

Санкт-Петербургский государственный университет

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
к.т.н. О.М. Макарьева

Санкт-Петербург – 2022

Оглавление

Введение _____	4
Глава 1. Проблемы гидрологических расчетов на территории России в современном климате. Использование метода математического моделирования в задачах гидрологических расчетов _____	9
1.1 Проблемы гидрологических расчетов на территории России _____	9
1.2 Метод детерминированного математического моделирования в задачах расчета характеристик стока и водного баланса _____	12
1.3 Выводы _____	23
Глава 2. Гидрологическая модель процессов формирования стока «Гидрограф» и методы ее параметризации в условиях различной степени изученности речных бассейнов на суточном и внутрисуточном интервале _____	24
2.1 Гидрологическая модель процессов формирования стока «Гидрограф» _____	24
2.2 Адаптация гидрологической модели «Гидрограф» к моделированию процессов формирования стока на внутрисуточном расчетном интервале времени _____	31
2.3 Основной блок гидрологической модели «Гидрограф» «Лито-педо-фитон» и его адаптированный для внутрисуточных расчетов алгоритм _____	35
2.4 Выводы _____	44
Глава 3. Разработка методики моделирования гидрографов стока воды с расчетным шагом менее суток и оценка характеристик максимального стока в бассейнах малых рек на основе гидрологической модели «Гидрограф» (на примере рек Черноморского побережья Северного Кавказа) _____	46
3.1 Параметризация и верификация гидрологической модели «Гидрограф» для территории Черноморского побережья _____	46
3.2 Апробация методики расчета характеристик максимального стока для малых рек Черноморского побережья _____	56
3.3 Пример использования методики оценки характеристик стока и водного баланса в задачах расчетов на неисследованных горных водосборах Черноморского побережья _____	63
3.4 Выводы _____	68
Глава 4. Разработка методики параметризации гидрологической модели «Гидрограф» в бассейнах горных рек северной криолитозоны на основе краткосрочных данных специальных наблюдений. 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) _____	70
4.1 Параметризация и верификация гидрологической модели «Гидрограф» на основе краткосрочных данных специальных наблюдений на станции Сунтар-Хаята _____	71

4.2 Апробация методики оценки характеристик стока и водного баланса на основе краткосрочных наблюдений в задачах расчетов на неисследованных горных водосборах Северо-Востока	82
4.3 Апробация методики оценки характеристик стока и водного баланса на основе краткосрочных наблюдений в задачах прогнозирования изменений стока	85
4.4 Апробация методики оценки характеристик стока и водного баланса в задачах расчета максимальных расходов воды бассейнов рек Северо-Востока России	86
4.5 Выводы	90
Глава 5. Разработка параметрического обеспечения математической модели «Гидрограф» в целях расчета характеристик стока и элементов водного баланса в бассейнах горных рек южной криолитозоны России. Апробация разработанных наборов параметров в задачах оценки максимальных расходов воды различной обеспеченности и расчета характеристик катастрофических паводков неизученных горных рек	92
5.1 Параметризация и верификация гидрологической модели «Гидрограф» для горных водосборов зоны БАМ на основе данных специальных наблюдений на гидрологическом полигоне "Могот". Результаты апробации	92
5.2 Параметризация гидрологической модели «Гидрограф» для горных рек Тувинской котловины. Апробация методики в задаче расчета характеристик стока и водного баланса неизученной горной реки южной криолитозоны на примере р. Хемчик (Республика Тыва)	106
5.3 Параметризация гидрологической модели «Гидрограф» для горных рек Восточных Саян. Апробация методики в задаче расчета характеристик катастрофического паводка на примере р. Ия (Иркутская область)	119
5.4 Выводы	131
Заключение	133
Список литературы	135
ПРИЛОЖЕНИЕ	157

Введение

Актуальность темы. Глобальное потепление оказывает 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, характеристик влажностного и температурного режима 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 режимом. Труднодоступные горные бассейны рек, а также арктические регионы России, 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 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 в связи с отсутствием данных наблюдений. В связи с этим, задача разработки современных подходов к расчетам характеристик речного 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 характеризующимися 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. Апробация 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. Апробация 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 состояния 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.

Объект 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 производилось на основе распределенной детерминированной гидрологической модели «Гидрограф». В качестве входных метеорологических данных для гидрологической модели «Гидрограф» использовались данные метеорологической сети Росгидромет. 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 2021г.); 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 (MODSIM2019) (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, посвящённый 90-летию со дня рождения профессора М. К. Гавриловой (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 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 Осташова 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.

Глава 1. Проблемы гидрологических расчетов на территории России в современном климате. Использование метода математического моделирования в задачах гидрологических расчетов

1.1 Проблемы гидрологических расчетов на территории России

Нестационарность климата. В настоящее время на территории России происходит значительное изменение климата (Оценочный доклад..., 2008). Наиболее интенсивные изменения происходят на приморских территориях и в области распространения многолетнемерзлых пород, оказывая существенное влияние на все компоненты окружающей среды, в том числе на гидрологический режим (Dyurgerov, Carter, 2004; Majhi et al., 2011; Magritsky et al., 2013; Shiklomanov et al., 2013; Георгиади, Кашутина, 2016; Georgievsky, 2016; Tananaev et al., 2019; Фролова и др., 2018; Makarieva et al., 2019b).

Во многих регионах России наблюдается увеличение доли и интенсивности ливневых осадков (Chernokulsky et al., 2019; Meredith et al., 2015). Например, в (Chernokulsky et al., 2019) приводятся данные об изменениях режима выпадения и интенсивности жидких осадков на территории Евразии: небольшой, в основном незначительный рост общего количества осадков сопровождается значимым увеличением доли ливней и сокращением вклада обложных дождей во всех регионах России, что напрямую влияет на режим формирования опасных гидрологических явлений. В работе (Meredith et al., 2015) на основе региональных моделей климата рассчитаны характеристики ливневых осадков, вызвавших катастрофическое наводнение в Крымске в 2012 г. Ее авторы сделали вывод о том, что основным фактором выпадения осадков в количестве, равном 5-месячной норме, стала температура воды поверхности Черного моря, повысившаяся за последние 30 лет на 2 °С. Более того, численные эксперименты показали, что эффект повышения температуры моря нелинеен и «осадки резко увеличиваются после определенного порога, который как раз был достигнут в начале XXI века» (Meredith et al., 2015).

Негативные последствия изменения климата отчетливо прослеживаются в отраслях экономики (Carleton, Hsiang, 2016). Особенно сильный экономический ущерб несут экстремальные климатические явления, такие как засухи (Mukherjee et al., 2018), наводнения (Willner et al., 2018; Jongman et al., 2014), циклоны (Chernokulsky et al., 2019) и лесные пожары (Flannigan et al., 2006). Все они свидетельствуют о значительной уязвимости и подверженности природных и антропогенных систем современной изменчивости климата.

В последние годы количество и величина паводков на территории России возросли, наиболее значительными среди них оказались события 2002, 2010, 2012-2015, 2019 гг. (Воробьев и др., 2003; Панов и др., 2012; Колтерманн и др., 2012). Большинство наводнений, приведших к

значительному ущербу и потерям человеческих жизней, были вызваны экстремальными осадками, сумма и интенсивность которых не наблюдались ранее. Часто чрезвычайные ситуации вызваны тем, что водопропускные и гидротехнические сооружения не справляются с пропуском паводков редкой обеспеченности. Они могут быть связаны не только с неправильной эксплуатацией, но и с ошибками на этапе инженерно-гидрологических изысканий, проектирования и строительства, в том числе необоснованностью используемых методов расчета гидрологических характеристик при отсутствии данных наблюдений за стоком в современных условиях климата (Виноградов и др., 2020). Наиболее важный аспект влияния климата на гидрологический режим – это проблема сохранности гидротехнических сооружений в связи с ростом максимальных расходов и объемов экстремальных половодий и паводков, для которых будет недостаточна пропускная способность действующих и запроектированных сооружений (Malik et al., 2000; Виноградов и др., 2020).

Сокращение стандартной сети наблюдений. Прогноз и оценка изменений гидрологического режима осложняется значительным сокращением сети наблюдений. За последние 30 лет плотность сети сократилась более чем в полтора раза (Макарьева и др., 2018б). Для ряда наблюдений на малых реках, площадь водосбора которых менее 200 км², ситуация еще острее – количество пунктов наблюдений за стоком для некоторых районов сократилось в три раза.

Наиболее серьезные сокращения сети претерпевают горные, в том числе труднодоступные территории, для которых данные стандартной сети являются единственным источником информации о гидрологическом режиме. Одновременно именно высокогорные ландшафты играют определяющую роль при формировании стока многих крупных речных бассейнов (Антипов и др., 2007).

В качестве примера сокращения сети наблюдений приведем данные по нескольким регионам исследования (Табл. 1). На Черноморском побережье Кавказа от Новороссийска до Сочи в 1985 году действовали 18 гидрологических постов, на которых измерялись расходы воды, а в 2015 году их осталось только 11. При этом ряды наблюдений за стоком в последние годы часто отрывочны. Так, для р. Туапсе отсутствуют данные за 1992-1993, 1997-2008, 2011-2012 гг. Одновременно отмечается значительное увеличение максимальных расходов воды, достигающее 1.5-2.0 раз, на всех реках региона по сравнению с периодом до 1971 года (Колтерманн и др., 2012).

В Республике Саха (Якутия), площадь которой составляет более 3 млн. км², насчитывается 33 расходных поста на малых реках, из них 20 постов с площадью водосбора до 200 км² и 13 – до 2000 км². Основная часть постов расположена на юго-востоке Якутии, на севере и северо-востоке территории сеть наблюдений за стоком практически отсутствует.

На протяжении федеральной трассы «Колыма» (длина 2032 км), соединяющей города Якутск и Магадан, в 2008 году количество действующих гидрологических постов составляло 11 (6 постов имели замыкающие площади менее 200 км²) из которых большая часть (5 постов) сконцентрирована в районе города Магадан. На Чукотке (737 тыс. км²) в 2008 году действовали только три поста на которых велись наблюдения за стоком: два на реках с площадью водосбора более 10000 км², один – менее 2000 км², посты на очень малых реках отсутствуют.

Для сравнения: в Норвегии, площадь которой сопоставима с площадью Магаданской области, действует около 650 гидрологических постов, наблюдения на большинстве из которых автоматизированы, из них по 300 постам данные наблюдений доступны пользователям сети Интернет в режиме реального времени (Norwegian Water Resources and Energy Directorate, 2018).

Таблица 1 Количество гидрологических постов с наличием данных наблюдений за расходами воды в районах исследования в 1980 и 2008 гг.

S водосбора / УГМС	<200		200-2000		2000-10000		>10000		Любой площади	
	1980	2008	1980	2008	1980	2008	1980	2008	1980	2008
Иркутское	17	6	44	31	45	32	28	27	134	96
Колымское, Чукотское	34	7	16	6	18	3	16	4	84	20
Якутское	43	20	30	13	27	17	65	59	165	109
Северо-Кавказское (Кубанский бассейновый округ)	9	4	9	7	0	0	0	0	18	11

Современные методы расчета инженерных характеристик стока. В настоящее время рекомендованным к использованию является расчетный Свод Правил СП 33–101–2003 (далее СП) (СП 33-101-2003, 2004), основанный на применении методов статистической обработки многолетних рядов наблюдений за стоком и регламентирующий порядок гидрологических расчетов.

СП является актуализированной редакцией документа СНиП 2.01.14-83 (СНиП 2.01.14-83, 1983), выпущенного в 1983 году, и принципиально ничем не отличается от своего предшественника в вопросах методик расчета характеристик стока. Предыдущая редакция издания базировалась на предположении о том, что гидрологические процессы являются статистически стационарными, а, следовательно, ретроспективные наблюдения могут считаться репрезентативными для представления режима стока на период эксплуатации проектируемого объекта. Авторы СП признают климатические изменения и рекомендуют использование современной гидрометеорологической информации при проведении расчетов, а также уточнения параметров расчетных формул, основанного на обобщении современных данных по стоку. В последнее десятилетие был также выпущен ряд Методических рекомендаций (2007, 2008, 2009, 2010), которые дополняют СП 33-101-2003, в том числе в части оценок расчетных значений по

неоднородным рядам наблюдений. Однако, такие рекомендации не предлагают путей учета влияния климата на режимные характеристики основных видов стока (Шевнина, 2015).

Автором исследования в соавторстве на основе рекомендаций СП 33-101-2003 проведен расчет характеристик максимального стока для рек в зоне распространения многолетней мерзлоты (Макарьева и др., 2017). В качестве «неизученных» выбраны четыре очень малых (площадью до 200 км²) и две малых (до 2000 км²) реки в зоне распространения многолетней мерзлоты с различным гидрологическим режимом, имеющие длинные ряды наблюдений за стоком (Макарьева и др., 2017). Рассчитанные характеристики максимального стока половодья и паводков сравнивались с величинами расходов воды, определенных по кривым обеспеченности, построенным на основе наблюдаемых данных. Оказалось, что в районах исследования выбор рек-аналогов, обеспеченных данными наблюдений за последние 20-25 лет, ограничен 2-3 вариантами водотоков, не имеющими альтернативы для территорий площадью до нескольких сотен тысяч квадратных километров. С этим связана практическая невозможность выполнения требований СП 33-101-2003 по уточнению параметров расчетных формул на основании современных фактических материалов наблюдений. В работе (Макарьева и др., 2017) показано, что рассчитанные величины расходов половодья и паводков различной обеспеченности могут отличаться в разы при использовании нескольких рек-аналогов, одновременно соответствующих требованиям СП 33-101-2003. Ввиду отсутствия каких-либо ближайших перспектив расширения существующей гидрометеорологической сети наблюдений дальнейшее развитие методов СП 33-101-2003 практически сложно осуществимо.

1.2 Метод детерминированного математического моделирования в задачах расчета характеристик стока и водного баланса

Неопределенность применения методов стандартных гидрологических расчетов ставит задачу разработки дополнительных подходов для получения характеристик стока. Основой таких подходов может стать комплексное использование методов детерминированного математического распределенного моделирования гидрологических процессов.

Метод математического моделирования позволяет изучать в единой системе условия, влияющие на формирование стока, а также производить оценки текущего состояния и прогноза изменений характеристик водообмена в условиях меняющегося климата и антропогенного освоения территории (Макарьева и др., 2018б; Мотовилов, 2017; Мотовилов и др., 2017; Schramm et al., 2007; Pomeroy et al., 2007; Fang et al., 2013; Marsh et al., 2020; Fang and Pomeroy, 2020).

Обзор существующих детерминированных моделей формирования стока. Традиционно в гидрологии различают два различных подхода к описанию процессов формирования стока: сосредоточенное моделирование и распределенное. Сосредоточенное моделирование основано

на использовании традиционных методов расчета, базирующихся на восприятии водосбора как однородного единого целого. Это упрощенный подход, который не позволяет учитывать пространственную неоднородность стокоформирующих факторов (Виноградов, Виноградова, 2010). Распределенные модели, наоборот, имеют возможность учитывать все многообразие природных процессов по всему водосбору.

Согласно классификации, предложенной Л. С. Кучментом, Е. Н. Борщевским (1971), математические модели речного стока делятся на 3 группы: модели «черного ящика», концептуальные модели и физико-математические модели.

Наиболее простыми моделями, развитие которых началось в 20-40 годах XX века, являлись модели «черного ящика». Данный термин был введен У.Р. Эшби и использовался в кибернетике и физике (<http://lib.sale>). В гидрологии структура и параметры таких моделей определяются по измерениям на входе и выходе гидрологической системы без привлечения априорной информации о происходящих в ней процессах. В этом случае гидрологическая система рассматривается как динамическая с сосредоточенными параметрами, которая преобразует входные осадки в гидрограф стока. Такое допущение включает предположение, что изменчивость других естественных входных параметров невелика или ничтожна (Руководство по гидрологической практике ВМО, 2009). Наиболее распространенными примерами такой модели являются концепция единичного гидрографа и методы расчета трансформации стока. Их применение не дает достоверных результатов при решении ситуаций, когда необходимо оценить воздействия различных систем на формирование стока.

В дальнейшем получил развитие подход моделирования, в основу которого положены различные концепции описания физических процессов формирования стока (Кучмент, Борщевский, 1971). Одним из наиболее трудных аспектов применения концептуальных моделей является калибровка выбранной модели применительно к конкретному водосбору. Большинство параметров определяются итерационным способом, вручную или автоматически. Точность расчетов по таким моделям зависит от объема фактических данных, привлекаемых для калибровки, а область применимости моделей ограничивается, в основном, диапазоном условий, наблюдавшихся за период калибровки. Концептуальные модели широко применяются для решения интерполяционных задач для краткосрочных прогнозов речного стока (Klemes, 1986). Наиболее ярким представителем является модель Сакраменто (Центр речных прогнозов Национальной службы погоды США). Эта модель включает сложный алгоритм расчета влажности почвы, предназначенный для получения значений объемов нескольких компонентов речного стока, в то время как достаточно простой и почти полностью эмпирический подход используется для преобразований этих входных данных в гидрограф стока (Руководство по гидрологической практике ВМО, 2009). Другим примером служит шведская модель HBV,

которая преобразует осадки, температуру воздуха и потенциальное суммарное испарение либо в снеготаяние, либо в сток или приток в водохранилище (Bergström, 1992).

Необходимость решения проблем калибровки привела к появлению понятия «физически обоснованных» моделей (Виноградов, Виноградова, 2010) или физико-математических моделей, опирающихся, главным образом, на априорную информацию: современные гидрологические представления о формировании стока, достижения смежных наук, математической физики. Значения большинства параметров физико-математических моделей могут быть либо заданы из физических соображений, либо найдены с помощью эмпирически установленных соотношений по измеряемым характеристикам рельефа, почв, растительности и другим свойствам речного водосбора (Кучмент, Борщевский, 1971). Рассматриваемые модели широко используются для решения экстраполяционных задач, связанных с моделированием ситуаций в ненаблюдавшихся или измененных условиях, такие, как оценка характеристик и повторяемости возможных экстремальных паводков, влияния на речной сток антропогенных изменений водосбора и изменений климата (Кучмент, Борщевский, 1971).

Первые идеи и системные подходы, посвященные учету всех физических процессов на водосборе, были выдвинуты А.Г. Глушковым в 1931-1932 гг. (Глушков, 1933, 1961). Водные объекты здесь представляются как неотъемлемые элементы географического ландшафта, свойства которых неразрывно связаны с окружающей средой. Географо-гидрологическая концепция предполагает обязательное изучение генезиса гидрологических явлений, взаимосвязей между различными объектами гидросферы, а также между гидросферой и другими компонентами природного комплекса. Развитие таких системных подходов (ландшафтно- или геосистемногидрологических) продолжалось многими известными гидрологами, например в трудах И.Н. Гарцмана (1977), Н.И. Коронкевича (1986) и др.

Первые детальные физически обоснованные модели были созданы для решения задач снеготаяния и снегонакопления (Motovilov, 1986; Harlan, 1972), а также изучения процессов промерзания и оттаивания почвы (Гельфан, 1989; Жмаева, Кучмент, 1979). Среди наиболее известных физико-математических моделей формирования стока можно выделить модель с распределенными параметрами Европейской Гидрологической Системы (SHE) (Abbott et al., 1986) и ее датская версия MIKE-SHE (Refsgaard, Storm, 1995), модель SWAT (Arnold et al., 1998), VIC (Liang et al., 1994), TopoFlow (Schramm et al., 2007), GEOTop (Dall'Amico et al. 2011). Для моделирования гидрологического цикла в бассейнах рек холодных регионов широко известна канадская гидрологическая модель (Cold Region Hydrological Model, CRHM) (Pomeroy et al., 2007). Параметры данной модели не калибруются в ходе моделирования, процессы на поверхности водосбора описываются физически-обоснованными методами, а подповерхностные процессы – с помощью эмпирических и полуэмпирических подходов (Fang et al., 2013). Данная

модель использует большое количество натуральных данных для назначения параметров, наблюдаемых на специальных исследовательских водосборах.

В нашей стране разработкой физически-обоснованных моделей занимается несколько научных групп. Среди них группы модели ECOMAG, SWAP (SoilWater – Atmosphere – Plants), реализуемых в Институте водных проблем РАН, модель Гидрограф, разработанная в Государственном гидрологическом институте.

Гидрологическая модель ECOMAG была использована для моделирования речного стока более 15 речных бассейнов в России, расположенных в различных природных зонах и имеющих разную площадь водосбора. Среди них Енисей, Лена, Амур, Обь, Кубань, Северная Двина, Мезень, Печора, Яна, Индигирка, Колыма, Москва, Ока, а также бассейны Ангаро-Енисейского, Волжско-Камского каскада, Зейского и Бурейского водохранилищ. Модель учитывает основные процессы гидрологического цикла, переноса и трансформации загрязняющих веществ в речном бассейне применительно к реальным метеорологическим, гидрологическим и физико-географическим условиям конкретного региона (Мотовилов, 2016). Для описания основных процессов на площади бассейна в модели используется система уравнений, полученная на основе интегрирования при различных допущениях уравнений гидротермодинамики, а также эмпирические зависимости (например, для расчета водной эрозии почв). Расчет течений и процессов переноса загрязнений в речных руслах производится с использованием одномерных идеализаций (уравнения Сен-Венана или уравнения кинематической волны). Процессы распространения и трансформации загрязнений в речных водах описаны на основе адвективно-диффузионных уравнений (Мотовилов, Гельфан, 2018).

