек различной степени изученности.

Объекты исследования. В качестве основных объектов исследования выбраны бассейны рек, расположенные в горных регионах России, наиболее сильно подверженных воздействию изменения климата и формированию катастрофических паводков – реки горных территорий Магаданской области, Республики Саха (Якутия), Амурской области, Иркутской области, Республики Тыва и Краснодарского края.

Степень достоверности и апробация результатов. В работе использовались данные гидрометеорологического мониторинга сети Росгидромет, в том числе архивные, включая материалы об интенсивности и продолжительности выпадения осадков по данным плувиографов метеорологических станций, ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши, данные специальных наблюдений на Высокогорной станции Сунтар-Хаята и гидрологическом полигоне «Могот» с типичными для горных районов распространения многолетнемерзлых пород физико-географическими условиями. Результаты исследования были интерпретированы с учетом достижений мировой науки в рассматриваемой области.

Методика и методология исследования. Математическое моделирование процессов формирования стока проводилось на основе распределенной детерминированной гидрологической модели «Гидрограф», разработанной профессором Юрием Борисовичем Виноградовым. В качестве входных метеорологических данных для гидрологической модели «Гидрограф» использовались данные метеорологической сети Росгидромет и специальных наблюдений. Все приведенные картосхемы были построены в среде ArcGIS.

Практическая и теоретическая значимость проведенных исследований. Работа значима как с фундаментальной точки зрения – исследование, моделирование и прогноз поведения природных систем и их экстремальных состояний в современных климатических условиях, так и с практической точки зрения – разработка методов расчета гидрологических характеристик для проектирования и планирования хозяйственной деятельности и обеспечения безопасности населения.

Личный вклад автора. Результаты, представленные в данной работе, получены автором самостоятельно, либо при его непосредственном участии в коллективе соавторов. Разработка параметров, гидрологическое моделирование и верификация модели проводились автором самостоятельно.

Апробация работы. Основные положения и выводы диссертационной работы были доложены автором на следующих международных и российских конференциях: Arctic Science Summit Week 2021 (20-26 марта 2021 г.); XI Всероссийская научно-практическая конференция «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России» (5-7 апреля 2021 г.); VIII Межрегиональная конференция молодых ученых, приуроченная к 60-летию Северо-Восточного комплексного научно-исследовательского института им. Н.А. Шило ДВО РАН (26-27 ноября 2020 г.); Всероссийская конференция с международным участием, посвященная 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, г. Якутск (28–30 сентября 2020 г.); Международная конференция для молодых ученых и аспирантов «Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология: от познания к мировоззрению» памяти выдающегося российского гидролога Ю. Б. Виноградова (Санкт-Петербург, Россия, 7-9 декабря 2020 г.); Всероссийская конференция с международным участием «Устойчивость природных и технических систем в криолитозоне» посвященная 60-летию образования Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН (г. Якутск (Россия), 28–30 сентября 2020 г.); The 23rd International Congress on Modelling and Simulation (Canberra, Australia, 2019); The 27th IUGG General Assembly (Montréal, Québec, Canada, 2019); European Geosciences Union General Assembly (Vienna, Austria, 2021, 2020, 2019, 2018, 2017, 2016, 2015); 5th European Conference On Permafrost (Chamonix, France, 2018); V Всероссийский научно-молодёжный геокриологический форум с международным участием (Якутск, 2018 г); International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics (St. Petersburg, Russia, 2018); Международная конференция для молодых ученых и аспирантов «Третьи Виноградовские чтения. Грани гидрологии» памяти выдающегося российского гидролога Ю. Б. Виноградова (Санкт-Петербург, 2018); High altitudes meet high latitudes. Globalizing Polar Issues

(Switzerland, Crans-Montana, 2017); International conference “Earth’s Cryosphere: Past, Present and Future” (Pushchino, 2017); Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность: X международная научная конференция молодых ученых и талантливых студентов «Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность» (Москва, 2016); XI International Conference on Permafrost (Potsdam, Germany, 2016).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 17 статей в рецензируемых изданиях, из них 7 – в журналах, рекомендованных ВАК, 10 – в изданиях, входящих в системы цитирования Scopus или Web of Science.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Объем работы составляет 157 страниц (и 20 страниц Приложения). Текст исследования иллюстрирован 70 рисунками и дополнен 22 таблицами. Список использованных источников включает 258 наименований.

Благодарности. Выражаю огромную благодарность научным руководителям Ольге Михайловне Макарьевой, Татьяне Александровне Виноградовой, а также сотрудникам кафедры гидрологии суши Санкт-Петербургского государственного университета. Благодарю за совместную работу Андрея Николаевича Шихова (Пермский государственный национальный исследовательский университет), Андрея Алексеевича Остахова и Анастасию Александровну Землянскову (Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН). Выражаю искреннюю благодарность директору Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН Михаилу Николаевичу Железняку. Посвящаю работу своим родителям Вадиму Владимировичу и Марине Юрьевне Нестеровым.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** описывается общая характеристика работы, формулируются актуальность, цель и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, приводятся научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и апробация результатов.

В **Главе 1** рассмотрены основные проблемы гидрологических расчетов на территории России (*Раздел 1*) и дан обзор использования метода гидрологического моделирования в задачах расчета характеристик стока, в том числе экстремальных, и водного баланса в условиях изменения климата (*Раздел 2*).

Изменения климата вызывает значительную трансформацию гидрологического цикла. Поэтому ретроспективные наблюдения за стоком не всегда могут считаться репрезентативными в современных условиях. Вместе с тем, плотность гидрологической сети в России в последние десятилетия сократилась более чем в полтора раза. Таким образом, использование стандартных методов расчета для оценки характеристик стока в удаленных горных регионах страны становится крайне затруднительным.