Модель SWAP применяется для описания процессов формирования стока воды на крупных водосборах (Гусев и др., 1998). SWAP представляет собой физико-математическую модель, описывающую процессы тепло- и влагообмена в системе почва – растительный/снежный покров – приземный слой атмосферы (Soil–Vegetation/snow cover–Atmosphere system – SVAS). Модель воспроизводит комплекс процессов: перехват жидких и твердых атмосферных осадков растительным покровом, их испарение, таяние или замерзание; формирование снежного покрова в холодный период года; формирование поверхностного стока и впитывание воды в почву; формирование водного баланса зоны аэрации (включающего в себя транспирацию, физическое испарение воды почвой, влагообмен с грунтовыми водами и изменение почвенных влагозапасов); динамику уровня грунтовых вод; формирование теплового баланса системы SVAS и ее термического режима; промерзание и оттаивание почвы (Гусев, Насонова, 2004).

Широкое распространение гидрологические модели получили при решении задач описания процессов формирования стока на гидрологически неизученных бассейнах (Мотовилов, Гельфан, 2018) в результате разработки концепций гидрологического подоби

классификации водосборов (McDonnell, Woods, 2004), методов обобщения параметров моделей (Parajka et al., 2005) и их переноса на неисследованные бассейны (McDonnell et al., 2007; Zhang, Chiew, 2009).

Использование данных специальных наблюдений. Значительную ценность в разработке методов моделирования и параметризации моделей имеют данные, полученные на репрезентативных стационарах и малых исследовательских водосборах. Даже краткосрочные данные могут стать основным источником информации о процессах, происходящих в малоисследованных, удаленных районах, в том числе и горных (Граве и др., 1964; Гусев и др., 2006; Виноградов и Виноградова, 2010; Semenova et al., 2013; Пряхина и др., 2014; Гарцман, Шамов, 2015; Лебедева и др., 2015, 2017; Болгов и др., 2018; Макарьева и др., 2019а; Макарьева и др., 2020).

Метод репрезентативных стационаров и экспериментальных водосборов является общепризнанным традиционным, хорошо разработанным и успешно применяемым подходом полевой и экспериментальной гидрологии как в отечественной практике, так и за рубежом (Долгов, Коронкевич, 2010; McNamara et al., 1998; Magner, Scott, 2002). В рамках этого метода производятся детальные наблюдения за элементами водного баланса, гидрологическими характеристиками и факторами климата, ландшафтов, антропогенной деятельности, их определяющими. Наблюдения на малых водосборах позволяют выявить и рассчитать вклад отдельных факторов в формирование речного стока воды, наносов и растворенных веществ, и водного баланса территории (Cherkauer, Lettenmaier, 1999; Kane et al., 2000).

Первая в мире система научных стационаров в различных климатических условиях была организована в СССР. В 1925 году М.А. Великанов впервые предложил организовать специальные гидрологические стационары в различных физико-географических условиях, а в 1933 году Д.Л. Соколовским был составлен план размещения 45 полевых лабораторий по территории СССР. С 1928 по 1940 год уже существовало 11 таких станций, однако, во время Великой Отечественной войны большинство из них были полностью закрыто.

В 1954 году вышла книга с первым обобщением опыта комплекса основных наблюдений гидрологических стационаров, именуемых стоковыми станциями (Руководство стоковым станциям, 1954). Стоковые станции производили комплексные наблюдения над всеми элементами водного баланса и факторами, обуславливающими их изменения. Объектами изучения являлись характерные для региона малые водосборы и стоковые площадки.

В 1973 году Государственный гидрологический институт под научным руководством А.И. Чеботарева выпустил «Руководство водно-балансовым станциям» (Руководство водно-балансовым станциям, 1973). К 1981 году на территории СССР действовало 16 водно-балансовых

станций (ВБС) на естественных водосборах (не подверженных мелиорации) и 9 болотных водно-балансовых станций.

Дополнительно к сетевым стационарам в Советском Союзе организовывались специальные стационары и экспедиции, целью которых была разработка методов гидрологического обоснования крупных проектов хозяйственного развития. С середины 1960-х гг. по 1993 г. Западно-Сибирская экспедиция ГГИ проводила масштабные режимные исследования с целью изучения гидрометеорологического режима заболоченных территорий Западной Сибири (Гидрология заболоченных..., 2009).

Многие из полученных в советское время данных специальных наблюдений использовались для тестирования отечественных гидрологических моделей (Кучмент и др., 2000; Гусев и др., 2006; Гусев и Насонова, 2004; Гусев и др., 2011; Виноградов и др., 2015; Лебедева и др., 2015, 2017; Мотовилов, 2016; Semenova и др., 2013; Гарцман, Шамов, 2015).

В целом, в настоящее время исследования на малых водосборах проводятся во всех развитых странах мира, часто параллельно с наблюдениями развиваются несколько математических моделей (Befani, 1961; McNamara et al., 1998; Cherkauer and Lettenmaier, 1999; Kane et al., 2000; Magner, Scott, 2002; Janowicz et al., 2004; Pomeroy и др., 2007; Schramm и др. 2007; Fang et al., 2013; Krogh et al., 2017; Fraser et al., 2019). Целями разработки моделей является как решение фундаментальных задач изучения природных процессов, в том числе, в условиях изменений климата, так и решение конкретных прикладных вопросов, связанных с обеспечением промышленных объектов и населения.

Например, Bring et al. (2016) дали долгосрочную оценку увеличения стока в бассейнах рек Яна и Индигирка на 50% в течение 21-го века при использовании данных глобальных климатических моделей. Проведенные численные эксперименты на основе информационно-моделирующего комплекса ECOMAG позволили получить результаты по оценке чувствительности характеристик стока реки Селенги к изменениям климатических параметров, расчету возможных изменений стока при прогнозируемых изменениях регионального климата (Chalov et al., 2018). Модель SWAP применялась для описания процессов тепловлагообмена и его изменения на крупных водосборах российского Севера – Северной Двине, Надыме, Индигирке, Колыме (Гусев и др., 2008, 2011; Гусев, Насонова, 2004). Tornros and Menzel (2010) при применении модели HBV-D на основе расчетов за исторический период (1990 - 2002) пришли к выводу, что уменьшение стока в бассейне реки Хараа (Монголия) произошло из-за изменений в региональном климате, а не из-за увеличения водопотребления. В работах Essaid and Hill (2014), Li et al. (2012), напротив, моделирование помогло выявить влияние землепользования на гидрологический режим рек. Модели также используются для прогнозирования будущего состояния гидрологических систем в связи с изменением климата (Kour et al., 2016; Rigon et al.,

2006; van Roosmalen et al., 2009). Это дает возможность использовать модели в социально-экономическом развитии стран и в государственном управлении (Refsgaard, 2007).

Математическое моделирование в задаче расчета характеристик стока на внутрисуточном интервале. Параметры основных элементов расчетного гидрографа стока в практике принято определять согласно СП 33–101–2003 (СП 33-101-2003, 2004), в том числе это касается расчета внутрисуточных величин. Внутрисуточный гидрограф стока воды рек весеннего половодья и дождевых паводков определяется в зависимости от относительных ординат гидрографа внутрисуточного хода стока при различных коэффициентах перехода от максимального мгновенного расхода воды к среднесуточному, установленному по рекам-аналогам. В связи с перечисленными в первом разделе данной главы проблемами, использование данного метода в современных условиях для многих регионов становится затруднительным.

В зарубежной практике гидрологические модели с возможностью внутрисуточного моделирования применяются как для изучения процессов, происходящих на малых исследовательских водосборах, так и для практических расчетов долгосрочных тенденций характеристик стока и качества воды в водосборных бассейнах различных площадей.

Модель SWAT (Soil and Water Assessment Tool) позволяет производить моделирование стока на суточном, часовом и внутрисуточном интервалах (Boithias et al., 2017; Arnold et al., 1998; Jeong et al., 2010). В работе Jeong et al. (2010) алгоритмы модели SWAT были изменены для моделирования процессов инфильтрации, поверхностного стока, русловой трансформации стока, чтобы позволить производить расчеты с внутрисуточным интервалом времени, равным одной минуте. В этом случае эвапотранспирация и содержание влаги в почве оцениваются на суточном интервале и распределяются равномерно для каждого временного шага. Измененные алгоритмы были протестированы на водосборе площадью 1.9 км² возле Лост-Крик в Остине, штат Техас, США. Результаты показывают, что внутрисуточная модель SWAT удовлетворительно воспроизводит гидрограф стока при множественных штормовых явлениях. Результаты моделирования расхода воды за период 1 год с 15-минутным интервалом показывают более высокую эффективность ($R^2 = 0.93$) по сравнению с суточным моделированием за тот же период ($R^2 = 0.72$), что связывается авторами модели с возможностью более правдоподобно воспроизводить максимальные паводки.

Другой широко применяемой моделью, позволяющей производить расчеты на часовом интервале, является модель HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning), разработанная Шведским метеорологическим и гидрологическим институтом (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) и усовершенствованная в Институте гидрологии и управления водными ресурсами Германии (Institute of Hydrology and Water Resource Management in Hannover, Germany). HBV представляет собой концептуальную модель с сосредоточенными и

полураспределенными параметрами. В качестве входных данных в модели используются осадки, температура и испаряемость, а параметры модели оптимизированы на часовом и суточном временном шаге. Калибровка модели производится отдельно для параметров, оптимизированных на часовом, и отдельно на суточном, расчетных интервалах (Beylich et al., 2021).

Модель GR4H (Moine, 2008) с часовым расчетным шагом использует в качестве входной информации данные часовых осадков и испаряемость. Вклад осадков при моделировании после перехвата делится на прямой сток и инфильтрацию в почвенный «резервуар» с заданной емкостью. Почвенный сток смешивается с «прямым» (или поверхностным), образуя «общий» сток. Модель была оптимизирована и верифицирована на водосборах реки Вильканота (Перу) (Llausa et al., 2021).

Модель HSPF (Hydrological Simulation Program – Fortran, Bicknell et al. 1995) направлена на расчеты отдельных паводков на временном интервале от 1 минуты до 1 дня. Модель использует емкостную концепцию водосбора («storage-based») (Borah and Bera 2003).

При использовании модели HEC-HMS (Система гидрологического моделирования Гидрологического инженерного центра США) проведено сравнение различных стратегий калибровки гидрологической модели с учетом различных типов входных данных (Haberlandt, Radtke, 2014). В качестве входных данных использовались часовые наблюдаемые, а также часовые стохастически генерируемые данные об осадках.

В последние годы набирает популярность использование методов машинного обучения и нейронных сетей для моделирования стока, в том числе на внутрисуточном интервале. Примерами могут являться модели Neural Runoff Model (NRM) (Xiang, Demir, 2020), Recurrent Neural Network (RNN) (Ishida et al., 2021) и др., которые используют в качестве входной информации часовые метеорологические данные. Тем не менее, использование таких моделей для изучения конкретных процессов формирования стока представляется затруднительным.

В России применение методов моделирования на внутрисуточном интервале в основном направлено на решение практических задач. Разработанная физико-математическая модель формирования стока весеннего половодья (Кучмент и др., 1986; Мотовилов 1993) использовалась для оценки влияния антропогенных изменений речных водосборов на талый сток (Motovilov, 1987), а также для оценки опасности катастрофических наводнений (Кучмент и др., 1994). На примере водосбора р. Сосны (Центральная часть ЕТР) были произведены расчеты талого стока в период 1967–1976 гг. Для задания начальных условий использовались данные снегомерных наблюдений и профили температуры и влажности почвы в пунктах наблюдений перед началом снеготаяния. Граничные условия задавались по метеорологическим данным на метеостанциях с учетом внутрисуточного хода в сроки наблюдений. Шаг интегрирования по времени для различных процессов составил от 1 до 6 часов. Результаты показали удовлетворительное

соответствие рассчитанных и фактических слоев талого стока, хотя для некоторых лет (например, половодья 1968 г.) погрешности расчетов были весьма велики (Мотовилов, 2019).

Для оценки роли паводка 2012 года в Крымске И.В. Шевердяевым (2018) была проведена его реконструкция на внутрисуточном интервале при различных антропогенных условиях (для формирования паводка и роли Неберджаевского водохранилища, для прохождения паводка в окрестностях Крымска и роли пойменного мусора и мостов в городе). Для этого были использованы гидрологические модели HEC-HMS и HEC-RAS (www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/). В качестве входных данных для реконструкции паводка использовался часовой ход осадков на метеостанциях Крымск и Новороссийск для выделенных водосборов. Рассчитанная динамика расходов воды в створах верховьев реки Адагум использовалась в качестве входных данных для модели прохождения паводка в окрестностях Крымска (HEC-RAS). В результате расчётов были получена динамика расходов в замыкающих створах выделенных участков водосбора, а также динамика зоны затопления в Крымске и окрестностях. Результаты исследования показали, что равномерное распределение осадков, использованное при модельной реконструкции, не позволяет отразить фактическое распределение источников паводка в различных частях водосбора, однако для всего бассейна максимальный расход и его динамика удовлетворительно согласуется с результатами наблюдений.

Другим примером использования модели HEC-HMS является работа М.В. Болгова и др. (2018), результатами которой стало моделирование паводочного стока при выпадении сильных дождей на водосборах Колымской и Бомнакской стоковых станциях с интервалом дискретности 1 час. Было установлено, что при моделировании на внутрисуточном временном шаге для зоны мерзлоты необходимо учитывать регулируемую роль мохового покрова. Для учета дополнительной регулирующей функции склона рекомендован метод единичного гидрографа Кларка (Straub et al., 2000).

В работе А.Н. Ситнова и С.О. Агеева (2021) разработана математическая модель и алгоритм решения задачи внутрисуточного регулирования, описывающий последовательность действий для решения задачи «сглаживания» подаваемых расходов в нижний бьеф Нижегородского низконапорного гидроузла. Реализация предложенных мероприятий осуществляется по трехступенчатому (или двухступенчатому) графику регулирования расхода и уровня воды.

Тем не менее, в России существует не так много моделей, позволяющих производить расчеты характеристик стока на внутрисуточном интервале. Чаще всего, такие работы связаны с задачами получения величины максимального расхода воды и оценки затопляемости территории.

Детерминированное математическое моделирование в задаче расчета максимальных характеристик речного стока. В условиях изменения климата для территории России прогнозируется увеличение количества экстремальных осадков, сумма и интенсивность которых не наблюдалась ранее (Chernokulsky et al., 2019; Иваньо, 2009). В результате ожидается рост числа и величины наводнений. Для получения глобальных и региональных оценок изменения среднегодового стока, его внутригодового распределения и расчета опасных гидрологических явлений редкой повторяемости используются сценарии изменения климата (Георгиевский, Шалыгин, 2012; Алексеевский и др., 2011; Добровольский, 2011; Шикломанов, Георгиевский, 2007; Мохов и др., 2003). Многочисленные исследования возможностей использования методов гидрологического моделирования для расчета вероятностных характеристик стока проводятся в зарубежных странах, например (Вросса и др., 2011; Rogger и др., 2012; Viviroli и др., 2009). Признается необходимость разработки новых методов расчета в условиях изменений климата и антропогенного воздействия (Maghsood и др., 2019), работа научных групп координируется на уровне государственных и межгосударственных структур (Madsen и др., 2013). В работе М.В. Болгова и Е. В. Арефьевой (2021) для статистической обработки и оценки нестационарной последовательности гидрологических характеристик предлагается подход на основе теоремы Байеса. Подход основан на предположении о том, что в определенные моменты происходит смена состояния случайного процесса, а наблюдаемая выборка представляет собой набор однородных временных последовательностей, характеризуемый случайной сменой состояний. Байесовский метод также был использован для уточнения расчетного предельного значения притока реки Зеи при моделировании максимально возможных значений притока к Зейскому водохранилищу на основе определения максимально возможных осадков (Болгов и др., 2020).

Существуют методические разработки по расчету и моделированию процессов формирования паводков. В работе (Борщ и др., 2015) представлен развернутый обзор методов прогноза, применяемых за рубежом, и отмечается практическая невозможность их использования в нашей стране из-за отсутствия прогноза сплошных полей осадков, необходимых для качественного прогноза стока.

В ряде зарубежных стран используют метод вероятного максимального паводка (probable maximum flood, PMF) (Асарин и Жиркевич, 2012). Суть метода заключается в том, чтобы учесть сочетание самых неблагоприятных метеорологических и стокоформирующих факторов, которые могут привести к формированию максимально-возможного расхода воды. Хотя в действующих нормативных документах существует рекомендация в качестве расхода поверочного расчетного случая принимать расход, определенный по методике вероятного максимального паводка, в России не разработаны ни методические указания по определению параметров PMF, ни нормативы его применения (Асарин и Жиркевич, 2012).

В настоящее время в России выпущен сборник трудов Гидрометцентра, излагающий основные принципы построения и правила использования автоматизированной системы краткосрочного прогнозирования стока рек бассейна Кубани и Черноморского побережья Кавказа (Борщ, 2015). Прогноз метеорологических характеристик осуществляется при использовании различных моделей, таких как UKMO, NCEP, REGION и COSMO-Ru7. Гидрологические процессы на водосборах описываются концептуальными моделями с сосредоточенными или частично распределенными параметрами.

Среднесибирским УГМС разработан и используется программный комплекс на базе концептуальной модели формирования стока, позволяющий рассчитывать и прогнозировать приток в Саяно-Шушенское и Красноярское водохранилища (Бураков и др., 2006).

Коллективом под руководством Б.И. Гарцмана была внедрена система краткосрочных прогнозов уровней воды на Дальнем Востоке для бассейна р. Уссури (Гарцман, 2008). Используемая модель Flood cycle model (FCM) описывает формирование дождевых паводков малых водосборов в теплое время. Входными данными служат суточные ряды осадков и расходов воды. В качестве индикатора состояния основных составляющих бассейнового влагозапаса является расход в замыкающем створе.

В последнее время для расчетов максимальных характеристик стока используют данные глобальных моделей прогноза погоды. Гидрологическая модель запускается на базе прогностической информации, полученной по метеорологической модели. Такой подход получил название «комплексное гидрометеорологическое моделирование (coupled modelling)» и широко применяется для прогноза стока горных рек, в частности в Альпах (Addor et al., 2011; Verbunt et al., 2006; Nester et al., 2016). Ряд работ посвящен расчету притока воды в водохранилища на основе комплексного гидрометеорологического моделирования как на территории России (Антохина, 2012), так и за рубежом (Georgakakos et al., 2014). В 2017 г. в России создана первая автоматизированная система прогноза притока воды к Бурейскому водохранилищу на основе данного подхода при использовании модели ECOMAG (Мотовилов и др., 2017). Пример интеграции моделей климата и гидрологических моделей для прогноза паводков в бассейне р. Амур представлен в работе (Фролов и др., 2016).

В России специалисты-проектировщики отмечают, что гидрологические модели могут быть использованы в качестве альтернативы вероятностным методам расчета максимальных характеристик стока (Жиркевич, Асарин, 2010), и хотя методы математического моделирования используются для проектирования и регулирования работы крупных водохранилищ (Мотовилов и др., 2017, Борщ и др., 2017), однако систематических разработок в направлении внедрения методов моделирования в практику инженерных расчетов и изысканий не ведется.

1.3 Выводы

В Главе 1 проведен анализ основных проблем гидрологических расчетов на территории России и представлен обзор использования методов гидрологического моделирования в задачах расчета характеристик стока, в том числе экстремальных, и водного баланса.

Изменение 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 (СП 33-101-2003) для оценки характеристик стока в удаленных горных регионах страны становится не всегда обоснованным.

Низкая плотность стандартной сети наблюдений и практическое отсутствие данных о процессах формирования стока в горных районах 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 научного сообщества.

Глава 2. Гидрологическая модель процессов формирования стока «Гидрограф» и методы ее параметризации в условиях различной степени изученности речных бассейнов на суточном и внутрисуточном интервале

2.1 Гидрологическая модель процессов формирования стока «Гидрограф»

В исследовании для моделирования процессов формирования стока применялась модифицированная распределенная гидрологическая модель «Гидрограф», разработанная профессором Юрием Борисовичем Виноградовым (Виноградов, 1988; Виноградов, Виноградова, 2010).

Модель «Гидрограф» представляет собой математическую систему с распределенными параметрами, описывающую процессы формирования стока в бассейнах с различными физико-географическими характеристиками. Алгоритмы модели сочетают физически-обоснованные и концептуальные подходы в описании процессов наземного гидрологического цикла, что позволяет сохранить баланс между сложностью расчетных схем и ориентацией на ограниченную входную информацию для моделирования. Выпадение и задержание осадков, накопление, уплотнение и стаивание снежного покрова, динамика влаги и тепла в снеге и в верхних горизонтах грунта, включая промерзание и протаивание, описываются в модели в явном виде. Подземное питание, склоновая и русловая трансформация стока, ветровое перераспределение снега, испарение рассчитываются концептуальными методами, которые показали свою эффективность в различных физико-географических условиях (Виноградов, 1988; Виноградов, Виноградова, 2010).