Низкая плотность стандартной сети наблюдений и практическое отсутствие данных о процессах формирования стока в горных районах некоторых регионов России может компенсироваться организацией малых научно-исследовательских водосборов для изучения гидрологических процессов в различных физико-географических условиях и развитием методов математического моделирования. Поэтому разработка и использование новых методов оценки гидрологических характеристик стока, в том числе экстремальных, является приоритетной задачей.

В **Главе 2** приводится описание распределенной детерминированной гидрологической модели «Гидрограф» (*Раздел 1*). Модель описывает процессы наземного гидрологического цикла и позволяет проводить априорную оценку параметров и рассчитывать гидрологические характеристики и элементы водного баланса горных водосборов с различными площадями и физико-географическим положением.

Выпадение и задержание осадков, накопление, уплотнение и сттаивание снежного покрова, динамика влаги и тепла в снеге и в

верхних горизонтах грунта описываются в модели в явном виде. Процессы подземное питания, склоновой и русловой трансформации стока, ветрового перераспределения снега, испарения рассчитываются концептуальными методами.

В ранее разработанной версии модели «Гидрограф» расчетный интервал времени (РИВ) составлял одни сутки. При расчете процессов формирования стока учитывалась средняя интенсивность выпадения жидких осадков, которая при отсутствии фактических данных рассчитывалась на основе степенной зависимости продолжительности выпадения от суммарного слоя осадков. Стандартные значения параметров, задаваемые в модели «Гидрограф» для расчета продолжительности и интенсивности выпадения осадков, часто не соответствуют гидрометеорологической ситуации, а результаты моделирования экстремальных характеристик стока напрямую зависят от наличия этих данных.

Поэтому выполнена адаптация алгоритмов гидрологической модели «Гидрограф» и программы ЭВМ к моделированию процессов формирования стока на внутрисуточном расчетном интервале времени (Раздел 2). Проведена модификация блоков модели, связанных с динамикой влажности почвенного профиля. Дорусловая трансформация стока в модели «Гидрограф» описывается с помощью концепции стоковых элементов. Пропускная способность стоковых элементов почвенного профиля в различных ландшафтах, а также в условиях высокой интенсивности поступления воды при малом расчетном интервале времени (РИВ) может быть ограничена. Полная или частичная заполненность объема свободной пористости на конец РИВ влияет на результаты расчета влажности расчетных слоев почвы и их теплового баланса. Эти особенности формирования почвенного стока были учтены в обновленной версии модели «Гидрограф» и сформулированы следующим образом:

1. Для расчета капиллярной влагоемкости расчётных слоев почвы (РСП) ($h_{кв}$) вводится формула (Ю.Б. Виноградов, 1988):

$$(h_{кв})_i = \sqrt[n]{\left[1 - \frac{(L-x_i)}{h_k}\right] (\varepsilon_i \Delta x_i)^n + \frac{(L-x_i)}{h_k} (h_{max_i})^n},$$

где h_k – капиллярный напор (предельная высота капиллярного поднятия) (м), n – эмпирический параметр, показатель степени (б/р), L – глубина залегания уровня почвенных вод (м), x_i и Δx_i –

глубина расположения центра РСП и толщина последнего (м), ε_i – пористость РСП (б/р), h_{max} – максимальная водоудерживающая способность (м). При $n=1$ констатируется линейная функция капиллярной влагоемкости, при наличии эмпирических данных параметр n может быть откалиброван.

2. На каждый РИВ (t) учитывается величина предельного слоя истечения ($PВ$) из стоковых элементов:

$$PВ = \beta[\exp(\alpha w) - 1] * t,$$

где w – объем воды [$м^3$], аккумулированной стоковым элементом; t – время [с]; α, β – гидравлические параметры стоковых элементов заданного типа.

3. Количество воды в стоковых элементах в конце РИВ учитывается при расчете влажности РСП и влияет на результаты расчета динамики тепла в вертикальном профиле почво-грунтов.

4. Влажность или льдистость лимитирована величиной пористости РСП. При инициализации расчетного алгоритма на основе данных о начальных условиях определяется положение РСП в одной из трех зон – насыщенная зона, капиллярная зона, зона вне капиллярной каймы.

В **Главе 3** представлены результаты разработки методики моделирования гидрографов стока воды с расчетным шагом менее суток и оценки характеристик максимального стока в бассейнах малых рек на основе гидрологической модели «Гидрограф» (на примере рек Черноморского побережья Северного Кавказа).

В *Разделе 1* проведена адаптация детерминированной распределенной гидрологической модели «Гидрограф» к условиям формирования стока на территории Черноморского побережья Северного Кавказа России, характеризующейся повышенным риском прохождения катастрофических паводков, сформированных выпадением ливневых осадков. Выполнена схематизация территории и выделены 6 основных стокоформирующих комплексов (СФК), а также оценены их параметры. Для верификации модели «Гидрограф» проведено непрерывное моделирование процессов формирования стока с суточным интервалом в бассейнах рек с площадью от 14 до 839 км², результаты моделирования признаны удовлетворительными (Табл. 1).