Алгоритм модели представляет собой следующую систему блоков, участвующих в процессе формирования стока (Рис. 1):

- выпадение осадков, их разделение на твердые и жидкие;
- формирование и стаивание снежного покрова;
- перехват жидких осадков растительным покровом и испарение с растительного покрова;
- испарение со снежного покрова;
- испарение с почвенно-растительного покрова;
- инфильтрация и формирование поверхностного стока;
- динамика почвенных вод и формирование почвенного стока;
- динамика тепловой энергии и фазовые переходы в почве и снежном покрове;
- формирование подземного стока;
- дорусловая и русловая трансформация стока;

- сток в замыкающем створе.

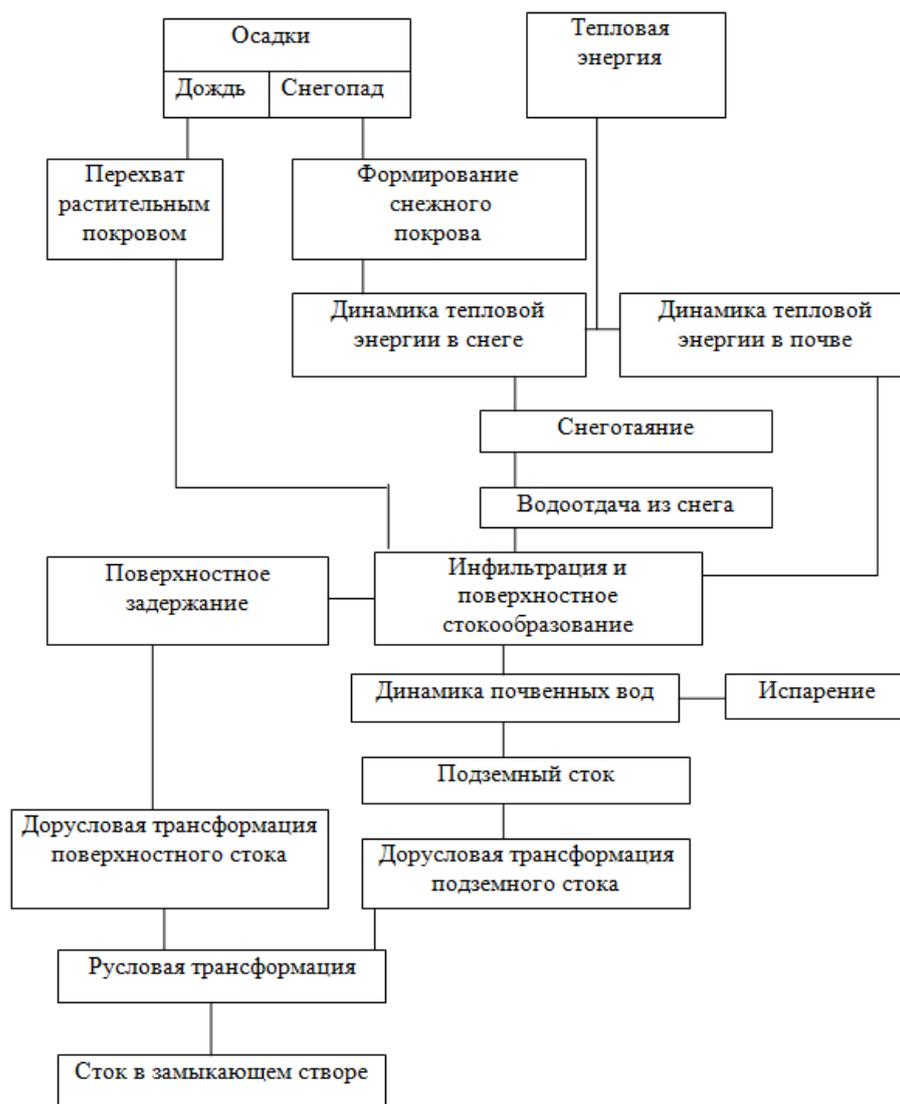


Рисунок 1 Схема модели «Гидрограф»

Для моделирования бассейны рек схематизируются регулярной гексагональной сеткой, узлами которой являются репрезентативные точки (РТ) (Рис.2). Количество РТ – функция площади бассейна, его орографии, а также густоты и равномерности расположения сети метеорологических пунктов наблюдений. Для РТ задаются характеристики, зависящие от географического положения и орографии (координаты РТ, высота РТ, ориентация склона, уклон, орографическая затененность склона и овраженность), а также определяются метеорологические характеристики (среднегодовая температура и дефицит влажности воздуха, годовая или сезонная сумма осадков, зависящие от высотного градиента).

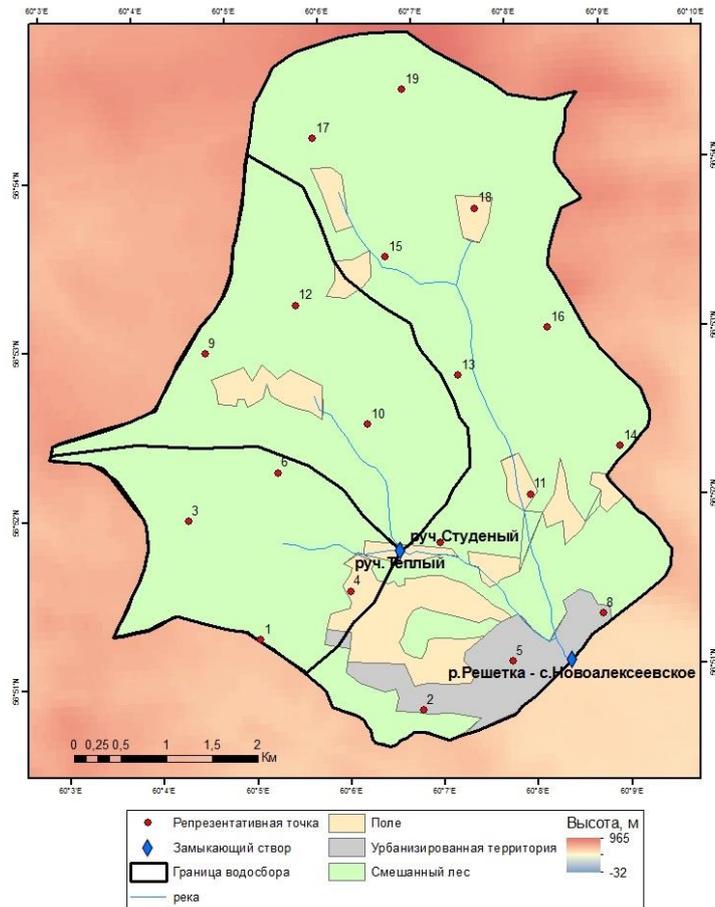


Рисунок 2 Схематизации бассейна в системе модели «Гидрограф» (на примере р. Решетка – с.Новоалексеевское)

В каждую РТ из метеорологических станций интерполируется метеорологическая информация на основе метода триангуляции. В качестве входа в модель используется стандартная метеорологическая информация – значения температуры воздуха, дефицита влажности воздуха, слоя осадков и продолжительности их выпадения, что дает возможность использовать ее в регионах с ограниченной гидрометеорологической информацией. При расчетах в горных районах учитывается градиент температуры воздуха, дефицита влажности воздуха и количества осадков с высотой (Рис. 3).

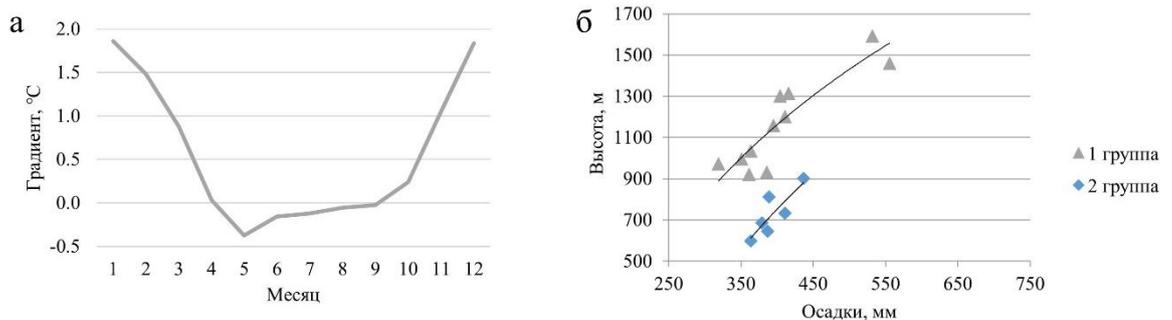


Рисунок 3 Пример расчета градиента а) температуры воздуха и б) количества осадков с высотой (на примере бассейна р.Витим в верховье)

Для оценки параметров в пределах исследуемых бассейнов выделяются однородные природные зоны, так называемые стокоформирующие комплексы (СФК), по которым производится систематизация параметров модели. СФК – часть территории речного бассейна, условно однородная по свойствам ландшафта, и единообразно функционирующая в гидрологическом плане (Рис. 2). СФК описываются набором параметров почвенно-растительного покрова, почвенного покрова и параметрами поверхности склона. Предполагается, что все параметры модели характеризуют СФК в целом, неизменны в его пределах и скачкообразно изменяются на его границах. Разнообразие почвенно-растительного покрова в сочетании с рельефом создают условия формирования стока воды. Для выделения СФК производится анализ сочетаний различных типов почвы, растительности и топографических условий. Для каждого выделенного СФК строится типичный профиль подстилающей поверхности, свойства и соответствующие параметры которого изменяются по глубине от поверхности растительного покрова до 1 – 3 м глубины почвенной колонки (Рис. 5).

Параметры почвенно-растительного покрова СФК:

1. Затененность поверхности почвы кронами деревьев, максимальное и минимальное значения, безразмерный, доля площади СФК, недоступной для попадания прямых солнечных лучей. Эта величина зависит от сомкнутости и прозрачности крон;

2. Емкость перехвата жидких осадков растительным покровом, максимальное и минимальное значения, мм, максимальная водоудерживающая способность растительного сообщества, определяющая возможность всех ярусов растительности данного СФК задерживать некоторый слой дождевой влаги;

3. Альbedo ландшафта, свободного от снежного покрова, максимальное и минимальное значения, безразмерный;

4. Коэффициент испаряемости, максимальное и минимальное значения, 10^{-8} (м/ГПа*с). Является коэффициентом пропорциональности в формуле для расчета испаряемости с поверхности почвы;

6. Параметр подвода тепловой энергии к поверхности почвы, Вт/(м² град), нормированный коэффициент теплообмена для заданного типа подстилающей поверхности;

7. Фенологические даты описывают сезонное развитие растительного покрова путем его аппроксимации трапецией и соответствуют следующим этапам развития растений:

- Первая дата – началу вегетации,
- Вторая – началу максимальной фазы развития растительного покрова,
- Третья – окончанию максимальной фазы развития растительного покрова,
- Четвертая – окончанию вегетационного периода.

Почвенные параметры СФК:

1. Плотность твердой фазы почвы, $\text{кг}/\text{м}^3$ (удельный вес);
2. Пористость, объемная доля, суммарный объем всех пор между частицами твердой фазы почвы;
3. Максимальная водоудерживающая способность (МВС), объемная доля, наибольшее количество капиллярно-подвешенной влаги, которое почва способна удержать после ее обильного увлажнения и свободного стекания избытка влаги;
4. Коэффициент фильтрации, $\text{мм}/\text{мин}$, слой воды, фильтрующийся через горизонтальное сечение почвенной колонки за 1 минуту в условиях насыщенной почвы;
5. Удельная теплоемкость почвы, $\text{Дж}/(\text{кг град})$, количество тепловой энергии, необходимой для повышения температуры одного килограмма почвы на один градус;
6. Удельная теплопроводность твердой фазы почвы (коэффициент теплопроводности), $\text{Вт}/(\text{м град})$, количество теплоты, проходящее за секунду через 1 м^2 изотермической поверхности при единичном температурном градиенте;
 В качестве параметров задаются теплоемкость и теплопроводность твердой фазы почвы без учета почвенной влаги (льда) и воздуха, влияние динамики которых на тепловые свойства почвы учитывается непосредственно при расчете на каждый расчетный интервал времени.
7. Показатель влияния льдистости на фильтрацию, безразмерный;
8. Доля вклада в общее испарение, безразмерный, обычно уменьшается от первого РСР до нижнего;
9. Параметры двухгормонической синусоиды годового хода температуры почвы на глубине 1.6 или 3.2 м, $^{\circ}\text{C}$, используются в качестве граничного условия в расчете динамики тепла в почве;
10. Влажность завядания, мм , предельное значение свободно перемещающейся и испаряющейся влаги;
11. Гидравлический параметр системы почвенных стоковых элементов, $1/\text{м}$.

Параметры поверхности склона СФК:

1. Коэффициент снегонакопления в оврагах, безразмерный, максимальное и минимальное значения. Показывает отношение высоты снежного покрова в оврагах к таковой на окружающей местности;
2. Пространственный коэффициент вариации запасов воды в снежном покрове, безразмерный. Зависит от характера растительного покрова и может быть рассчитан по материалам снегосъемок;

3. Пространственный коэффициент вариации коэффициента фильтрации 1-ого РСП, безразмерный. Показывает изменчивость инфильтрационных свойств поверхности почвы;

4. Максимальная лужистость, безразмерный, доля площади, занятой лужами при максимальном их наполнении;

5. Коэффициент кольматации дна луж, безразмерный, показатель относительного снижения коэффициента фильтрации дна лужи в результате его заиления;

6. Максимальный слой поверхностного задержания, мм. Численно равен объему воды в лужах при их максимальном наполнении, отнесенному к площади;

7. Гидравлический параметр системы поверхностных стоковых элементов, 1/м.

На основе данных наблюдений свойства СФК могут быть обобщены и систематизированы для почвенных профилей, характерных для основных ландшафтов, и использованы на водосборах со схожими условиями формирования стока без применения методов калибровки (Нестерова и др., 2018; Макарьева и др., 2019а).

Запасы воды в снежном покрове – один из важнейших элементов в системе гидрологического цикла для водосборов, расположенных в средних и высоких широтах. Перераспределение снега на территории водосбора неоднородно и должно быть учтено при моделировании. Для учета пространственной неоднородности выпадения снега в модели «Гидрограф» используют пять квантилей, соответствующие центрам одинаковых отрезков на шкале вероятностей: 0.1; 0.3; 0.5; 0.7; 0.9 (Рис. 4) (предполагается нормальный закон распределения (Виноградов, Виноградова, 2010)).

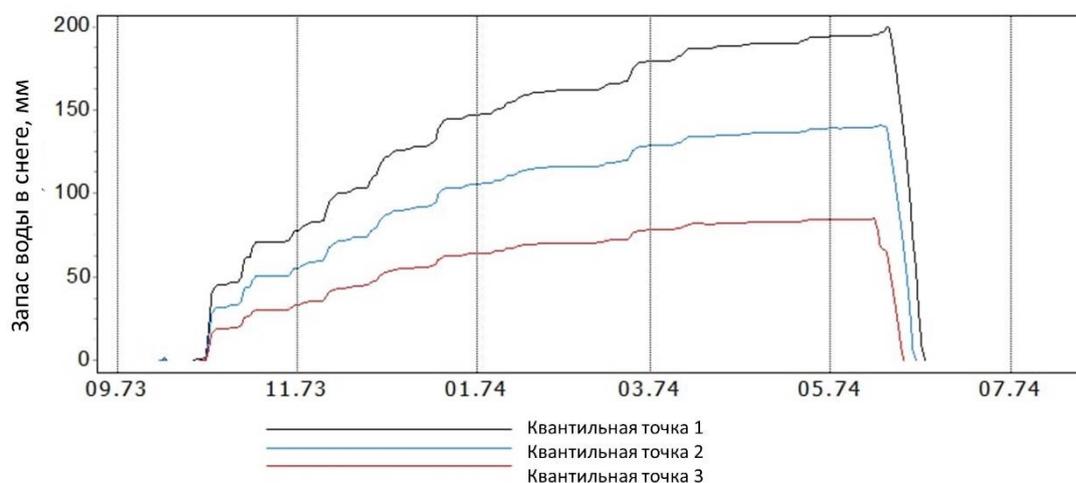


Рисунок 4 Распределение запаса воды в снежном покрове в квантильных точках (на примере Нижнедевицкой водно-балансовой станции)

В модели «Гидрограф» рассчитывается динамика тепла в вертикальном профиле СФК, что позволяет учитывать процессы протаивания и промерзания почвы и их влияние на процессы

формирования стока, в том числе в зоне многолетней мерзлоты (Виноградов, Виноградова, 2010).

Гидрологическая модель «Гидрограф» в концептуальном виде учитывает наличие на водосборе различных бассейновых емкостей, имеющих характерное время истечения и объем, в том числе с характеристиками скоростей влагообмена до десятков и сотен лет. Разработанная Ю.Б. Виноградовым (Виноградов, 1988) концептуальная система стоковых элементов представляет собой иерархическую последовательность ярусов их расположения, принимающих участие в питании рек. Предложенная концепция включает в себя разработанную систему характеристик стоковых элементов поверхности, почвы и различных ярусов подземных вод (Табл. 4); к этим характеристикам относятся показатели времени, интенсивности истечения и запаса воды (Рис. 5).

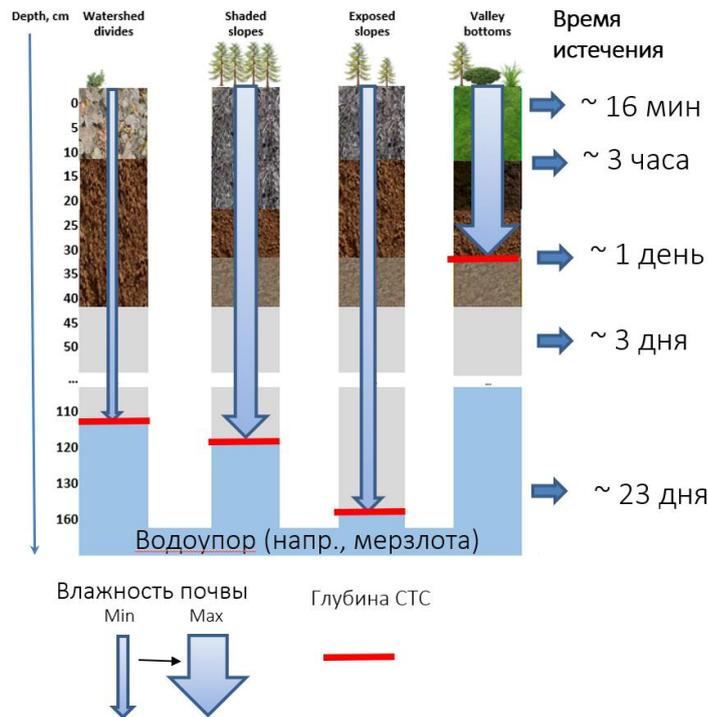


Рисунок 5 Время истечения различных расчетных слоев (на примере ландшафтов полигона «Могот»)

Система стоковых элементов предполагает, что при увеличении площади бассейна увеличивается количество дренируемых горизонтов подземных вод, а «возраст воды» (время, прошедшее от выпадения осадков до появления воды в русловой сети) в руслах рек может изменяться от дней до десятков лет. Подробнее концепция стоковых элементов рассматривается в пункте Главы 2.3.

Выходом модели являются суточные гидрографы стока, элементы водного баланса (осадки, испарение, генетические составляющие речного стока), переменные состояния водосборов (например, запас воды, плотность и температуры снежного покрова, влажность и

температура расчетных слоев почвы, глубины протаивания и промерзания и пр.). В модели версии 2019 года (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619084) расчет ведется на суточном интервале.

Ранее модель «Гидрограф» использовалась для расчетов процессов формирования стока и водного баланса бассейнов рек различной площади (Vinogradov et al., 2011; Semenova et al., 2013, 2015; Лебедева и др., 2017; Макарьева и др., 2020 и др.). Во всех этих работах, в том числе с участием автора диссертации (Макарьева и др., 2018в; Нестерова и др., 2018; Макарьева и др., 2019а; Макарьева и др., 2019б; Макарьева и др., 2019в; Nesterova et al., 2019b; Nesterova et al., 2021; Makarieva et al., 2022), в разной степени подробности описаны этапы применения модели и методика ее параметризации в различных физико-географических условиях.

2.2 Адаптация гидрологической модели «Гидрограф» к моделированию процессов формирования стока на внутрисуточном расчетном интервале времени

В ранее разработанной версии модели «Гидрограф» расчетный шаг составлял одни сутки (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619084). При расчете процессов формирования стока учитывалась средняя интенсивность выпадения жидких осадков, которая рассчитывалась на основе данных входных метеорологических величин о слое осадков и их продолжительности. Однако, чаще всего сведения о продолжительности выпадения осадков в течение суток отсутствуют. В таких случаях величина продолжительности выпадения жидких осадков T (мин) рассчитывается на основании формулы с двумя параметрами (1):

$$T = a \times H^b \quad (1)$$

где H – суточный слой осадков (мм), a – параметр продолжительности дождя (мин/мм), b – показатель степени (б/р). При отсутствии специальных данных значения параметров на основании рекомендаций Ю.Б. Виноградова (1988) задаются следующим образом: $a = 50$ и $b = 0.84$. Если рассчитанная продолжительность выпадения осадков превышает количество минут в сутках, то она принимается равной 1440 минут. В Таблице 2 приведены рассчитанные по формуле (1) значения продолжительности и интенсивности осадков.

Автором работы был проведен анализ данных плювиографов для отдельных ливней, публикуемых для метеостанций в метеорологических ежемесячниках. На Рис. 6 представлены графики связи слоя и интенсивности осадков, составленные для двух районов – Дальнего Востока (по данным 8 станций) и Республики Саха (Якутия) (по данным 52 станций) за период 1980-2012 гг. По графикам видно, что значения интенсивности имеют значительный разброс и не могут быть аппроксимированы аналитической кривой.

Таблица 2 Продолжительность и интенсивность выпадения осадков в зависимости от их слоя, рассчитанная на основе формулы со стандартными значениями параметров

Слой осадков, мм	1	2	3	4	5	10	15	20	40	50	60	80	100	150	200	300
Продолжительность, мин	50	90	126	160	193	346	486	619	1108	1337	1440	1440	1440	1440	1440	1440
Интенсивность, мм/мин	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.06	0.07	0.1	0.14	0.21

* согласно формуле расчета (1) и стандартным коэффициентам a и b

Ливневые осадки, особенно в последние десятилетия, отличаются высокой интенсивностью. Приведем несколько примеров осадков высокой интенсивности за период 1980 – 2012 гг. В Республике Саха (Якутия) на станции Токо зафиксировано выпадение 62.3 мм осадков продолжительностью 95 мин (интенсивность 0.66 мм/мин). В Иркутской области на станциях Тырка и Ербогачен количеству осадков 234 и 203 мм соответствовала интенсивность 0.58 и 0.52 мм/мин. На Дальнем Востоке 25 мм осадков на станции Усть-Нюкжа выпало за 77 мин (интенсивность 0.33 мм/мин).

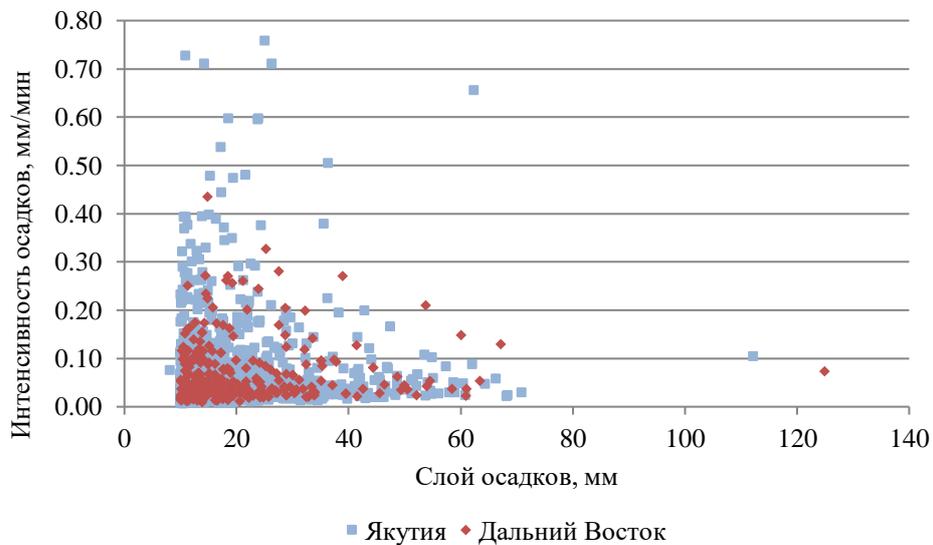


Рисунок 6 График связи слоя и интенсивности жидких осадков, по данным метеорологических станций Дальнего Востока и Республики Саха (Якутия), 1980-2012 гг.

Для метеостанций с наличием данных плувиографов Северо-Кавказского УГМС наибольшие суммы осадков приходятся в среднем на зимние месяцы. Однако, летние ливни, несмотря на более редкую повторяемость, имеют более высокую интенсивность и могут вызывать катастрофические паводки. В Таблице для трех станций Черноморского побережья (Новороссийск, Туапсе, Горный, период 1980 – 2012 гг.) приведены значения наблюдаемых и рассчитанных по формуле (1) величин интенсивности экстремальных сумм осадков. Наблюдаемая интенсивность выпадения осадков в 5-15 раз превышает рассчитанные значения.

Таблица 3 Наблюденная и рассчитанная интенсивность осадков

Метеостанция	Слой осадков, мм	Наблюденная интенсивность, мм/мин	Рассчитанная продолжительность, мин	Рассчитанная интенсивность, мм/мин
Новороссийск	178	0.65	3884	0.046
Туапсе	123	0.24	2848	0.043
Горный	291	0.36	5870	0.050

Использование в расчетах паводков максимума ливневых осадков и их интенсивности закреплено в нормативных документах (Руководство по гидрологической практике, 1997). Разрабатывается методика расчетов величин максимально возможных сумм осадков, основанная на анализе радиолокационных спутниковых данных (Клименко, 2020). При использовании детерминированных моделей речного стока также рекомендуется использовать данные по всем экстремальным характеристикам ливней в году при расчете стока дождевых паводков (Клименко и др., 2019).

Средние 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.

Ранее авторами модели указывалась возможность адаптации алгоритма для моделирования с дискретностью менее суток (Виноградов, Виноградова, 2010). Таким образом, адаптация гидрологической модели «Гидрограф» (ее алгоритмов и программы ЭВМ) к моделированию процессов формирования стока на внутрисуточном расчетном интервале времени стала одной из основных задач диссертационного исследования.

Существуют различные подходы для интегрирования разномасштабных процессов формирования стока в рамках единой модели. Например, в модели SWAT (Jeong et al., 2010) на внутрисуточном интервале используются данные об осадках и производится расчет инфильтрации, в то время как большинство других процессов формирования стока (например, снеготаяние, испарение) рассчитывается на суточном интервале, а затем равномерно распределяется внутри суток с требуемой дискретностью. При моделировании талого стока на водосборе р. Сосны с использованием физико-математической модели формирования стока весеннего половодья (Кучмент и др., 1986; Мотовилов 1993) шаг интегрирования по времени для уравнений тепло- и влагопереноса в снеге и почве был принят равным 1 часу, а для стекания по уравнениям кинематической волны – 6 часам (Мотовилов, 2019). Такой подход, несмотря на более эффективное использование расчетных ресурсов, может не соответствовать задачам моделирования стока на очень малых водосборах. Поэтому при модификации алгоритма модели

«Гидрограф» было принято решение о сохранении единого временного масштаба для описания всех процессов формирования стока.

Программный комплекс модели «Гидрограф» реализован на основе использования языка программирования C++. При разработке программного обеспечения реализовывались принципы структурного программирования, модульности, однократного ввода. Программа имеет пользовательский интерфейс и расчетные модули. В рамках адаптации алгоритма и программы модели были модифицированы как расчетные схемы, так и интерфейс.

Общая схема расчета в модели «Гидрограф» разбита на четыре основных этапа, первые три из них относятся к подготовке и модификации входных метеорологических данных, последний – этап моделирования процессов формирования стока:

1. Однократно-вычисляемые величины.
2. Интерполяционная модель погоды.
3. «Метеорология».
4. Процессы формирования стока.

На первом этапе производится оценка так называемых *однократно-вычисляемых величин* (ОВВ), которые постоянно неизменяемы или имеют внутригодовой ход, но принимаются постоянными в течение всей процедуры моделирования. ОВВ рассчитываются на каждый расчетный интервал времени в течение года согласно заданным параметрам. К ним относятся следующие величины: приход прямой солнечной радиации, облачность, градиент температуры и влажности воздуха с высотой, затененность и емкость перехвата растительным покровом, температура почвы на глубине климатической нормы, принимаемой в качестве граничного условия для решения задачи динамики тепла в почвенном и снежном покрове, и другие. Все эти величины (например, облачность) имеют не только годовой, но и внутрисуточный ход, и могут оказать влияние на результаты моделирования, например процессов снеготаяния. Однако, в данной версии модели модификации подвергся только блок расчета величины прихода прямой солнечной радиации. Величина прихода прямой солнечной радиации используется в модели для расчета эффективной температуры и влажности воздуха, которые имеют значительные преимущества перед обыкновенными температурой и влажностью воздуха в расчетах динамики тепла и испарения (Виноградов и Виноградова, 2010).

Этап «Интерполяционная модель погоды» (ИМП) отвечает за интерполяцию первичных входных метеорологических данных из метеорологических станций в репрезентативные точки (РТ). Входной информацией в модель служат значения температуры воздуха, влажности воздуха, количества осадков и продолжительности выпадения жидких осадков для каждой метеорологической станции в пределах или вблизи речного бассейна за каждый расчетный интервал времени. Интерполяция производится с учетом заданных параметров распределения

жидких и твердых осадков в зависимости от высоты и положения РТ. На этом этапе при отсутствии данных также рассчитывается продолжительность выпадения жидких осадков в зависимости от их слоя.

В современных условиях в РФ наблюдения за осадками производятся раз в 12 часов (Булыгина и др., 2019). Однако, значительная часть метеорологических станций оборудована плювиографами. Также могут использоваться данные специальных наблюдений, при проведении которых часто используется автоматическое оборудование, регистрирующее осадки на более детальном временном интервале, например, Губарева и др. (2019), Лупаков и др. (2021), Макарьева и др. (2020). При наличии метеорологических данных часового разрешения они используются напрямую в качестве входных данных, в таком случае продолжительность осадков принимается равной дискретному шагу записи наблюдений. При использовании материалов плювиографов данные осредняются до равномерного интервала (от одной минуты до нескольких часов, в зависимости от задачи и размера водосбора).

На *этапе «Метеорология»* происходит совмещение результатов расчета ОБВ и метеорологической информации на пространственном уровне репрезентативных точек (РТ) и стокоформирующих комплексов (СФК). В пределах площади РТ может быть выделено несколько СФК. В зависимости от характеристик РТ (высота, уклон и ориентация склона), метеорологических параметров и параметров растительности СФК производится расчет таких величин как эффективная температура и дефицит влажности воздуха, определяется фазовое состояние выпавших осадков и их слой, характеристики свежевыпавшего снега, слой и продолжительность жидких осадков после перехвата части жидких осадков растительным покровом, слой перехвата осадков растительным покровом, испарения из него и слой воды, оставшейся в емкости перехвата, энергетическая составляющая твердых или жидких осадков.

Программные коды этапов «ИМП» и «Метеорология» были модифицированы в части чтения/записи файлов и внутреннего взаимодействия переменных при различных расчетных интервалах времени.

2.3 Основной блок гидрологической модели «Гидрограф» «Лито-педо-фитон» и его адаптированный для внутрисуточных расчетов алгоритм

Основным блоком этапа «Расчет процессов формирования стока» является блок «Лито-педо-фитон» (ЛПФ). Он разбит на отдельные расчетные модули, отвечающие за различные процессы формирования стока в пределах вертикального разреза, простирающегося от поверхности неветренной горной породы через почвенный профиль до поверхности растительного покрова (от греч. *lithos* – камень, *pedon* – грунт, *phyton* – растение) (Виноградов и Виноградова, 2010).

ЛПФ – блок модели, описывающий процессы формирования стока в расчетной точке. Пространственная схематизация водосбора в концепции модели «Гидрограф» подразумевает три уровня – репрезентативные точки (регулярная гексагональная сетка, имеют пространственные координаты), стокоформирующие комплексы (распределены неравномерно, имеют пространственные контуры) и квантильные точки (КТ) (гипотетические участки в пределах СФК, не имеющие координат, между которыми происходит перераспределение и неравномерное формирование/разрушение снежного покрова). Блок «Лито-педо-фитон» применяется для расчета на уровне КТ. Количество КТ в пределах СФК принимается равным 1,3 или 5. При одной квантильной точке принимается равномерное распределение снежного покрова в пределах СФК.

Особенностью модели «Гидрограф» является предложенная Ю.Б. Виноградовым (1988) концепция дорусловой трансформации стока в стоковых элементах. Стоковые элементы – это природные образования, участки поверхностных и подземных элементарных склонов и водосборов, обращенные своей открытой частью к склоновой нерусловой или подземной дренажной сети. Стоковые элементы различного уровня (поверхностные, почвенные и подземные) имеют разработанную систему стандартных характеристик, к которым относятся показатели времени и интенсивности истечения и запаса воды (Виноградов и Виноградова, 2010). Для поверхностных и почвенных стоковых элементов, а также в некоторых случаях стоковых элементов быстрого грунтового стока, которые в системе модели «Гидрограф» относятся к подземным, время истечения составляет менее суток (Табл. 4).

Важно подчеркнуть различие терминологии касательно типов стоковых элементов в модели «Гидрограф» по сравнению с другими науками, например мерзлотоведением. Сток, формирующийся в деятельном слое почвенного профиля в терминологии модели «Гидрограф» будет отнесен к почвенному типу стока, а в мерзлотоведении – к подземному (Шепелев, 2011). Эту разницу необходимо учитывать при рассмотрении содержания диссертационной работы.

Уравнение гидрографа для расчета притока воды к русловой сети из всех стоковых элементов данного уровня записывается следующим образом:

$$Q = \frac{S + b}{1 + [(S - Q_0)/(Q_0 + b)] \exp[-a\Delta t(S + b)]} - b, \quad (2)$$

где Q_0 – начальное значение расхода [м³/с]; S – интенсивность формирования стока [м³/с]; Δt – расчетный интервал времени [с], в течение которого S постоянна. Уравнение (2) выводится из уравнения баланса для каждого стокового элемента

$$\frac{dw}{dt} = s - q, \quad (3)$$

а q аппроксимируется выражением

$$q = \beta[\exp(\alpha w) - 1]; \quad (4)$$

где w – объем воды [м^3], аккумулированной стоковым элементом; s и q – соответственно приток и отток из него [$\text{м}^3/\text{с}$]; t – время [с]; α , β – гидравлические параметры стокового элемента.

Таблица 4 Параметры системы стоковых элементов модели «Гидрограф»

N яруса	Тип стока	a^* [1/м]	Характерные величины стоковых элементов		
			Время истечения	Интенсивность истечения [л/с км ²]	Запасы воды [мм]
-	Поверхностный	1000	17мин	10^5	4,6
-	Почвенный	100	2,8часа	10^4	24
1	Быстрый грунтовый	10	1,2 суток	10^3	69,3
2		3.2	3,7 суток	464	121
3		1	11,6 суток	215	195
4	Грунтовый	0.32	1,2 месяца	100	301
5		0.10	3,8 месяца	46,4	454
6		0.032	1 год	21,5	674
7	Верхний подземный	0.01	3,2 года	10	995
8		$3.2 \cdot 10^{-3}$	10 лет	4,64	1464
9		10^{-3}	32 года	2,15	2152
10	Глубокий подземный	$3.2 \cdot 10^{-4}$	100 лет	1	3161
11		10^{-4}	320 лет	0,464	4640
12		$3.2 \cdot 10^{-5}$	1000 лет	0,215	6812
13	Исторический подземный	10^{-5}	3200 лет	0,1	10000
14		$3.2 \cdot 10^{-6}$	10 000 лет	0,0464	14678
15		10^{-6}	32 000 лет	0,0215	21540
Σ					67256

параметр $b = 10^{-6}$

В системе модели (в случае глубокого залегания подземных вод) подземные стоковые элементы играют роль отдельных независимых емкостей, переменные состояния которых не влияют на водный и энергетический баланс расчетных слоев почвы (РСП) и поверхности водосбора. Величина притока воды в подземные воды определяется водным балансом поверхности водосбора и профиля почвы. Вода, покидающая почвенный профиль на нижней границе нижнего расчетного слоя почвы, распределяется по разным ярусам подземных вод согласно заданным параметрам перераспределения. Объем подземных стоковых элементов не ограничен, он определяет величину притока воды в русловую сеть из подземных емкостей. Изменение величины расчетного интервала времени (РИВ) не оказывает влияние на алгоритм модели.

Задача динамики влаги на поверхности водосбора и в почвенном профиле решается на основе воднобалансового соотношения. Каждый РСП характеризуется параметрами максимальной водоудерживающей способности и коэффициента фильтрации. Водоотдача из РСП отсутствует до тех пор, пока содержание влаги в РСП не превысит величину максимальной водоудерживающей способности. Если низкая инфильтрационная способность РСП ограничивает свободное вертикальное движение воды, то избыток воды направляется в почвенные стоковые элементы, формируется почвенный сток.

Влажность почвы РСП колеблется от уровня неподвижной связанной влаги до максимальной водоудерживающей способности (МВС). При транзитной фильтрации в течение короткого времени влажность может превышать МВС, но это никак не отражается на результатах расчета величины влажности РСП в конце РИВ. В условиях формирования почвенного стока при суточном РИВ даже в случае поступления значительных объемов воды с учетом стандартных параметров стоковых элементов их практически полное истечение (опустошение) происходит за период менее суток. Таким образом, при суточном дискретном шаге почвенные стоковые элементы не влияют на переменные состояния РСП в плане расчета их водного и теплового баланса, так как истечение из стоковых элементов происходит за промежуток времени, более короткий чем РИВ.

Если рассматривать физическую сущность почвенных стоковых элементов, то они представляют собой емкость, равную величине свободной пористости за вычетом максимальной водоудерживающей способности (МВС), которая при промерзании почвы может быть частично или полностью заполнена льдом. Таким образом, пропускная способность почвенных стоковых элементов при малом РИВ и высокой интенсивности поступления воды может быть ограничена, и должна учитываться при моделировании. Полная или частичная заполненность объема свободной пористости на конец РИВ должна также учитываться при расчете влажности РСП и его тепловом балансе.

Рассмотрим предельный слой истечения воды из РСП при его постоянном полном затоплении в течение всего расчетного интервала времени с заданными параметрами стоковых элементов $\alpha=100$, $\beta=10^{-6}$ при различных величинах РИВ и свободной пористости.

Величина $PВ$ (мм) предельного слоя истечения из системы стоковых элементов рассчитывается как:

$$PВ = q * t \quad (5),$$

где обозначения идентичны обозначениям для уравнений (2-4).

Общая пропускная способность стоковых элементов W (мм) составляет сумму величины истечения и объема свободной пористости P (Табл. 5):

$$W = PB + P \quad (6).$$

Таблица 5 Пропускная способность почвенных стоковых элементов при параметрах системы стоковых элементов модели «Гидрограф»

РИВ (с)	86400		3600		600		300	
P, слой свободной пористости (мм)	I	W	I	W	I	W	I	W
5	0.04	61	0.12	7.3	0.54	5.4	1.04	5.2
10	0.11	158	0.27	16	1.1	11	2.1	10.5
25	0.69	991	1.08	65	3.2	32	5.6	28
50	8.88	12787	9.68	581	13.8	138	18.8	94

I – средняя интенсивность поступления воды в РСП (мм/мин), соответствующая предельной пропускной способности, W – суммарная пропускная способность РСП (мм) за РИВ (с).

При некоторых значительных величинах интенсивности поступления воды в РСП за короткий РИВ пропускная способность стоковых элементов при меняющихся (например, в результате промерзания) величинах свободной пористости может быть недостаточна для объема поступающей воды. Появляется возможность полного затопления одного или нескольких РСП в течение РИВ, а также подтопления поверхности водосбора.

Такой вариант предусмотрен в модели «Гидрограф», однако, ранее он был связан с условиями близкого залегания грунтовых вод, когда емкости верхних подземных стоковых элементов оказывают влияние на водный (и соответственно тепловой) баланс РСП. В этом случае вертикальный почвенный разрез подразделяется на три зоны: нижнюю, затопленную грунтовой водой (насыщенную зону); зону капиллярной каймы; зону, расположенную выше капиллярной каймы. Насыщенная зона имеет переменную верхнюю границу (уровень грунтовых вод). Влажность почвы соответствует полной влагоемкости (пористости). Грунтовая вода в пределах почвенного профиля поступает в локальную почвенную дренажную сеть или почвенные стоковые элементы. В зоне капиллярной каймы вместо МВС вводится понятие капиллярной влагоемкости, величина которой изменяется от полной влагоемкости на уровне грунтовых вод до МВС на верхней границе зоны. Мощность зоны капиллярной каймы зависит от механического состава и структуры почвы и изменяется от нуля для крупнообломочных пород до 2-3 м в лессовидных суглинках. Верхняя зона вне пределов капиллярной каймы функционирует идентично РСП в условиях глубокого залегания грунтовых вод. В условиях близкого залегания грунтовых вод необходимо рассчитывать динамику уровня грунтовых вод и положение каждого РСП в той или иной зоне.

При коротких РИВ и интенсивном поступлении воды в почвенный профиль формирование и исчезновение насыщенной зоны и капиллярной каймы в пределах РСП может быть связано исключительно с почвенным стоком и не затрагивать подземные стоковые элементы. Для решения указанного несоответствия алгоритм и программный код модели «Гидрограф» были модифицированы. В следующем разделе представлено описание обновленных алгоритмов некоторых центральных блоков модели «Гидрограф».