Таблица 1 Средние значения статистических критериев и элементов водного баланса для водосборов исследования

Код поста	Река – створ	S	Период моделирования	Y _o	Y _s	P	E	NS (av/m ed)	NS (max, год)	NS (min, год)
82003	р. Дюрсо – свх Абрау-Дюрсо	531.9	1966-1977	272	291	733	445	- 0.13/ 0.25	0.79 (1966)	-1.9 (1969)
82005	р. Алерба – пос. Светлый	59.7	1977-1997	486	515	1081	565	-0.07/ 0.30	0.64 (1981)	-2.2 (1984)
82010	р. Вулан – к.п. Архипо-Осиповка	265	1977-2013	644	608	1149	543	-2.58/ 0.36	0.61 (1978)	-20.4 (2012)
82013	р. Туапсе – г. Туапсе	351	1966-2013	1200	1238	1805	567	0.57/ 0.60	0.78 (1981)	0.2 (1972)
82023	р. Куапсе – Мамедова Щель	14	1977-1987	1539	1069	1586	515	0.56/ 0.60	0.82 (1981)	0.25 (1985)
82034	р. Сочи – с. Пластунка	238	1982-1988	1923	1736	2312	552	0.39/ 0.56	0.62 (1986)	-0.72 (1983)
82060	р. Мзымта – пос. Казачий Брод	839	1982-1988	2041	1676	2198	465	0.23/ 0.21	0.53 (1984)	-0.09 (1985)
-	р. Цемес – г. Новороссийск	82.6	1977-2013	-	330	833	503	-	-	-

где S – площадь водосбора, км²; Y_o и Y_s – наблюдаемый и рассчитанный среднемесячный годовой слой стока, мм; P – осадки, мм; E – общее испарение, мм; av - среднее значение NS; med – значение медианы NS; max и min – максимальное и минимальное значение NS.

В *Разделе 2* выполнена апробация методики расчета характеристик максимального стока для малых рек Черноморского побережья на примере р. Туапсе.

Выполнено непрерывное моделирование процессов формирования стока с суточным шагом за период с 1966 по 2013 гг. Медианное значение критерия эффективности Нэша-Сатклиффа при моделировании гидрографов стока с расчетным шагом сутки составило 0.60 для периода продолжительностью 32 года, что позволило оценить полученные результаты как удовлетворительные. Оцифрованные данные pluвиографов об осадках для двух метеорологических станций «Горный» и «Туапсе» в пределах исследуемого бассейна за период с 1980 по 2011 годы использованы для моделирования максимальных срочных расходов воды, в том числе трех выдающихся паводков (1991, 2005, 2010).

Проведены численные эксперименты с данными о пространственном распределении осадков для расчета срочного расхода катастрофического паводка 1 августа 1991 года. Оценены величины срочных и суточных расходов для паводка в июне 2005 года, когда наблюдения за стоком на р. Туапсе не проводились, и в 2010 году, когда опубликованные данные о расходах могут носить неопределенный характер (Рис. 1). Результаты моделирования по

любым моделям в рассматриваемом регионе критически зависят от количества осадкомерных пунктов.

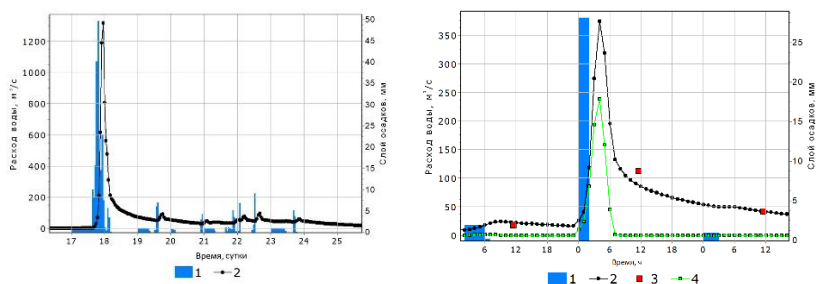


Рисунок 1 Слева – результаты моделирования выдающегося паводка на р. Туапсе, 16-23 июля 2005 г. 1 – 1-часовые осадки (мм), 2 – рассчитанный 1-часовой гидрограф стока ($\text{м}^3/\text{с}$); справа – результаты моделирования выдающегося паводка на р. Туапсе, 15 - 16 октября 2010 г. 1 – 1-часовые осадки (мм), 2 – рассчитанный 1-часовой гидрограф стока ($\text{м}^3/\text{с}$), 3 – рассчитанный суточный гидрограф стока ($\text{м}^3/\text{с}$), 4 – гидрограф поверхностного стока ($\text{м}^3/\text{с}$)

В *Разделе 3* представлен пример использования методики оценки характеристик стока и водного баланса в задачах расчетов на неисследованном водосборе р. Цемес. Проведено непрерывное моделирование стока на водосборе р. Цемес за период с 1977–2013 гг. с суточным разрешением, при этом использовался набор параметров модели, верифицированных на изученных водосборах. На основе детальных данных pluviограмм ливневых осадков на метеорологических станциях рассчитаны максимальные расходы воды трех катастрофических паводков на р. Цемес в 1988, 2002 и 2012 гг. с 1-часовым временным разрешением. Рассчитанные максимальные расходы могут быть приняты за срочную величину расхода и составили 688, 284 и 361 $\text{м}^3/\text{с}$ соответственно. Несмотря на более высокое абсолютное количество выпавших осадков при прохождении паводка 2012 г., рассчитанный максимальный расход приходится на событие 1988 года, что связано с максимальной увлажненностью водосбора на момент выпадения ливневых осадков (Рис. 2). Результаты моделирования указывают на необходимость учета состояния водосбора, предшествующего экстремальному гидрологическому событию, – именно уникальное сочетание

стокоформирующих и метеорологических факторов определяют его величину.