На Рис. 7 представлена схема ЛПФ, ниже – краткое описание основных операций, производимых в каждом блоке. Модифицированные в результате диссертационной работы блоки Испарение, Почва 1 и Почва 2 рассмотрены подробно в Приложении 1, для них приведены полные алгоритмы с описанием переменных и блок-схем.

1. Диагноз – оценивается факт значимого наличия или отсутствия снежного покрова. Если снежный покров исчезает за период менее половины РИВ, то в расчетах теплового баланса вертикального принимается его отсутствие. Если фиксируется наличие снежного покрова, то в этом блоке рассчитываются величины: испарение со снежного покрова, первое приближение запаса воды и количества тепловой энергии в снежном покрове.

2. Физические свойства снежного покрова и РСП – производится расчет величин теплоемкости, коэффициентов теплопроводности и теплообмена между РСП и снежным покровом, коэффициенты фильтрации мерзлой почвы. Расчет производится с учетом начальных условий (количество тепловой энергии, влажность, льдистость) и параметров (плотность, пористость, удельная теплоемкость и теплопроводность твердой фазы вещества) РСП на начало РИВ.

3. Испарение – вычисляется величина испарения в каждом РСП. В предыдущей версии модели были реализованы два блока Испарения, в зависимости от условий глубокого или близкого залегания грунтовых вод. Предполагалось, что в условиях глубокого залегания грунтовых вод и высокой пропускной способности почвенных стоковых элементов, РСП не может быть подвержен затоплению, а следовательно, отсутствует капиллярное поднятие в вышележащие РСП. В условиях близкого залегания грунтовых вод РСП может попадать в три условные зоны – выше капиллярной каймы, в зоне капиллярной каймы, в насыщенной зоне. Выбор условия близкого или глубокого залегания грунтовых вод производился заранее до начала расчета. В новой версии модели дополнительно к варианту близкого залегания грунтовых вод предполагается возможность краткосрочного формирования насыщенных РСП в результате формирования почвенных вод и их влияния на вышележащие расчетные слои почвы, в том числе, испарение в зоне капиллярной каймы.

4. Энергия 1, Фаза – рассчитываются предварительные значения величин тепловой энергии, необходимых для завершения фазовых переходов в обоих направлениях в РСП и

снежном покрове; производится оценка наличия или отсутствия фазового перехода в снежном покрове или РСП.

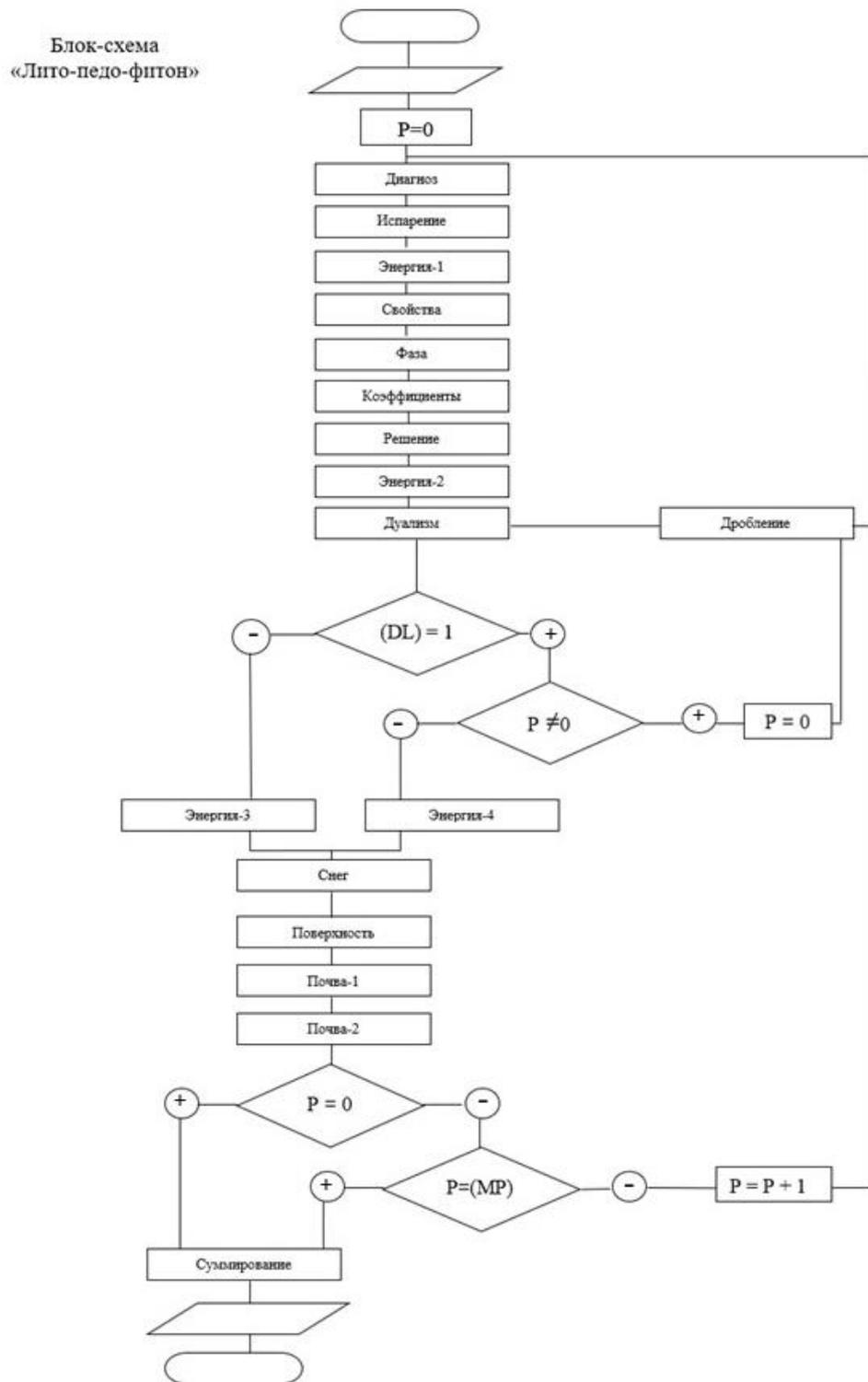


Рисунок 7 Схема блока «Лито-педо-фитон» модели «Гидрограф».

5. Коэффициенты и Решение системы уравнений теплового баланса – оцениваются коэффициенты уравнений теплового баланса системы «снежный покров – почвенный профиль» с учетом фазовых переходов. Производится решение системы уравнений теплового баланса, на

выходе происходит распределение поступившей энергии в расчетной системе – вычисляются величины количества тепловой энергии, поступившей в снежный покров и РСП.

6. Энергия-2 – происходит уточнение величин количества энергии в каждом РСП и снежном покрове, необходимые для фазовых переходов.

7. Дуализм, Дробление, Суммирование. В блоке Дуализм определяется наличие двух процессов в снежном покрове или РСП в течение РИВ – изменения температуры и фазового перехода. При наличии дуализма в блоке Дробление РИВ и соответствующие входные величины дробятся на несколько подынтервалов для предупреждения хаотических решений системы уравнений теплового баланса. Далее цикл ЛПФ повторяется для подынтервалов РИВ, происходит суммирование полученных результатов на конец РИВ. После запуска Дробления, если возникает ситуация Дуализма, рассматривается соотношение процессов изменения температуры и фазового перехода. Процессом, потребляющим наименьшее количество энергии, пренебрегают.

8. Энергия-3, Энергия-4 – завершается вычисление количества тепловой энергии, поступившей в РСП и снежный покров в условиях наличия и отсутствия дробления.

9. Снежный покров – проводятся расчеты процессов формирования (выпадение жидких и твердых осадков, замерзание воды, накопление) и разрушения (водоотдача) снежного покрова. Вычисляются переменные состояния снежного покрова – запас воды, плотность, водонасыщенность, температура, высота.

10. Поверхность – рассчитываются слои потерь в емкостях поверхностного задержания, инфильтрации в РСП-1, поверхностного стокообразования.

11. Почва 1 – производится расчет динамики воды и тепловой энергии в системе РСП, рассчитывается глубина протаивания и промерзания, расположение РСП относительно уровня грунтовых и почвенных вод, приток воды в подземные воды. Расчет ведется от поверхности к нижнему РСП.

12. Почва 2 – корректировка результатов блока Почва-1 с учетом обратной компенсации. Расчетная компенсация может быть вызвана низкой пропускной способностью нижележащих РСП по сравнению с величиной инфильтрации в РСП-1, тогда вода как бы «возвращается» в вышележащие РСП или на поверхность. Расчет ведется в обратном направлении от нижнего РСП к поверхности. В результате вычисляются величины притока воды в РСП-1, стокообразования в почвенных элементах каждого РСП, поверхностного стокообразования, величин влажности РСП на конец РИВ. В новой версии также вводятся такие переменные как уровень почвенных вод и мощность насыщенного слоя.

В алгоритм модели были введены новые обязательные параметры, внесены изменения в разделе назначения начальных условий.

Для описания динамики влажности в зоне капиллярной каймы согласно (Виноградов, Виноградова, 2008) введены два обязательных параметра: предельная высота капиллярного поднятия и эмпирический параметр степени n :

$$(h_{\text{КВ}})_i = \sqrt[n]{\left[1 - \frac{(L-x_i)}{h_k}\right] (\varepsilon_i \Delta x_i)^n + \frac{(L-x_i)}{h_k} (h_{\text{max}_i})^n} \quad (7)$$

где $h_{\text{КВ}}$ – слой капиллярной влагоемкости РСП, 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_k – капиллярный напор (предельная высота капиллярного поднятия) (м), h_{max} – максимальная водоудерживающая способность (м), n – эмпирический параметр, показатель степени (б/р). При $n=1$ констатируется линейная функция капиллярной влагоемкости, при наличии эмпирических данных параметр n может быть откалиброван.

Начальными условиями для РСП являются величины влажности, льдистости и температуры. В прежней версии модели влажность и льдистость (с поправкой на объем льда) не могла превышать заданную величину параметра максимальной водоудерживающей способности (МВС). В обновленном варианте алгоритма величины влажности и льдистости ограничены величиной пористости, которая обычно превышает МВС. 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 Табл. 6 приведены сведения об изменениях, внесенных в программный комплекс модели «Гидрограф» для ее адаптации к внутрисуточному интервалу расчета. Приложение 1 содержит алгоритмы трех блоков ЛПФ модели «Гидрограф», подвергшихся самым значительным изменениям.

Таблица 6 Основные изменения, внесенные в программный комплекс модели «Гидрограф»

Блок программного комплекса или подблок алгоритма	Предыдущая версия	Адаптированная версия
Входные метеорологические данные	Временное разрешение – сутки	Временное разрешение – менее суток, но в равномерном формате
Блок Однократно-вычисляемые величины	Расчет суточных величин прихода прямой солнечной радиации	Расчет величин прихода прямой солнечной радиации согласно заданному внутрисуточному РИВ
Блок Испарение в условиях подтопления и формирования капиллярной каймы в РСП	Функционирует только в условиях близкого залегания грунтовых вод, в ином случае используется упрощенный алгоритм	Является основным блоком ЛПФ, так как возможно возникновение насыщенной зоны в почве, не связанной с подземными водами
Блок Почва-1	Содержание воды в стоковых элементах РСП не учитывается при расчете влажности почвы	Количество воды в стоковых элементах РСП в конце РИВ учитывается при расчете влажности почвы, соответственным образом влияет и на результаты расчета динамики тепла в вертикальном профиле ЛПФ
Параметры СФК	Параметры предельной высоты капиллярного поднятия и эмпирического коэффициента нелинейности задаются только в условиях близкого залегания грунтовых вод	Параметры предельной высоты капиллярного поднятия и эмпирического коэффициента нелинейности задаются обязательно
Начальные условия – переменные состояния расчетных слоев почвы	Влажность или льдистость (с поправкой на объем) лимитирована величиной максимальной водоудерживающей способности	Влажность или льдистость (с поправкой на объем) лимитирована величиной пористости. 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

2.4 Выводы

В Главе 2 приводится краткое описание используемой в работе распределенной детерминированной гидрологической модели «Гидрограф». Алгоритмы модели сочетают физически-обоснованные и концептуальные подходы в описании процессов наземного гидрологического цикла. Метод ориентирован на использование ограниченной входной информации для моделирования. Модель позволяет проводить априорную оценку параметров и

рассчитывать гидрологические характеристики и элементы водного баланса водосборов с различными площадями и физико-географическим положением.

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 времени выпадения от слоя осадков. Средние 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.

Автором диссертации проведена работа по адаптации программного комплекса модели «Гидрограф» для внутрисуточных расчетов. Наиболее сложной задачей являлась модификация блоков модели, связанных с динамикой влажности почвенного профиля. Дорусловая трансформация стока в модели «Гидрограф» описывается с помощью концепции стоковых элементов. При малом РИВ (по сравнению с сутками) пропускная способность почвенных стоковых элементов в условиях высокой интенсивности поступления воды может быть ограничена. Полная или частичная заполненность объема свободной пористости на конец РИВ влияет на результаты расчета влажности РСП и его теплового баланса. Эти особенности моделирования почвенного стока при коротких РИВ и интенсивных осадках были учтены в обновленной версии модели «Гидрограф».

Адаптированная версия модели «Гидрограф» позволяет использовать входные метеорологические данные с временным разрешением от нескольких минут до нескольких часов. Модифицирован алгоритм расчета прямой солнечной радиации для применения на внутрисуточном интервале. Модифицированный алгоритм центрального блока модели «Гидрограф» «Лито-педо-фитон» позволяет возникновение насыщенной зоны в почве, связанной с почвенным стоком, а не колебанием уровня залегания грунтовых вод. Введены два новых параметра модели «Гидрограф». Расширены варианты начальных условий о переменных состояниях расчетных слоев почвы.

Глава 3. Разработка методики моделирования гидрографов стока воды с расчетным шагом менее суток и оценка характеристик максимального стока в бассейнах малых рек на основе гидрологической модели «Гидрограф» (на примере рек Черноморского побережья Северного Кавказа)

Бассейны малых рек побережья Черного моря являются одним из паводкоопасных регионов России. Катастрофические ливни, приводящие к экстремальным паводкам, очень локальны, синхронность особо высоких пиков расходов часто не прослеживается на сопредельных водосборах. Природные факторы формирования стока совместно с ливневым характером осадков обуславливают малое время добегания волн паводков, быстрые подъем и спад уровня воды и многократное увеличение расходов воды (Макарьева и др., 2018). Таким образом разработка и апробация методики моделирования гидрографов стока воды с расчетным шагом менее суток для оценки характеристик максимального стока является важной задачей для водосборов рек Черноморского побережья Северного Кавказа.

Большое количество работ посвящено катастрофическим паводкам и наводнениям на Черноморском побережье Северного Кавказа (Асарин, Жиркевич, 2012; Базелюк, Лурье, 2014; Колтерманн и др., 2012; Ткаченко, Волосухин, 2013), в них в основном дается описание этих явлений на основе имеющейся гидрометеорологической информации. Существуют также методические разработки по расчету и моделированию процессов формирования паводков и краткосрочному прогнозированию паводкового стока (Белякова и др. 2013; Белякова, Гарцман, 2017; Христофоров и др., 2015). В работе С.В. Борща и др. (2015) представлен развернутый обзор методов прогноза, применяемых за рубежом.

3.1 Параметризация и верификация гидрологической модели «Гидрограф» для территории Черноморского побережья

Параметризация модели. В качестве объектов исследования выбраны водосборы рек Черноморского побережья площадью от 14 до 839 км², из них большинство обеспечены наблюдениями за стоком воды и один водосбор — р. Цемес (г. Новороссийск) — не изучен (Табл. 7).

Климат района влажный субтропический. На метеорологической станции Мархотский перевал (высота 430 м, ряд наблюдений — 1966–2014 гг.) средняя годовая температура воздуха составляет 9.2°C, годовое количество осадков достигает 903 мм, те же параметры для станции Геленджик (4 м) составляют 13.1°C и 754 мм. Территория исследования (Рис. 8-9) покрыта лиственными лесами, преимущественно дубовыми, и степями. Выбранные реки имеют дождевой тип питания. Максимальный сток формируется при выпадении осадков высокой интенсивности.

В ходе работы была проведена схематизация водосборов и систематизированы параметры модели Гидрограф для основных ландшафтов исследуемого региона (Виноградов, 1988). Вся территория исследования разделена на шесть стокоформирующих комплекса (СФК): 1 – степи, 2 – дубовые леса, 3 – смешанные, 4 – дубово-грабовые, 5 – еловые леса, 6 – альпийские и субальпийские луга, 7 – городские агломерации (Ландшафтная карта СССР, 1980; Рис. 8-9).

Для каждого СФК были оценены параметры растительности, склонов, подземного питания, а также на основе информации о типах почв и их свойствах разработаны характерные почвенные профили (Дрыгина, 1967). Каждый профиль разбит на 10 расчетных слоев почвы (РСП) по 10 см каждый. Профиль имеет уникальный набор параметров, который позволяет описать вертикальное движение влаги в разрезе почвенной колонки. В число таких параметров входят: плотность почвы или ее удельная масса; пористость, находящаяся в зависимости от удельной и объемной масс почвенных частиц; максимальная водоудерживающая способность, которая в среднем для данных профилей изменялась от 50 мм в первом РСП до 20 мм в нижнем; параметр влажности завядания; удельная массовая теплоемкость и удельная массовая теплопроводность почвы; коэффициент фильтрации, являющийся мерой водопроницаемости почвенного профиля. Численные эксперименты показали, что наиболее чувствительным параметром при учете формирования паводков является коэффициент фильтрации. Принятые значения колеблются от 10 мм/мин в верхних слоях почвы до 0.5 мм/мин в нижних слоях.

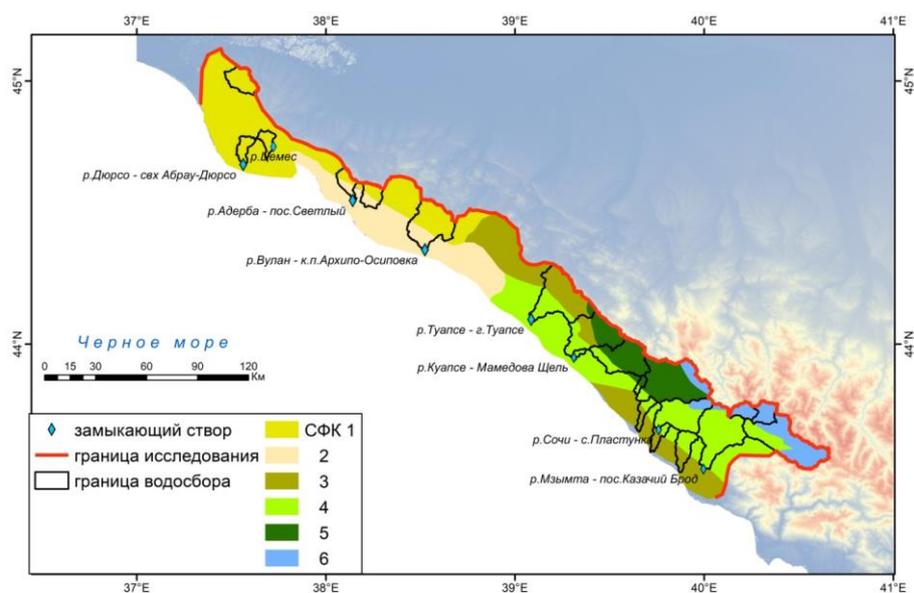


Рисунок 8 Распределение стокоформирующих комплексов на всей территории Черноморского побережья: 1 – дубовые леса, 2 – степи, 3 – смешанные леса, 4 – дубово-грабовые леса, 5 – еловые леса, 6 – альпийские и субальпийские луга