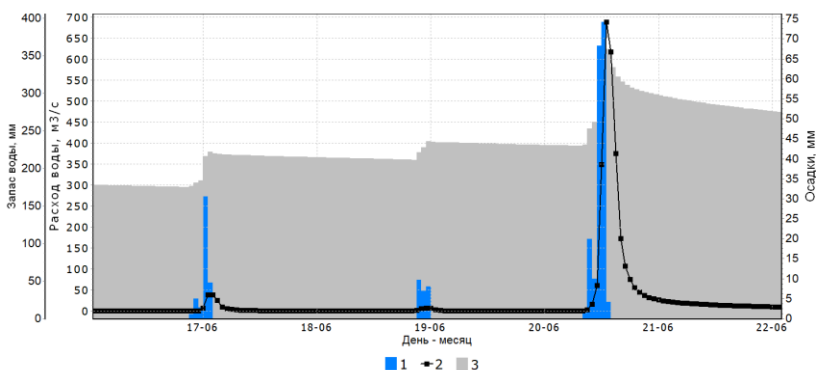


Рисунок 2 Развитие паводка 20 июня 1988 года, р. Цемес (г. Новороссийск); 1 – осадки, мм, 2 – рассчитанный 1-часовой расход воды, м³/с, 3 – запас воды в бассейне, мм

Глава 4 посвящена разработке методики параметризации гидрологической модели «Гидрограф» в бассейнах горных рек северной криолитозоны на основе краткосрочных данных специальных наблюдений. Проведена верификация и апробация модели в задачах расчета и прогноза изменений характеристик стока и оценки водного баланса различных ландшафтов на неизученных горных водосборах Северо-Востока России (Восточная Якутия, Магаданская область и полуостров Чукотка).

В Разделе 1 представлена параметризация и верификация гидрологической модели «Гидрограф» на основе краткосрочных данных специальных наблюдений на Высокогорной станции Сунтар-Хаята. В условиях крайней недостаточности данных наблюдений на Северо-Востоке привлечение данных полевых наблюдений для параметризации моделей очень важно, даже если такие наблюдения ограничены по времени.

Высокогорная станция Сунтар-Хаята, на которой проводились гляциологические, геоморфологические и геокриологические наблюдения, функционировала в период 1957–1959 гг. в бассейне р. Сунтар в рамках программы Международного геофизического года. В работе использованы отчетные материалы комплексных наблюдений на Высокогорной станции Сунтар-Хаята из архива

Института Мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН в Якутске.

На основе данных наблюдений и описаний ландшафтов и их характеристик разработаны параметры модели «Гидрограф» для высокогорного гольцового ландшафта. Проведена верификация параметров модели «Гидрограф» на основе сравнения рассчитанных и наблюдаемых характеристик переменных состояний, в том числе запаса воды в снежном покрове, температуры грунта на различных глубинах, величин протаивания и промерзания деятельного слоя почвы, испарения с ландшафтов. Результаты моделирования признаны удовлетворительными (Рис. 3).

Выполнено непрерывное моделирование стока с суточным разрешением для бассейна р. Сунтар в створе устье р. Сахарынья за 1957-2012 гг. Получены основные характеристики водного баланса за данный период моделирования, рассчитаны значения критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (NS) и построены гидрографы стока (Табл. 2). Результаты моделирования стока за данный период можно признать удовлетворительными. Факторами, обуславливающими погрешность расчетов, следует признать низкую точность гидрометеорологических измерений, а также недостаточно полную оценку доли участия подземных вод, наледей и ледников в формировании стока.

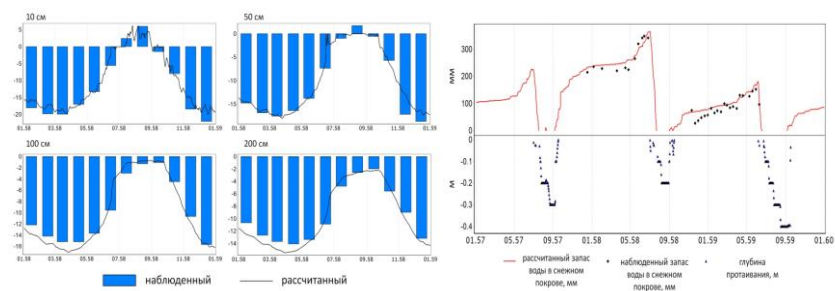


Рисунок 3 Наблюденная и рассчитанная температура почвы (°C) на заданных глубинах в 1958-1959 гг., запасы воды в снежном покрове (мм) и глубина протаивания грунтов (м) в 1957-1959 гг. на станции Сунтар-Хаята

На основе результатов моделирования рассчитан вклад каждого СФК в формирование стока в замыкающем створе. На гольцовый комплекс, занимающий 7 % территории водосбора, приходится 20 % общего объема стока в замыкающем створе р.

Сунтар, а коэффициент стока достигает 0.92. Наибольший вклад на формирование стока водосбора р. Сунтар вносят тундры с долей стока 49 % и коэффициентом стока 0.75. Суммарный сток с ландшафтов тайги и заболоченных редколесий, занимающих 56 % территории, составляет около 31%.

Таблица 2 Рассчитанные и наблюдаемые характеристики водного баланса и гидрографов стока, р. Сунтар – устье р. Сахарынья

Период	Y _o	Y _s	P	E	NS (av, med, max/min)
1957-1964	180	199	344	143	0.75, 0.75, 0.88/0.40
1966-2012	180	203	332	127	0.58, 0.67, 0.87/-0.90

обозначения аналогично Табл. 1.

В *Разделе 2* представлены результаты апробации методики оценки характеристик стока и водного баланса при моделировании стока на водосборах различного масштаба в условиях отсутствия данных специальных наблюдений. Для этого на Северо-Востоке России были выбраны несколько бассейнов рек, имеющие различные площади и относящиеся к бассейнам рек Яны, Индигирки, Колымы и территории Чукотки (Табл. 3). Результаты моделирования признаны удовлетворительными, а разработанная методика может быть применима для моделирования стока в условиях крайней недостаточности данных.

Таблица 3 Пример результата моделирования водосборов рек различной площади

Бассейн реки	Река-створ	S	H	Период	Y _o	Y _s	P	E	NS (av)	NS (max)	NS (min)
Индигирка	Сахарынья – устье	84.4	833	1966-2012	93.0	113	294	181	0.3	0.7	-0.8
Колыма	Анмангында – 159 км трассы	400	686	1966-1987	273	237	375	125	0.4	0.7	-0.9
Индигирка	Артык-Юрях	644	591	1966-1991	82.0	81.8	274	189	0.1	0.7	-1.0
Яна	Чаркы – 3.5 км от устья	8290	274	1966-2007	216	223	361	120	0.3	0.7	-1.8

обозначения аналогично Табл. 1

В *Разделе 3* приведен пример апробации методики оценки характеристик стока и водного баланса на основе краткосрочных наблюдений в задачах прогнозирования изменений стока. Моделирование стока бассейна р. Сунтар за период 1966-2012 гг. позволило количественно воспроизвести выявленные на основе наблюдаемых данных тренды увеличения слоев стока в различные

сезоны года (Табл. 4, Рис. 4). Использование методов моделирования также подтвердило гипотезу о связи увеличения доли жидких осадков и стока в переходные месяцы.

Таблица 4 Наблюдаемые и рассчитанные тренды слоя стока, мм (%)

Тренд/Месяц	Май	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь
Наблюденный	6.8 (103)	9.9 (49)	3.3 (70)	0.43 (52)
Рассчитанный	11.3 (118)	10.2 (38.1)	1.3 (33.3)	0.35 (35.9)

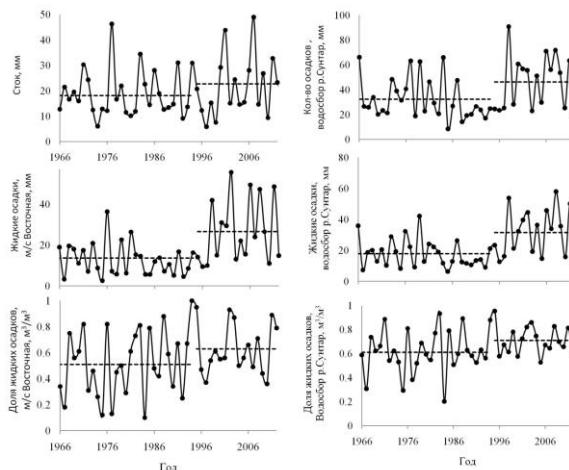


Рисунок 4 Рассчитанные изменения гидрометеорологических характеристик в бассейне р. Сунтар, 1966-2012 гг.

В *Разделе 4* представлены результаты апробации методики оценки характеристик стока и водного баланса в задачах расчета максимальных расходов воды бассейнов рек Северо-Востока России, на примере расчета характеристик катастрофического паводка на р. Магаданке (г. Магадан) в 2014 г. При использовании часовых значений pluviографов метеостанции “Магадан” в качестве входных данных по результатам моделирования максимальный расход паводка составил 35 м³/с, максимальный расход воды при использовании в расчете данных модели WRF составил 55.3 м³/с. Рассчитанные значения максимальных расходов паводка 2014 года на р. Магаданке подтверждают возможность применения разработанной методики для расчета срочных

максимальных расходов воды при совместном использовании данных плювиографов и климатических моделей.

Глава 5 представляет результаты апробации методики расчета водного баланса и характеристик стока в бассейнах горных рек различной степени изученности южной криолитозоны России.

В *Разделе 1* проведен анализ и обобщение результатов специальных наблюдений на гидрологическом полигоне «Могот» (зона БАМ) в целях разработки параметров модели «Гидрограф» в районах распространения многолетнемерзлых грунтов южной криолитозоны России.

В 1976-1985 гг. Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) на экспериментальном гидрологическом полигоне «Могот» проводился комплекс работ, направленный на изучение процессов формирования стока и других элементов водного и теплового баланса в зоне хозяйственного освоения Байкало-Амурской магистрали. Данные по испарению с почвы и снежного покрова, снегомерным съемкам, температуре почвы на различных глубинах, а также глубинам протаивания и промерзания почво-грунтов были использованы для оценки и уточнения параметров гидрологической модели «Гидрограф». Результаты сравнения рассчитанных и наблюдаемых величин признаны удовлетворительными (Рис. 5).

Непрерывное моделирование стока было проведено за период работы полигона «Могот» (1976-1985 гг.) для бассейнов р. Нелки с ее притоками и р. Цыганки. Средний критерий Нэша-Сатклиффа для основного бассейна исследовательского полигона р. Нелки составил 0.70, разница годовых рассчитанных и наблюдаемых величин годового водного баланса не превысила 10%. Результаты моделирования переменных состояний, водного баланса и гидрографов стока р. Нелки за период 1976-1985 гг. являются удовлетворительными (Табл. 5).

Представлены результаты апробации методики оценки характеристик стока и водного баланса в задачах расчетов на неисследованных горных водосборах южной криолитозоны. Были выбраны бассейны двух средних рек Тынды и Унаха с длительными историческими рядами наблюдений в замыкающем створе, имеющие площади 4060 и 1950 км² соответственно. Моделирование стока на реках Унаха и Тынды проводилось за 1966-2012 гг. Основные результаты моделирования представлены в Табл. 6 и признаны удовлетворительными.