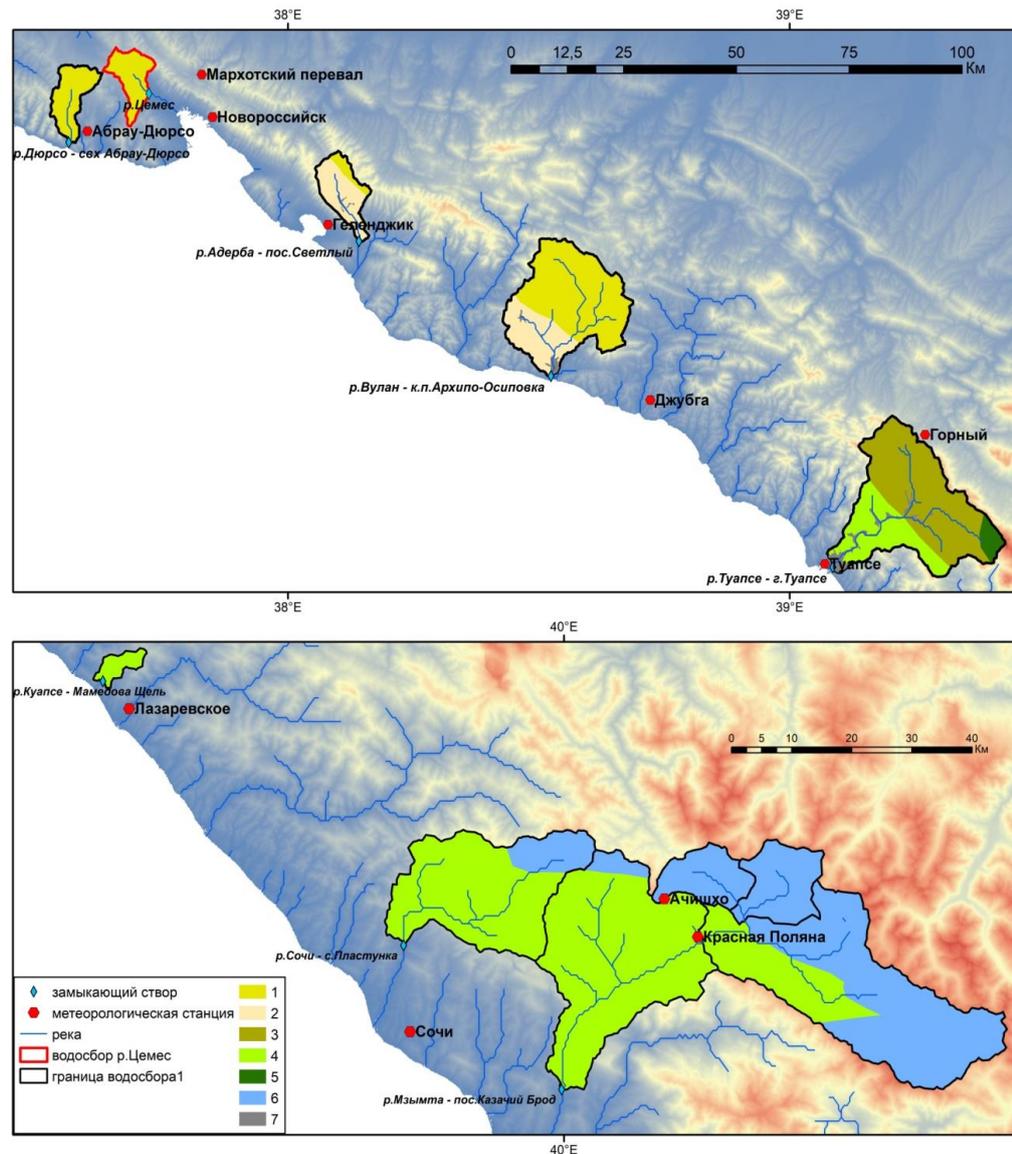


Рисунок 9 Стокоформирующие комплексы на водосборах исследования: 1 – дубовые леса, 2 – степи, 3 – смешанные леса, 4 – дубово-грабовые леса, 5 – еловые леса, 6 – альпийские и субальпийские луга, 7 – городская агломерация

Распределение осадков в горных районах формируется в условиях интенсификации вертикальных потоков воздуха. В результате понижения температуры воздух достигает состояния насыщения водяными парами и происходит конденсация и выпадение осадков. Решение проблемы интерполяции осадков в горных условиях может опираться на нормирование суточных сумм осадков по их годовой среднемноголетней величине. Связанную с этим задачу домодельного назначения годовых норм осадков по всем репрезентативным точкам водосбора (РТ) предлагается решать на основе выявленных локальных зависимостей осадков от высоты местности.

Для построения зависимостей количества осадков от высоты местности использованы:

1) суточные данные о количестве осадков на метеорологических станциях,

2) данные климатических справочников о распределении осадков на метеорологических постах региона за исторический период наблюдений.

Следует отметить, что для группы водосборов северного побережья (условно) (реки Дюрсо, Адерба, Вулан, Тупсе, Куапсе) лишь две метеостанции (Мархотский Перевал и Горный) располагаются вблизи вершин горного массива, характеризующихся выпадением большего количества осадков по сравнению с побережьем. Для группы «южных» водосборов (реки Сочи, Мзымта) только одна метеостанция (Ачишхо) имеет высоту более 1000 м. Таким образом, возможности построения зависимостей количества осадков от высоты, необходимых для интерполяции данных при недостаточности метеоданных, оказались очень ограниченными. Для первой группы бассейнов градиент увеличения осадков в прибрежной части водосборов при абсолютных высотах до 200 м составляет в среднем 40 мм на 100 м. Для второй группы: 80 мм на 100 м.

Результаты моделирования процессов формирования стока. Для верификации модели «Гидрограф» было проведено непрерывное моделирование процессов формирования стока с суточным интервалом в семи бассейнах с данными наблюдений за расходами воды площадью от 14 до 839 км² и средними и максимальными высотными отметками в диапазоне от 209 до 1340 м и 531-2940 м соответственно.

В качестве входной метеорологической информации задавались суточные данные по температуре, влажности воздуха и количеству выпавших осадков. При интерполяции осадков на горные склоны суточные величины корректировались согласно высотному градиенту осадков. Для расчета величины градиента были использованы данные о среднемноголетних годовых суммах осадков на метеорологических станциях и постах за исторический период наблюдений (Справочник по климату СССР, 1966; Метеорологический ежемесячник, 1964-1983).

Результатами моделирования стали гидрографы стока воды и значения элементов водного баланса (Табл. 7). Периоды расчета для каждого водосбора определялись наличием метеорологической и контрольной гидрологической информации. Самый длительный период моделирования составил 47 лет (1966-2013 гг.), самый короткий – 11 лет (1966-1977 гг.). Годовое количество осадков в водном балансе водосборов варьируется от 733 мм (р. Дюрсо – свх Абрау-Дюрсо) до 2312 мм (р. Сочи - с. Пластунка), величины испарения составляют 445 мм (р. Дюрсо – свх Абрау-Дюрсо) – 567 мм (р. Туапсе – г. Туапсе). Ошибки моделирования среднемноголетнего годового слоя стока колеблются от 3 (р. Туапсе – г. Туапсе) до 44 % (р. Куапсе – Мамедова Щель) и зависят от обеспеченности водосборов количеством и качеством входных метеорологических данных.

р. Дюрсо – свх Абрау-Дюрсо. Моделирование гидрологических характеристик р. Дюрсо осуществлялось за период 1966-1977 гг. Среднемноголетний годовой водный баланс данного

водосбора распределяется следующим образом: осадки – 733 мм, испарение – 445 мм, сток 291 мм. Несмотря на низкое среднее значение критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (-0.13), его наивысшие значения достигают 0.79 (Табл. 7). Рассчитанные и наблюдаемые величины в целом удовлетворительно совпадают, как по абсолютным значениям, так и по динамике изменений (Рис. 10).

р. Адерба – пос. Светлый. Для бассейна р. Адерба расчет выполнялся за период 1977-1997 гг. при использовании одной метеостанции. Наибольшие значения NS достигают 0.64, наименьшие -2.2. При наблюдаемом годовом слое стока 486 мм рассчитанный составил 515 мм. Среднее за период моделирования количество осадков составляет 1081 мм, испарение – 565 мм (Табл. 7). Примеры рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока с высокой, низкой и средней сходимостью представлены на Рис. 11.

р. Вулан – к.п. Архипо-Осиповка. Водосбор р. Вулан был промоделирован за период 1977-2013 гг. Средне за этот период годовое количество осадков составило 1149 мм, испарения – 543 мм. Рассчитанное значение стока составляет 608 мм при наблюдаемом, равном 644 мм. Максимальные и минимальные значения критерия эффективности NS достигли 0.61 и -20.4 соответственно (Табл. 7, Рис. 12). Такие низкие значения минимальной величины может быть обусловлено низким качеством метеорологической информации, т.к. в другие года данный критерий не столь низок.

р. Туапсе – г. Туапсе. Моделирование стока бассейна р. Туапсе проводилось за 1966-2013 гг. Результаты можно считать удовлетворительными. Несовпадение рассчитанных и наблюдаемых среднемноголетних слоев стока составляет 38 мм или чуть более 3%. Осадки и испарение в бассейне р. Туапсе по результатам расчета составляют 1805 и 567 мм. Медианная величина критерия эффективности NS для суточных расходов воды достигает 0.60, средняя, максимальная и минимальная – 0.57; 0.78 и 0.20 соответственно (Табл. 7, Рис. 13).

р. Куапсе – Мамедова Щель. Результаты моделирования стока р. Куапсе были получены за период 1977-1987 гг. Количество осадков, испарения и стока составило 1586, 515 и 1069 мм соответственно. Результаты моделирования удовлетворительные – средний критерий NS равен 0.56. Его значения колеблются от 0.25 до 0.82 (Табл. 7). Наблюдаемые и рассчитанные гидрографы представлены на Рис. 14.

р. Сочи – с. Пластунка. Моделирование стока р. Сочи было произведено за 1982-1988 гг. При моделировании были использованы входные данные двух метеостанций: Сочи и Ачишхо. Водный баланс данного водосбора распределяется следующим образом: осадки – 2312 мм, испарение – 552 мм, сток 1736 мм. Значение критерия эффективности варьируются от -0.72 до 0.62 при среднем значении 0.39 (Табл. 7). На Рис. 15 представлены рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока.

р. Мзымта – пос. Казачий Брод. Моделирование гидрологических характеристик водосбора р. Мзымта было выполнено за 1982-1988 гг. Данный водосбор является горным, при расчетах были использованы данные трех метеостанций, только одна из которых находится на высоте 1880 м. Количество осадков за этот период составило 2198 мм, испарение 465 мм, сток 1676 мм. Средний критерий эффективности равняется 0.23 при максимальных и минимальных значениях 0.53 и -0.09 соответственно (Табл. 7). Гидрографы представлены на Рис. 16.

Таблица 7 Средние значения статистических критериев и элементов водного баланса для водосборов исследования

Река – створ	S	T	H (av /max)	K	Y _o	Y _s	P	E	NS (av /med)	NS (max, год)	NS (min, год)
р. Дюрсо – свх Абрау-Дюрсо	51.9	1966- 1977	211/531	1 (-)	272	291	733	445	-0.13/ 0.25	0.79 (1966)	-1.9 (1969)
р. Адерба – пос. Светлый	59.7	1977- 1997	380/745	1 (-)	486	515	1081	565	-0.07/ 0.30	0.64 (1981)	-2.2 (1984)
р. Вулан – к.п. Архипо-Осиповка	265	1977- 2013	209/742	1 (-)	644	608	1149	543	-2.58/ 0.36	0.61 (1978)	-20.4 (2012)
р. Туапсе – г. Туапсе	351	1966- 2013	365/1374	2 (+, +)	1200	1238	1805	567	0.57/ 0.60	0.78 (1981)	0.2 (1972)
р. Куапсе – Мамедова Щель	14	1977- 1987	380/901	1 (-)	1539	1069	1586	515	0.56/ 0.60	0.82 (1981)	0.25 (1985)
р. Сочи – с. Пластунка	238	1982- 1988	840/2089	2 (-, -)	1923	1736	2312	552	0.39/ 0.56	0.62 (1986)	-0.72 (1983)
р. Мзымта – пос. Казачий Брод	839	1982- 1988	1340/2940	3 (+, +, -)	2041	1676	2198	465	0.23/ 0.21	0.53 (1984)	-0.09 (1985)
р. Цемес – г. Новороссийск	82.6	1977- 2013	215/531	1 (+)	-	330	833	503	-	-	-

где S – площадь водосбора, км²; T – период моделирования (годы); H – высота водосбора, м; K – количество используемых метеостанций, знаки – или + обозначают положение метеостанции за пределами или в пределах водосбора; Y_o и Y_s – наблюдаемый и рассчитанный среднемноголетний годовой слой стока, мм; P – осадки, мм; E – общее испарение, мм; NS – критерий Нэша-Сатклиффа, б/р; av – среднее значение; med – значение медианы; max и min – максимальное и минимальное значение.

Для оценки эффективности расчетов ряды рассчитанных расходов воды сравнивались с имеющимися данными наблюдений за стоком на основе величины критерия Нэша-Сатклиффа (NS) (Nash, Sutcliffe, 1970). Обобщенные статистики и элементы водного баланса для всего периода расчета представлены в Табл. 7.

Медианные величины NS для суточных расходов воды для некоторых рек (реки Дюрсо, Адерба, Вулан) колеблются от 0.21 до 0.36. Хотя максимальные значения NS в некоторые годы для этих рек превышают 0.6-0.7, в целом, если оценивать результаты моделирования по принятым в мировой практике стандартным критериям (например, Moriasi и др., 2007), они должны быть признаны неудовлетворительными. Однако, при оценке результатов необходимо учитывать, что моделирование процессов формирования стока в бассейнах горных рек Дюрсо,

Адерба и Вулан производилось с использованием входных метеорологических данных с единственной метеостанции (разной для каждого бассейна). Эти метеостанции расположены не только за пределами бассейна, но и на значительно более низкой абсолютной высоте. Например, для горного бассейна р. Адерба, средняя высота которого составляет 340 м, ближайшая метеостанция (Геленджик) находится на абсолютной высоте 4 м. Фактор нерепрезентативных данных об осадках частично обуславливает заниженные по сравнению с наблюдаемыми рассчитанные максимальные расходы воды. Наличие данных хотя бы еще одной метеорологической станции, расположенной в горной части водосборов, позволяет существенно повысить качество моделирования гидрографов стока в исследуемом районе. Так значения NS для бассейна р. Туапсе, где при моделировании с суточным шагом использовались данные двух метеорологических станций (Туапсе и Горный), достигают величин 0.6 при применении модели Flood Cycle Model (Белякова и Гарцман, 2017) и «Гидрограф».

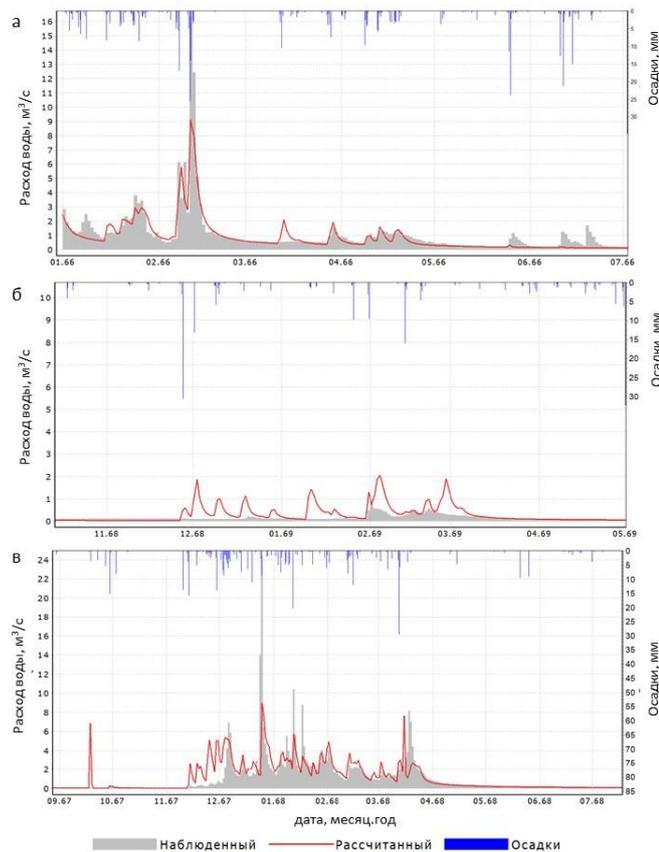


Рисунок 10 Суточные рассчитанный и наблюдаемый гидрографы стока р. Дюрсо – свх Абрау-Дюрсо, м³/с; а, б, в – примеры высокого, среднего и низкого значения NS.

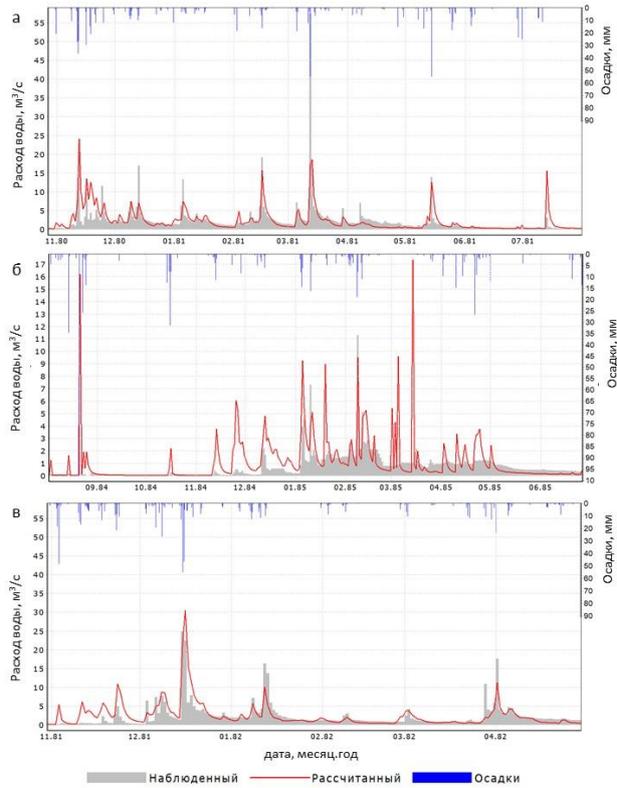


Рисунок 11 Суточные рассчитанный и наблюдаемый гидрографы стока р. Адерба – Светлый, м³/с; а, б, в – примеры высокого, среднего и низкого значения NS.

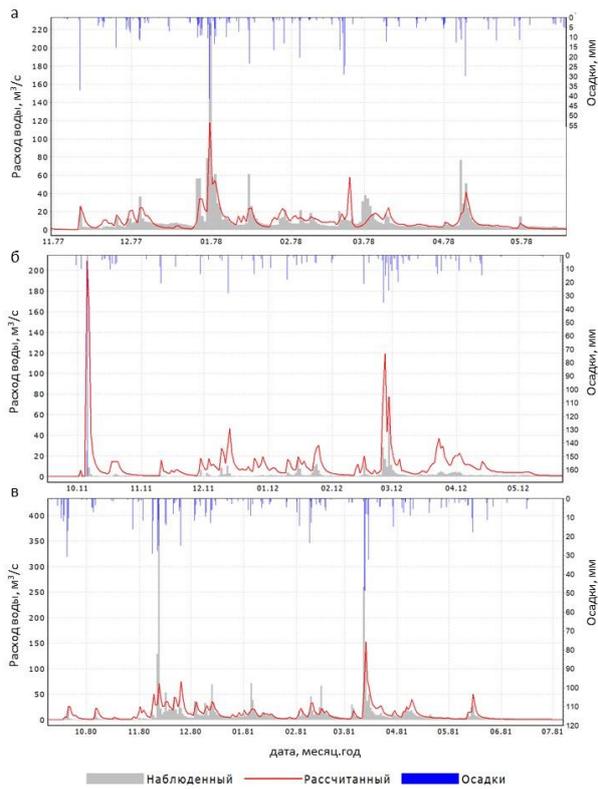


Рисунок 12 Рассчитанный и наблюдаемый гидрографы стока р. Вулан - к.п. Архипо-Осиповка, м³/с; а – высокое значение NS, б – низкое значение NS, в – среднее значение NS.

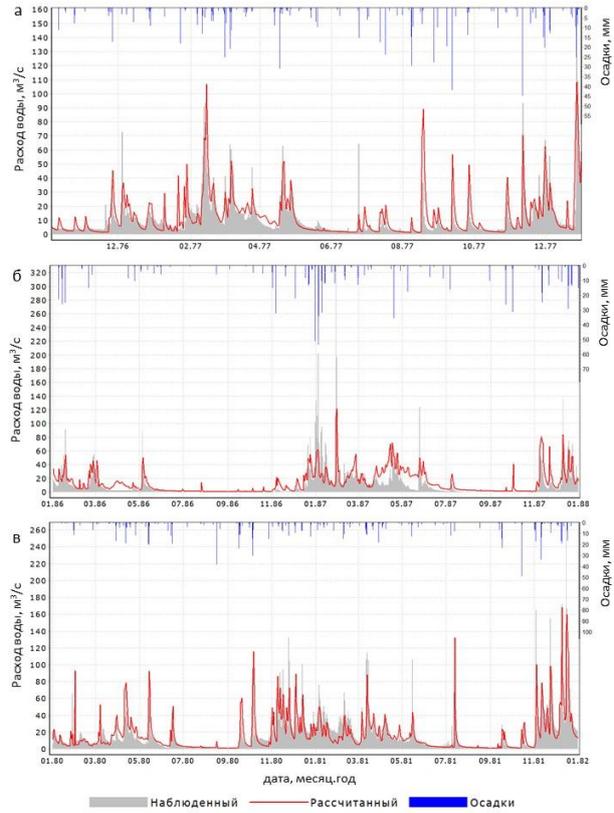


Рисунок 13 Суточные рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Туапсе – г. Туапсе, м³/с: а, б, в – примеры высокого, среднего и низкого значения NS.