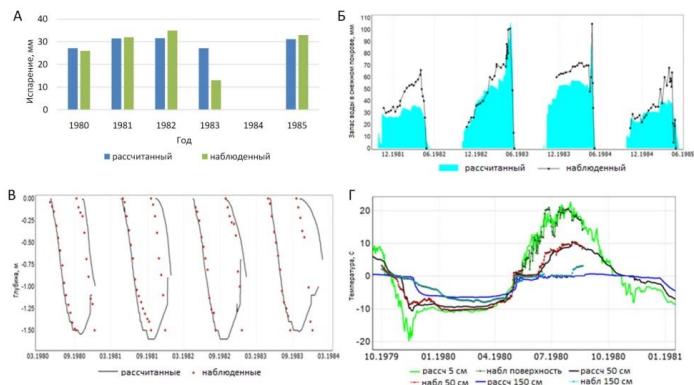


Рисунок 5 Результаты моделирования: А – рассчитанные и наблюдаемые среднегодовые значения испарения со снега (мм), 1980-1985 гг.; Б – рассчитанный и наблюдаемый запас воды в снежном покрове (мм), 1981-1985 гг.; В – глубины протаивания и промерзания почвогрунтов (м), 1980-1984 гг.; Г – рассчитанные и наблюдаемые суточные значения температуры грунта (° C) на глубинах 5, 50, 150 см, 1980 г.

Таблица 5 Основные результаты моделирования водного баланса рек гидрологического полигона «Могот»

Река-створ	S	Период	Y _o	Y _s	P	E	NS (m/av)	NS (max, год)	NS (min, год)
р. Оникс	3	1976-1985	243	342	607	259	0.65/0.64	0.79(1979)	0.31(1985)
р. Филиппер	4.5	1976-1985	255	346	634	285	0.55/0.40	0.77(1981)	-0.12(1984)
р. Захаренок	5.8	1976-1985	216	363	628	260	0.35/0.26	0.76(1978)	-0.14(1977)
р. Нелка	30.8	1976-1985	295	323	658	327	0.71/0.70	0.87(1981)	0.58(1985)
р. Цыганка	150	1976-1985	-	308	617	306	-	-	-

обозначения аналогично Табл. 1

Таблица 6 Основные результаты моделирования водного баланса водосборов рр. Унаха и Тында

Река-створ	S	Период	Y _o	Y _s	P	E	NS (m/av)	NS (max, год)	NS (min, год)
Унаха – с. Унаха	1950	1966-1994	327	342	640	300	0.46/0.40	0.69(1991)	-0.41(1974)
Тында – г. Тында	4060	1966-2012	286	293	645	354	0.52/0.31	0.73(1972)	-2.3(2005)

обозначения аналогично Табл. 1

В *Разделе 2* исследованы возможности использования распределенной гидрологической модели «Гидрограф» для оценки срочных расходов воды малой обеспеченности на примере

неизученного горного водосбора р. Хемчик – с. Хемчик (площадь 1750 км², Республика Тыва). Моделирование стока воды для расчетного створа реки Хемчик – с. Хемчик проводилось за период 1966-2012 гг. с использованием данных наблюдений на метеорологической станции «Тээли». Для перехода от суточных расходов к срочным использована зависимость наблюдаемых величин максимальных срочных и суточных расходов на изученных створах. Максимальные расходы на всем промежутке обеспеченности до 1%, полученные на основе моделирования, оказались в 1.3-5 раз выше величин, полученных в работе Макаревой и соавт. (2019) по СП 33-101-2003 (Рис. 6).

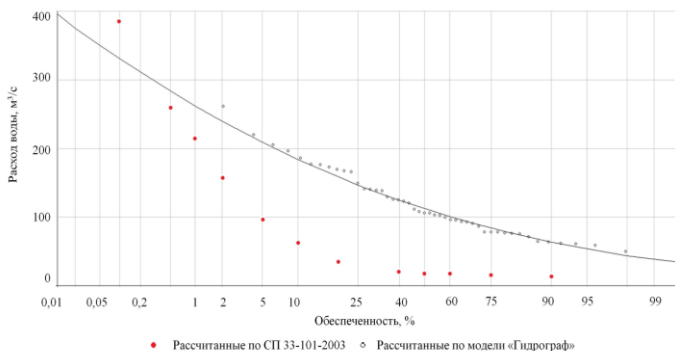


Рисунок 6 Кривые обеспеченности максимальных расходов воды паводков, рассчитанные на основе расходов модели «Гидрограф» и методами СП 33-101-2003. р. Хемчик – створ Хемчик

Выполнены параметризация модели для горных рек Восточных Саян и апробация методики в задаче расчета характеристик катастрофического паводка на примере р. Ия (Иркутская область) (Раздел 3). Проведено непрерывное моделирование процессов формирования стока трех водосборов в бассейне р. Ия с суточным шагом за период с 1970 по 1996 гг. Получены суточные гидрографы стока и распределение элементов водного баланса. Ошибка моделирования среднееголетней величины годового стока не превышает 7%. Для расчетов характеристик экстремальных паводков в июне и июле 2019 г. использовались данные наблюдений метеорологических станций Иркутского Управления Гидрометеорологической службы и данные глобальной модели

прогноза погоды ICON. При использовании данных метеорологических станций рассчитанный слой стока при формировании первого паводка за период с 25 июня по 5 июля 2019 г. составил 162 мм, максимальное суточное значение слоя стока 30 июня 2019 г. составило 39 мм. Максимальный рассчитанный суточный расход достиг значения 6570 м³/с. При формировании второго паводка, наблюдавшегося с 26 по 28 июля 2019 г., согласно расчетам в бассейне р. Ия – г. Тулун выпало 156 мм осадков. Максимальный рассчитанный расход достиг величины 3100 м³/с 31 июля 2019 г. Максимальный рассчитанный 3-часовой расход на основе данных модели погоды ICON составил 5260 м³/с. При сравнении рассчитанных гидрографов стока на основе данных модели ICON и метеостанций выявлено, что по данным метеостанций максимальный расход превысил прогноз по модели ICON на 1800 м³/с (слой стока превысил на 26 мм), что связано с разным временным распределением осадков в период развития паводка (Рис. 7).

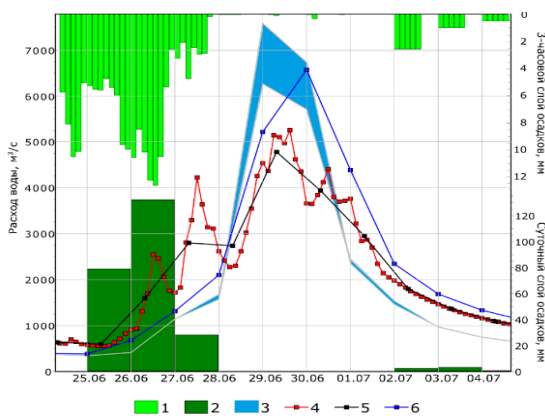


Рисунок 7 Результаты моделирования паводка на р. Ия – г. Тулун в июне 2019 г. на основе данных модели погоды ICON и сравнение с рассчитанным гидрографом на основе данных метеостанций:

1 – 3-часовые осадки по модели погоды ICON, 2 – суточные осадки на основе данных метеостанций; 3 – зафиксированный гидрограф стока (на основе экстраполяции зависимостей расхода воды от уровня); гидрограф стока по данным модели погоды ICON: 4 – рассчитанный 3-часовой, 5 – осредненный суточный; 6 – рассчитанный суточный гидрограф стока на основе данных метеостанций

В Главе **Заключение** сформулированы основные выводы исследования:

1. Проведена адаптация алгоритмов и программы ЭВМ распределенной гидрологической модели «Гидрограф» для моделирования процессов формирования стока с расчетным шагом менее суток.

2. Разработана и апробирована методика расчета характеристик стока и элементов водного баланса бассейнов горных рек Черноморского побережья Северного Кавказа России. Выполнена оценка применимости гидрологической модели «Гидрограф» для расчета срочных максимальных расходов воды на примере р. Туапсе и неизученной р. Цемес при использовании данных об интенсивности и продолжительности осадков. Анализ результатов моделирования показал, что максимальный расход воды зависит от состояния водосбора в момент выпадения осадков, а это в явном виде нельзя учесть при использовании вероятностных методов расчета.

3. Разработана и апробирована методика расчета характеристик стока и элементов водного баланса бассейнов горных рек Северо-Востока России на основе краткосрочных данных наблюдений на Высокогорной станции Сунтар-Хаята. Модельные расчеты позволили оценить среднемноголетние величины элементов водного баланса различных ландшафтов, их вклад в формирование стока воды в замыкающем створе горной реки (на примере р. Сунтар). Применение метода моделирования также позволило количественно воспроизвести выявленные на основе наблюденных данных тренды увеличения слоев стока в различные сезоны года. Проведена апробация методики расчета катастрофических паводков, рассчитанные значения максимальных расходов катастрофического паводка 2014 года на р. Магаданке подтверждают возможность применения разработанной методики для расчета срочных максимальных расходов воды при совместном использовании данных плювиографов и климатических моделей.

4. Проведена оценка и верификация параметров распределенной модели формирования стока «Гидрограф» для гидрологических расчетов в бассейнах горных рек южной криолитозоны России на основе специальных наблюдений на гидрологическом полигоне «Могот». Получены оценки срочных расходов воды малой обеспеченности на примере неизученного горного бассейна р. Хемчик – с. Хемчик. Выполнено исследование применимости методики в

задачах расчета катастрофического паводка в бассейне р. Ия в 2019 г. на основе использования данных наблюдений метеорологических станций Иркутского Управления Гидрометеорологической службы и климатической модели ICON.

Полученные результаты подтверждают, что метод детерминированного математического моделирования является одной из возможных альтернатив стандартным методам расчета. Несомненно, его реализация трудоемка и требует использования значительно большего количества информации о регионе исследования, климатических и ландшафтных условиях, процессах формирования стока, а также свободного доступа к данным наблюдений. Тем не менее, метод применим для изучения процессов формирования стока в удаленных труднодоступных горных районах России для оценки характеристик стока неизученных бассейнов рек.

В целом, результаты работы указывают на принципиальную возможность применения метода детерминированного гидрологического моделирования для расчета срочных максимальных расходов воды при использовании детальных данных об осадках (например, плувиограмм или данных климатических моделей). Новизна предлагаемого подхода заключается в учете основных процессов формирования стока и разработке методики расчета и прогноза изменений экстремальных характеристик водного режима горных территорий, в том числе и для неизученных бассейнов.