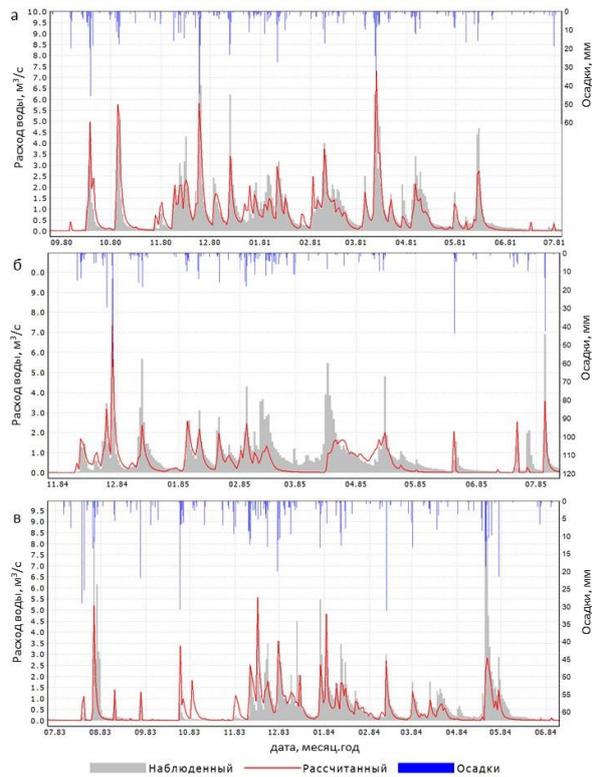


Рисунок 14 Рассчитанный и наблюдаемый гидрографы стока р. Куапсе – Мамедова Щель, м³/с; а – высокое значение NS, б – низкое значение NS, в – среднее значение NS.

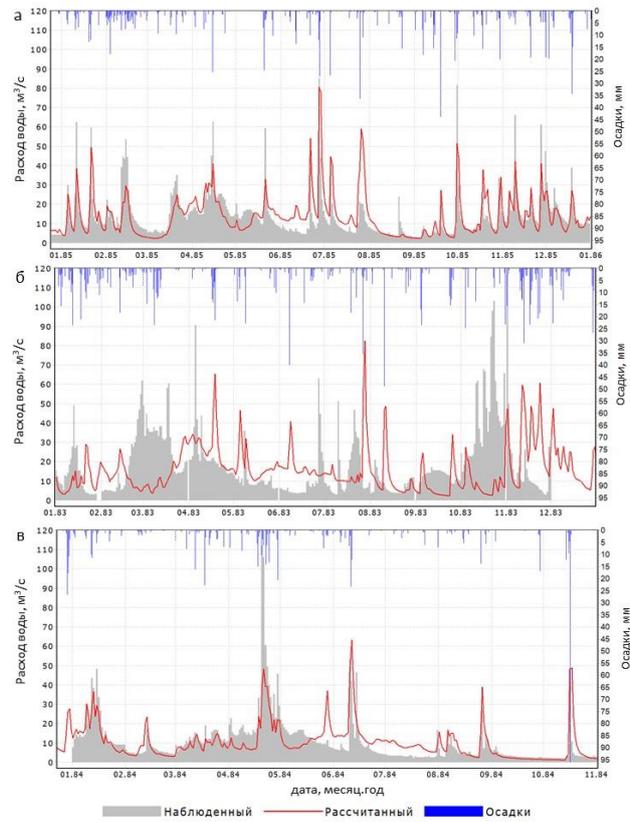


Рисунок 15 Рассчитанный и наблюдаемый гидрографы стока р. Сочи - с. Пластунка, м³/с; а – высокое значение NS, б – низкое значение NS, в – среднее значение NS.

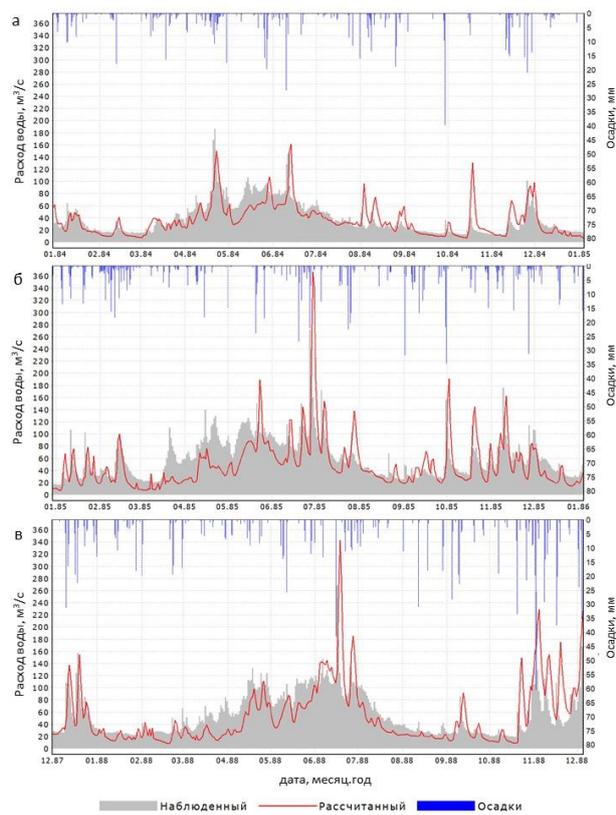


Рисунок 16 Рассчитанный и наблюдаемый гидрографы стока р. Мзымта – пос. Казачий Брод, м³/с; а – высокое значение NS, б – низкое значение NS, в – среднее значение NS.

В целом, результат моделирования можно признать удовлетворительным. Ливневые осадки, результатом которых становятся экстремальные паводки, очень локальны, а сеть осадкомерных пунктов редка и в основном приурочена к населенным пунктам на побережье Черного моря России. Таким образом, водосборы малых горных рек исследуемого региона практически не освещены метеорологическими данными, необходимыми как для калибровки параметров простых сосредоточенных емкостных гидрологических моделей, так и верификации сложных распределенных детерминированных моделей формирования стока на основе использования стандартных критериев. Среди преимуществ указаны следующие важные свойства распределенных детерминированных моделей: 1) учет пространственного распределения осадков (что, например, может быть перспективным для сопряжения с распределенными климатическими моделями); 2) возможность численных экспериментов, обоснованных априорной оценкой параметров вместо калибровки (Макарьева и др., 2018в).

3.2 Апробация методики расчета характеристик максимального стока для малых рек Черноморского побережья

Территория Черноморского побережья России характеризуется повышенным риском прохождения опасных природных явлений, в первую очередь, катастрофических паводков, сформированных выпадением ливневых осадков. В последние годы количество и величина паводков возросли, наиболее значительными среди них оказались события 2002, 2010, 2012-2015 гг. (Воробьев и др., 2003; Панов и др., 2012; Колтерманн и др., 2012). Высокая плотность населения, интенсивное использование земель в целях сельского хозяйства, развитая промышленность и инфраструктура региона, его туристическая привлекательность увеличивают риски материальных потерь и человеческих жертв в экстремальных ситуациях.

Моделирование выдающихся паводков на р. Туапсе с использованием данных плювиографов. Численные эксперименты с осадками. Автором были собраны данные плювиографов для метеорологических станций Горный и Туапсе за период 1980-1992 и 1997-2011 (Метеорологический ежемесячник, 1986) (Рис. 17). Данные были осреднены до равномерного часового интервала и использованы для моделирования отдельных выдающихся паводков на р. Туапсе в 1991, 2005 и 2010 годах.

1991 год. Исторический паводок на р. Туапсе был зафиксирован 1 августа 1991 года, когда среднесуточный и срочный расходы воды были оценены по меткам высоких вод как 635 и 2300 м³/с соответственно (Панов и др., 2012). Результатом ливневых осадков и выхода смерчей на берег стало резкое повышение уровня воды и формирование катастрофического селевого потока (Шныпарков и др., 2013).

По данным плювиографов на станциях Горный и Туапсе общее количество осадков за период с 1.40 ночи до 8.30 утра 1 августа 1991 года составило 148,1 и 65 мм соответственно. Средние и максимальные значения интенсивности осадков достигли 0.62 и 1.47 мм/мин для станции Горный и 0.17 и 1.17 мм/мин – для станции Туапсе.

Было проведено моделирование паводка с использованием данных плювиографов (Табл. 8, 1 вариант). Общий рассчитанный суточный слой осадков для всего водосбора с учетом высотного градиента составил 155 мм, что практически совпадает с наблюдаемым суточным слоем стока 156 мм (согласно опубликованному суточному расходу) (Рис. 18).

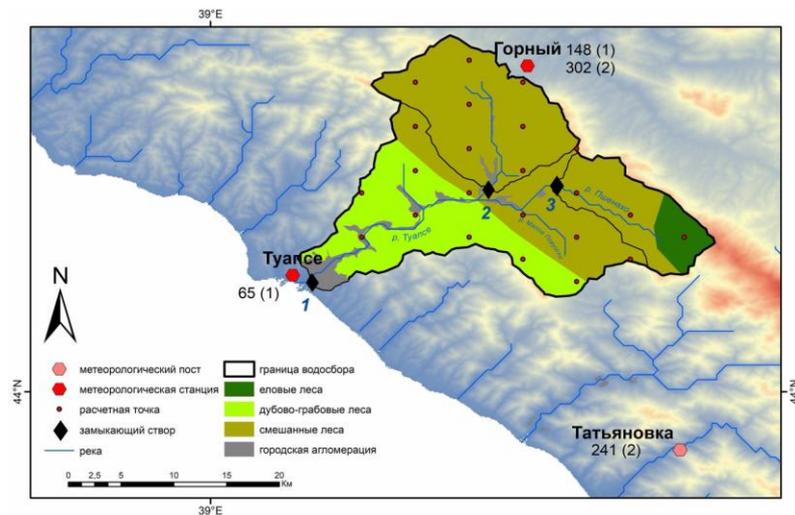


Рисунок 17 Схема бассейна р. Туапсе и распределение стокоформирующих комплексов; 1 – р. Туапсе – г. Туапсе; 2 – р. Туапсе – выше устья р. Пшенахо; 3 – р. Пшенахо – выше с. Анастасиевка. Около метеостанций указано количество осадков (мм), выпавших в паводок 1991 г. по данным (1) – метеорологических ежемесячников; (2) – В.Д. Панова и др. (2012)

Таблица 8 Рассчитанные и наблюдаемые величины расходов воды и слоев стока катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе

Дата	Рассчитанный					Наблюденный			
	Q1h	Qd	Pd	Hd	M	Qa	Qd	Hd	M
01.08.1991 (1 вариант)	890 390* 180**	182	155	45	2.54 3.55* 3.07**				
01.08.1991 (2 вариант)	4200 1470* 820**	600	242	148	12.0 13.4* 14.0**	2300 870* 1475**	635	156	6.55 7.91* 25.2**
01.08.1991 (3 вариант)	1680 380* 590**	250	180	62	4.79 3.46* 10.1**				
17.06.2005	1316	191	206 (17-18.06)	82 (17-18.06)	3.75	-	-	-	-
16.10.2010	375	113	72	33	1.07	1630	579	142	4.64

где цифры со значком * – р. Туапсе выше устья р. Пшенахо (створ 2 на рис. 1), цифры со значком ** – р. Пшенахо выше с. Анастасиевка (створ 3 на рис. 1). Q1h – 1-часовой расход воды, $\text{м}^3 \text{с}^{-1}$; Qd – суточный расход воды, $\text{м}^3 \text{с}^{-1}$; Pd – суточный слой выпавших осадков, мм; Hd – суточный слой стока, мм; M – модуль стока срочного расхода воды, $\text{м}^3 \text{км}^{-2} \text{с}^{-1}$; Qa – срочный расход воды, $\text{м}^3 \text{с}^{-1}$

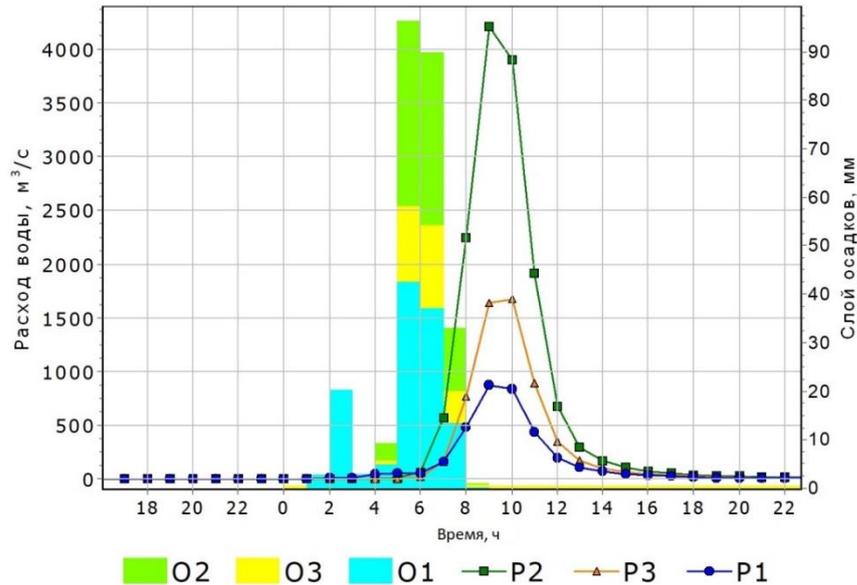


Рисунок 18 Результаты моделирования выдающегося паводка на р. Туапсе, 31 июля - 1 августа 1991 г.; O и P 1, 2, 3 – рассчитанные слои осадков и гидрографы паводкового стока для вариантов расчета 1-3 (расчетный шаг 1 час)

Максимальный рассчитанный 1-часовой расход воды составил $890 \text{ м}^3/\text{с}$, суточный – $182 \text{ м}^3/\text{с}$, рассчитанный слой стока за сутки – 45 мм . Таким образом, рассчитанные величины расходов воды оказались в три и более раза ниже наблюдаемых. Вычислялось также распределение элементов водного баланса – согласно результатам моделирования, после длительного бездождевого периода потери на насыщение почвы влагой составили 82 мм , суммарные потери на испарение с почвенного покрова и емкости перехвата растительностью 7 мм , приток в подземные и почвенные стоковые элементы составил около 18 мм (Табл. 8). Модельные эксперименты с количеством выпавших осадков показывают, что для формирования паводка наблюдаемой величины количество осадков должно быть в два раза больше.

В.Д. Панов и др. (2012) приводят дополнительную информацию о паводке 1991 года. Во-первых, они сообщают, что основной объем паводка был сформирован левобережными притоками, рр. Пшенахо и Малое Псеушхо. Во-вторых, в (Ткаченко, Волосухина, 2013) приводятся суммы осадков 1 августа для метеорологического поста Татьянаовка (96 м) – 241 мм и на водомерном посту с. Горное на реке Пшиш – 302 мм . Таким образом, расхождения данных о величине осадков на двух пунктах наблюдений (метеорологическая станция Горный и гидрологический пост с. Горное), находящихся в одном поселке, составляют около 100% .

Автором были проведены два дополнительных варианта расчета с использованием данных об осадках, описанных выше. Во втором варианте были использованы данные поста Татьянаовка (241 мм) и с. Горное (302 мм). В третьем варианте дополнительно к исходным данным плювиографов использовалась сумма осадков на посту Татьянаовка. Рассчитанные слои осадков

и стока за паводок составили 242/148 для второго и 180/62 мм для третьего вариантов. Срочный и суточный расход р. Туапсе в створе г. Туапсе составили 4200/600 и 1680/250 м³/с соответственно. В (Ткаченко, Волосухина, 2013) приводятся оценки для створов р. Туапсе выше устья р. Пшенахо и р. Пшенахо выше с. Анастасиевка (створы 2 и 3 на Рис. 17). Площади водосборов этих створов определены ориентировочно по описаниям положения постов и картам и составляют 110 и 58.6 км². Результаты расчетов максимальных расходов воды по трем вариантам входных данных об осадках для створов 2 и 3 также представлены в Табл. 8 и на Рис. 18.

Таким образом, третий вариант распределения осадков позволяет воспроизводить максимальные расходы, близкие к значениям, определенным по меткам высоких вод.

2005 год. 17-18 июня 2005 года на метеостанции Горный было зафиксировано рекордное количество осадков – за 13 часов выпало 291 мм осадков, средняя и максимальная интенсивность их выпадения составила 0.36 и 1.90 мм/мин. В те же сутки в течение 6,5 часов на метеостанции Туапсе выпало 48.8 мм осадков. В следующие дни осадки продолжались и суммарно за период 17-24 июня составили 444 мм и 81.5 мм для метеостанций Горный и Туапсе соответственно.

В период 1997-2008 гг. наблюдения за расходами воды на гидрологическом посту р. Туапсе не проводились. Таким образом, неизвестно, насколько локальны были выпавшие 17 июня осадки, а также какой величины паводок они вызвали. Однако, в ночь с 21 на 22 июня 2005 года был зафиксирован сход селевого потока на железнодорожное полотно в районе разъезда Водопадный Северо-Кавказской железной дороги на участке Туапсе-Сочи, который был обусловлен выпадением в предшествующий период большого числа осадков (Колтерманн и др., 2012).

На Рис. 19 приводится график рассчитанного гидрографа стока, элементов водного баланса и переменных состояний бассейна р. Туапсе за период 16–21 июня 2005 года. Максимальные рассчитанные 1-часовой и суточный расходы воды 17 июня 2005 года достигли соответственно 1316 и 191 м³/с. Согласно результатам моделирования, количество выпавших на водосбор осадков в период 17-18 июня составило 206 мм, слой стока – 82 мм (Табл. 8).

2010 год. 15-18 октября 2010 г. в Краснодарском крае произошло крупное наводнение, вызванное мощными проливными дождями и подъемом уровня рек Черноморского побережья. Особенно пострадал Туапсинский район, где было введено чрезвычайное положение. Сумма ущерба, по оценкам местных властей, составила около 2.5 млрд. рублей (<http://tass.ru/info/2071994>).

Для моделирования стока в этот период использовались метеоданные суточного разрешения, так как данных плювиографа для этих станций не оказалось.

16 октября на станциях Туапсе и Горный выпали 93.3 и 43.9 мм осадков соответственно. По данным (Панов и др., 2012) подъем уровня воды начался в 23 часа 15 октября, а максимальные

значения были достигнуты уже к 2-3 часам ночи 16 октября. Таким образом, можно предположить, что осадки выпали в течение нескольких часов. Был сформирован паводок, близкий по значениям к событию 1991 года. Наблюденные суточный и срочный расходы воды составили 579 (слой 142 мм) и 1630 м³/с соответственно (<https://gmvo.skniivh.ru>).

По данным (Ткаченко, Волосухин, 2013) значительные разрушения и подтопления домов начались гораздо раньше паводка на реках и были вызваны сильным склоновым стоком, сформированным ливнем очень высокой интенсивности. Склоновый сток способствовал сносу деревьев и кустарников в русла рек, в свою очередь карчеход вызвал заторные явления перед мостовыми переходами (<http://tass.ru/info/2071994>).

Расчет расхода паводка 16 октября 2010 г. на р. Туапсе проведен на основе суточных данных об осадках на метеорологических станциях Туапсе и Горный, но продолжительность их выпадения принята равной два часа со средней интенсивностью 0.4 и 0.2 мм/мин.

Средний по водосбору рассчитанный слой осадков составил 56 мм. Рассчитанные срочный и суточный расходы воды достигли 375 и 113 м³/с (Табл. 8, Рис. 20). Слой стока за сутки составил 28 мм, из них 8 мм – поверхностный. Таким образом, 16 октября наблюдаемый слой стока превысил слой осадков в два раза. На Рис. 21 представлен график сравнения суточных рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока. В период с января по май, рассчитанные и наблюдаемые величины совпадают удовлетворительно как по амплитуде, так и по фазе. Начиная с паводка 15-16 октября, наблюдаемые величины в несколько раз превышают рассчитанные. В целом за период с 1 октября по 31 декабря в бассейне р. Туапсе по расчетам выпали 531 мм осадков, наблюдаемый и рассчитанные слои стока за тот же период составили 1698 и 380 мм соответственно (Рис. 21). Значительное расхождение элементов водного баланса, а также факт отсутствия наблюдений за стоком в течение 2011 и 2012 годов, позволяет высказать предположение о возможной неувязке в опубликованных данных срочных и суточных расходах, а также всего периода наблюдений с 15 октября по 31 декабря 2010 года.

В работе (Belyakova, Gartsman, 2018) приводятся результаты моделирования суточных гидрографов стока бассейна р. Туапсе за теплый период на основе использования модели паводочного цикла Flood Cycle Model. Периоды калибровки и верификации модели в случае (Белякова, Гарцман, 2017) составили 7-8 лет, а величина NS для этих периодов указана как 0.72 и 0.59. Критерии NS для суточных расходов, полученные в настоящем исследовании, одного порядка с результатами (Belyakova, Gartsman, 2018).

В работах (Белякова и др., 2013; Христофоров и др., 2015) оцениваются результаты моделирования для 8 речных створов Черноморского побережья на основе использования региональной модели формирования стока, по словам самих авторов (Христофоров и др., 2015) представляющей набор регрессионных уравнений, параметры которых не имеют четкой

физической интерпретации, или модель «черного ящика». Регрессионная зависимость имеет 13 параметров. В работе (Христофоров и др., 2015), наборы параметров определены для каждой половины месяца, то есть для всего года требуются 24 набора по 13 параметров. Значение СКО, полученное в настоящем исследовании (модель Гидрограф) для р. Туапсе, составило 12.6; в Христофоров и др. (2015) – 14.2 м³/с.