На настоящий момент ограниченность данных об осадках не позволяет использовать методы моделирования для массовых расчетов рядов срочных расходов воды, однако имеющиеся в наличии данные плувиографов могут быть использованы для анализа факторов формирования катастрофических паводков и совершенствования методов математического моделирования. Другим источником информации об атмосферных осадках могут стать данные климатических моделей, использование которых совместно с моделями формирования стока открывает новые возможности оценки и прогнозирования максимальных характеристик стока. В будущем, при переходе на более широкое оснащение метеорологических станций автоматическими приборами, возможности методов моделирования могут быть расширены.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science или Scopus:

1. **Nesterova N.**, Makarieva O., Post D. A. Parameterizing a hydrological model using a short-term observational dataset to study runoff generation processes and reproduce recent trends in streamflow at a remote mountainous permafrost basin // *Hydrological Processes*. – 2021. – Vol. 35(7). – P. e14278. DOI: 10.1002/hyp.14278.

2. Makarieva O., **Nesterova N.**, Haghighi A.T., Ostashov A., Zemlyanskova A. Challenges of Hydrological Engineering Design in Degrading Permafrost Environment of Russia // *Energies*. – 2022. – Vol. 15. – P. 2649. DOI:10.3390/en15072649.

3. Makarieva O., **Nesterova N.**, Post D. A., Sherstyukov A., Lebedeva L. Warming temperatures are impacting the hydrometeorological regime of Russian rivers in the zone of continuous permafrost // *The Cryosphere*. – 2019. – Vol. 13. – P. 1635-1659, DOI: 10.5194/tc-13-1635-2019.

4. Макарьева О.М., **Нестерова Н.В.** Фазовое состояние осадков как фактор увеличения меженного стока в криолитозоне (на примере бассейнов Яны и Индигирки) // *Метеорология и гидрология*. – 2020. – № 4. – С. 95-103.

5. **Nesterova N. V.**, Makarieva O., Post D. A. Methods of mathematical modelling for calculating flow characteristics of ungauged rivers in engineering design tasks (by the example of the Khemchik River, Tyva Republic, Russia) // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* – 2019. – Vol. 381. – P. 012068. DOI:10.1088/1755-1315/381/1/012068

6. Makarieva O. M., **Nesterova N. V.**, Ostashov A. A., Zemlyanskova A. A., Tumskoy V. E., Gagarin L. A., Ekaykin A. A., Shikhov A. N., Olenchenko V. V., Khristoforov I. I. Perspectives of the development of complex interdisciplinary hydrological and geocryological research in the North-East of Russia // *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*. – 2021. – Vol. 66(1). – P. 74-90. DOI: 10.21638/SPBU07.2021.105.

7. Makarieva O., **Nesterova N.**, Lebedeva L., Sushansky S. Water balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the

Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997 // Earth Syst. Sci. Data. – 2018. – Vol. 10. – P. 689-710. DOI: 10.5194/essd-10-689-2018.

8. 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. – №64 (1). С.24-43. DOI: 10.21638/spbu07.2019.102.

9. Semenova O.M., Lebedeva L.S., **Nesterova N.V.**, Vinogradova T.A. Evaluation of short-term changes of hydrological response in mountainous basins of the Vitim Plateau (Russia) after forest fires based on data analysis and hydrological modelling // Proc. IAHS. – 2015. – №371. – P. 157-162. DOI: 10.5194/piahs-371-157-2015.

10. Blöschl G. et al. including **Nesterova N.** Twenty-three Unsolved Problems in Hydrology (UPH) – a community perspective // Hydrological Sciences Journal. – 2019. – Vol. 64:10. – P. 1141-1158. DOI: 10.1080/02626667.2019.1620507

В российских журналах, включенных в текущий перечень ВАК:

11. Макарьева О.М., **Нестерова Н.В.**, Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока рек высокогорной криолитозоны Восточной Сибири (на примере хребта Сунтар-Хаята) // География и природные ресурсы. – 2019. – № 1. – С. 178-186.

12. **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. – 2018. – №1. – С. 18-36.

13. Макарьева О.М., **Нестерова Н.В.**, Федорова А.Д., Шихов А.Н., Виноградова Т.А. Моделирование разрушительных паводков летом 2019 года на реке Ия (Иркутская область) // География и природные ресурсы. – 2020. – № 4. – С. 66-76 DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2020-4(66-76).

14. Макарьева О.М., **Нестерова Н.В.**, Ямпольский Г.П., Кудымова Е.Ю., Осташов А.А., Колупаева А.Д. Оценка максимальных расходов воды различной обеспеченности неизученной горной реки Хемчик (Республика Тыва) на основе

методов математического моделирования // Инженерные изыскания. – 2019. – № 2. – С. 36-51.

15.Макарьева О.М., Виноградова Т.А., **Нестерова Н.В.**, Виноградов А.Ю., Бельдиман И.Н., Колупаева А.Д. Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе // Геориск. – 2018. – Т. XII. – № 3. – С. 78-89.

16.Макарьева О.М., **Нестерова Н.В.**, Бельдиман И.Н., Лебедева Л.С. Актуальные проблемы гидрологических расчетов в арктической зоне Российской Федерации и сопредельных территориях распространения многолетней мерзлоты // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2018. – №61 (1). – С. 101-118.

17.Макарьева О.М., Бельдиман И.Н., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А., **Нестерова Н.В.** К вопросу об обоснованности рекомендации СП 33-101-2003 для расчетов характеристик максимального стока малых рек в зоне распространения многолетней мерзлоты // Инженерные изыскания. – 2017. – Т. XI. – № 6-7. – С. 50-63.

Нестерова Наталия Вадимовна

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Моделирование гидрологических характеристик
бассейнов горных рек России
различной степени изученности
в современном климате

ИД от
Подписано в печать дд.мм.гг.
Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л. 1,0 Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.
Заказ №

Издательство и типография