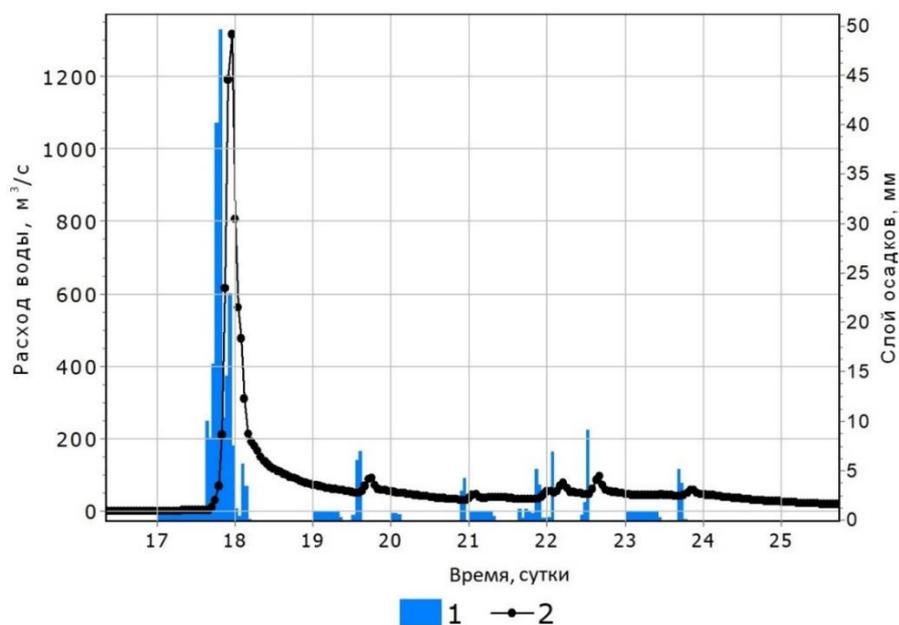


Рисунок 19 Результаты моделирования выдающегося паводка на р. Туапсе - 16-23 июля 2005 г. 1 – 1-часовые осадки (мм), 2 – рассчитанный 1-часовой гидрограф стока (м³ с⁻¹)

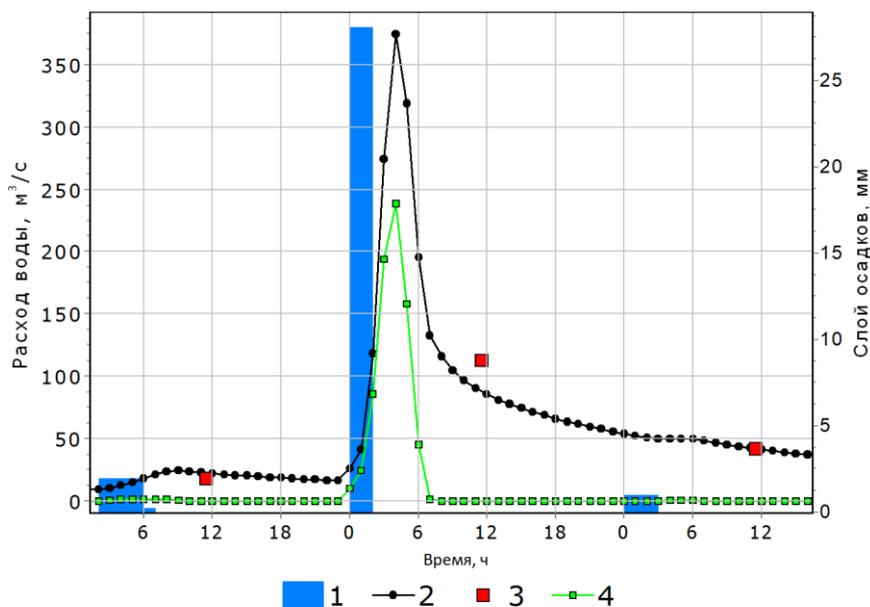


Рисунок 20 Результаты моделирования выдающегося паводка на р.Туапсе, 15 - 16 октября 2010 г. 1 – 1-часовые осадки (мм), 2 – рассчитанный 1-часовой гидрограф стока (м³/с), 3 - рассчитанный суточный гидрограф стока (м³/с), 4 - гидрограф поверхностного стока (м³/с)

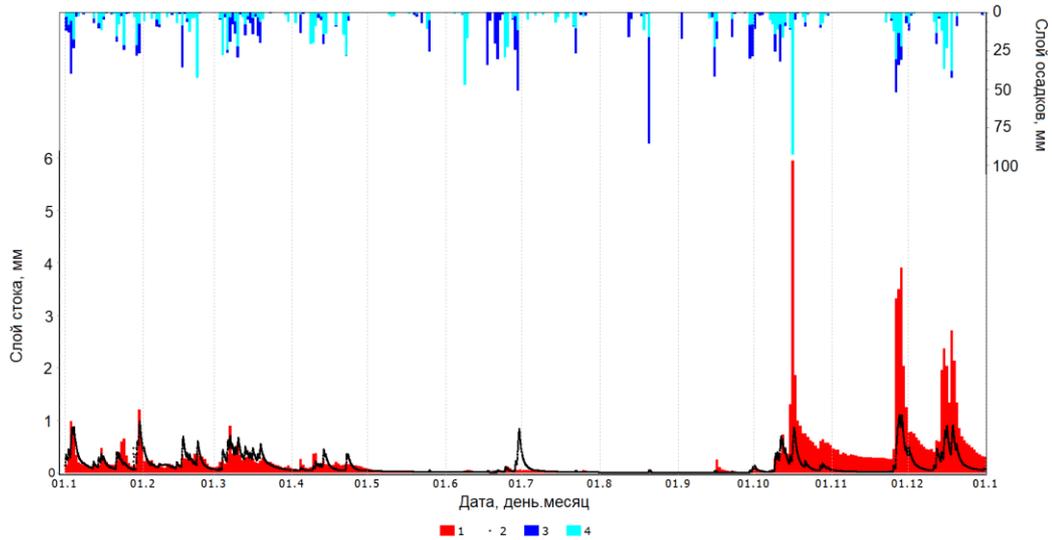


Рисунок 21 Осадки и сток в бассейне реки Туапсе (мм), 2010; 1 – наблюдаемый сток, 2 – рассчитанный сток, 3 – осадки на м/с Горный, 4 – осадки на м/с Туапсе

Результаты моделирования с использованием любых моделей в рассматриваемом регионе критически зависят от количества осадкомерных пунктов (Белякова и др., 2013). Однако не подтверждаются выводы (Христофоров и др., 2015) о преимуществах использования «простых» моделей перед сложными.

Достоинствами представленных результатов являются:

- 1) Продолжительный непрерывный период моделирования (в случае р. Туапсе – 48 лет, оценка критерия NS – 32 года) в течение круглого года без разделения на сезоны с единым набором параметров.
- 2) Учет пространственного распределения входных метеорологических данных.
- 3) Априорная оценка параметров. Разбор гидрометеорологической ситуации 2010 года показал несоответствие водного баланса катастрофического паводка по данным пунктов наблюдений сети Росгидромет, когда слой стока практически в два раза превысил слой наблюдаемых осадков. Не очевидно, как рассматриваются такие случаи и их влияние на величины параметров при калибровке параметров модели FCM и регрессионных зависимостей (Христофоров и др., 2015).

В целом, результаты исследования на примере р. Туапсе показывают, что гидрологическая модель «Гидрограф», при наличии метеорологических данных детального разрешения (например, данных плювиографов), может использоваться в задаче оценки срочных расходов воды на малых водосборах в случае отсутствия наблюдений (2005 год), или уточнения их величин, когда опубликованные данные о расходах могут носить неопределенный характер (случай 2010 года). Применение методов моделирования позволяет также проводить численные

эксперименты с входными метеорологическими данными в условиях их недостаточности (пример 1991 года).

На настоящий момент ограниченность данных об осадках не позволяет использовать методы моделирования для массовых расчетов рядов срочных расходов воды, однако имеющиеся в наличие данные плювиографов чрезвычайно полезны для анализа факторов формирования катастрофических паводков и совершенствования методов математического моделирования.

3.3 Пример использования методики оценки характеристик стока и водного баланса в задачах расчетов на неисследованных горных водосборах Черноморского побережья

Моделирование стока в бассейне неизученной реки Цемес (г. Новороссийск). Одним из этапов детерминированного моделирования стока для неизученного бассейна, в данном случае р. Цемес, является этап оценки адекватности гидрологической модели на изученных бассейнах, характеризующихся аналогичными условиями формирования стока. Трудность выполнения данного этапа в настоящем исследовании состоит в том, что бассейны исследуемого района значительно отличаются друг от друга соотношением элементов водного баланса. Например, в бассейне р. Дюрсо, расположенном ближе всех к бассейну р. Цемес, коэффициент стока составляет в среднем 0.37, в то время как для водосбора р. Адерба данная величина составляет 0.45, а для р. Вулан – 0.56. Таким образом, оценка степени репрезентативности изученных бассейнов для бассейна р. Цемес становится достаточно затруднительной.

Непрерывное моделирование стока в бассейне р. Цемес с суточным расчетным шагом было проведено за период 1977-2013 гг. по данным метеорологической станции Новороссийск (Рис. 22). Рассчитанные величины элементов годового водного баланса за период моделирования составили: осадки – 833, испарение – 503, сток – 330 мм (Табл. 7). Максимальный рассчитанный суточный расход достиг значения $86.4 \text{ м}^3/\text{с}$ в период катастрофического паводка, прошедшего 20 июня 1988 года. Паводок с суточным слоем стока 90.4 мм был сформирован ливневыми осадками, суммарная величина которых составила 188 мм. На Рис. 23 представлена кривая вероятности суточных максимальных расходов для р. Цемес, полученная на основе результатов моделирования (построение выполнено в программе HydroStatCalc – 2010 (Рождественский, 2010). Экстраполяция кривой позволяет оценить суточный расход 1% обеспеченности как $108 \text{ м}^3/\text{с}$, 0.1% – $183 \text{ м}^3/\text{с}$.

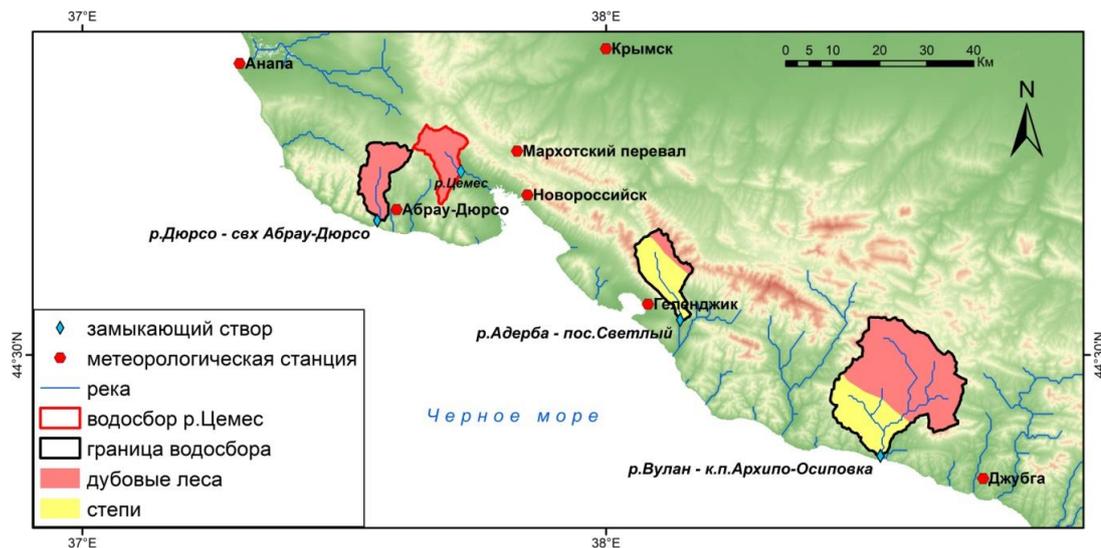


Рисунок 22 Объекты исследования и распределение стокоформирующих комплексов

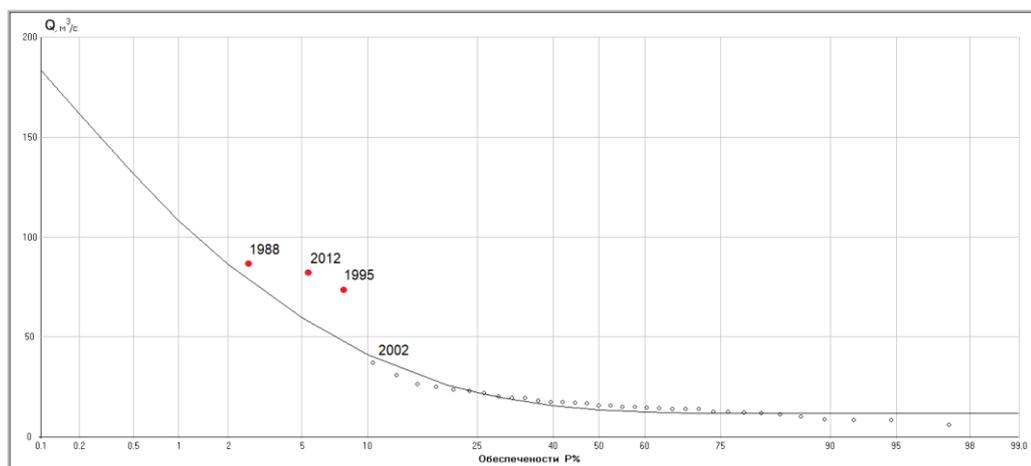


Рисунок 23 Кривая обеспеченности рассчитанных максимальных суточных расходов ($\text{м}^3/\text{с}$) для р. Цемес (красным отмечены паводки 1988, 2012 и 1995 года)

Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Цемес. Для расчета максимальных срочных расходов воды в бассейне р. Цемес в период прохождения катастрофических паводков 1988, 2002 и 2012 годов были использованы подробные данные плувиограмм ливневых осадков. За 19-20 июня 1988 г. данные плувиографа на станции Новороссийск были получены из метеорологического ежегодника и осреднены до равномерного часового интервала, для события 2002 года использовались данные соседних метеорологических станций Анапа и Джубга, данные за 6-7 июля 2012 года заимствованы из работы М.В. Болгова и Е.А. Коробкиной (2013).

20 июня 1988 г. Дожди большой интенсивности наблюдались 20 июня 1988 года, сопровождавшиеся прохождением нескольких смерчей. Плувиограф метеорологической станции Новороссийск зафиксировал в этот день выпадение 179.4 мм осадков в течение 4 часов 50 минут. Средняя интенсивность выпадения осадков составила 0.6 мм/мин, максимальная

достигала значения 2.3 мм/мин. Интересно, что по данным (Колтерманн и др., 2012) количество осадков на горной метеостанции Мархотский перевал не превысило 7 мм за тот же период наблюдения. Осадки 20 июня выпадали уже на увлажненную поверхность водосбора, т.к. в предшествующие трое суток выпало в сумме 97.6 мм осадков (19 июня – 24.7 мм, 18 июня – 24.5 мм, 17 июня – 48.4 мм), что усугубило масштаб паводка. Подтверждением этого является рассчитанная величина запаса воды на водосборе. На Рис. 24 видно, что за трое суток (17-19 июня) до наблюдения катастрофического расхода количество влаги в бассейне увеличилось более чем на 70 мм, а 20 июня ее количество достигло рекордных 355 мм. Таким образом, значительная часть выпавших осадков не смогла просочиться в почво-грунты и сформировала максимальный расход. Развитие паводка наблюдалось с 11 часов 20 июня. Расход воды в это время составил 61 м³/с. Своего максимума 1-часовой рассчитанный расход воды достиг в 13 часов и составил 688 м³/с (Рис. 24).

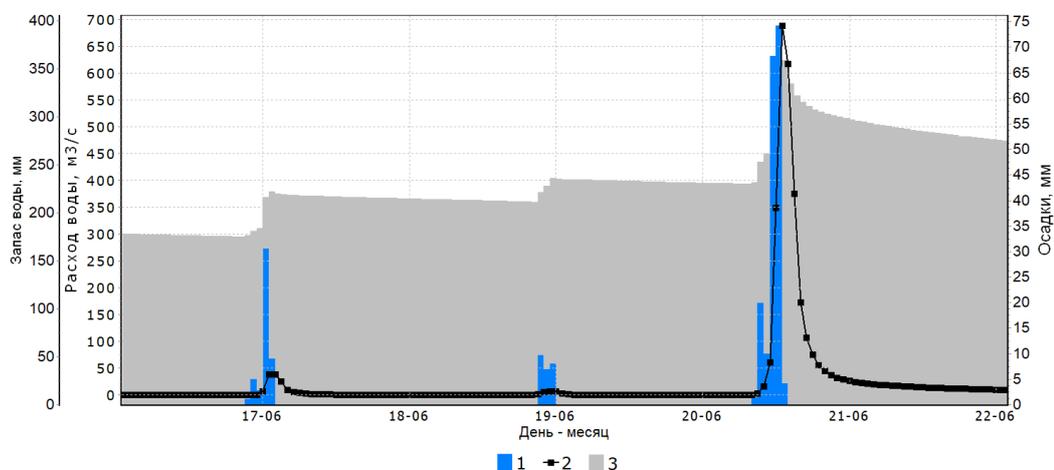


Рисунок 24 Развитие паводка 20 июня 1988 года, р. Цемес (г. Новороссийск) (расчетные данные): 1 – осадки, мм, 2 – рассчитанный 1-часовой расход воды, м³/с, 3 – запас воды в бассейне, мм

5-9 августа 2002 г. Еще один катастрофический паводок в районе г. Новороссийска наблюдался в период с 5 по 9 августа 2002 года. Согласно В.Д. Панову и др. (2012) в некоторые дни за 30-50 минут выпадало до 75 мм осадков. Также как и в случае 1988 года, ливневые осадки усугублялись смерчами, которые приносили на сушу дополнительное количество морской воды. В результате прохождения наводнения были затоплены железнодорожный узел станции Новороссийск, территории портов и много зданий, где уровень воды на первых этажах превышал полтора метра (Панов и др., 2012). Всего по данным МЧС г. Новороссийска было подтоплено 2940 домов, 183 разрушены. Общий ущерб составил 1.5 млрд. руб., число погибших достигло 58 человек (Панов и др., 2012).

Подробных данных об осадках 5-9 августа 2002 года на станции Новороссийск найдено не было, однако имеются плювиограммы осадков на ближайших станциях Анапа и Джубга. Суммарно за несколько дней на этих двух метеостанциях выпало 371 мм. Согласно Воробьеву и

др. (2003) количество осадков за тот же период в Новороссийске составило 362 мм, что равняется полугодовой норме. Суммарные данные об осадках на метеостанциях Анапа и Джубга были использованы для моделирования максимального расхода воды. Максимальный рассчитанный расход воды 7 августа 2002 года составил 284 м³/с (Рис. 25).

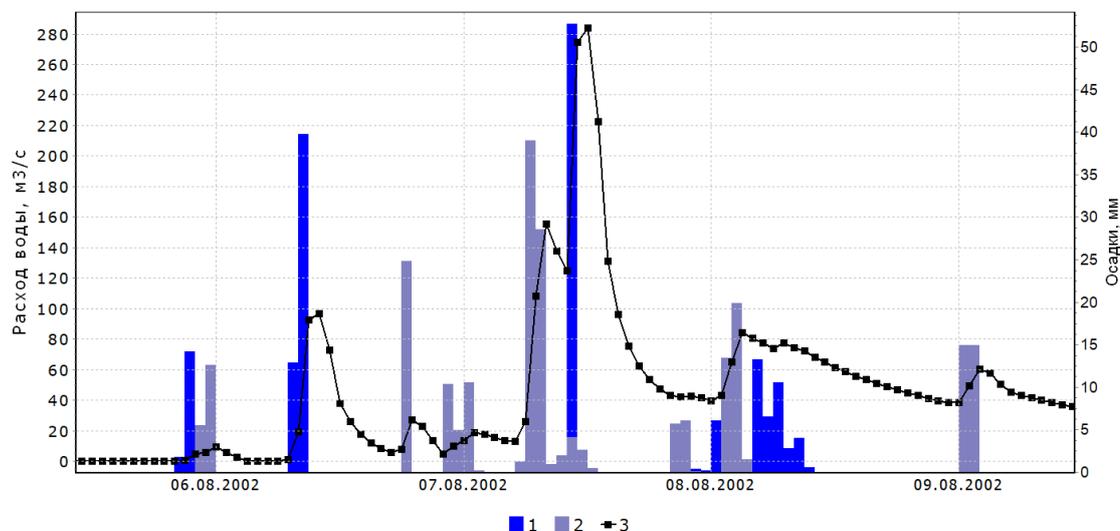


Рисунок 25 Развитие паводка 6-9 августа 2002 года, р. Цемес (г. Новороссийск); 1 – осадки на м/с Анапа, мм, 2 – осадки на м/с Джубга, мм, 3 – рассчитанный 1-часовой расход воды, м³/с

6-7 июля 2012 г. Осадки, охватившие 6-7 июля 2012 года Черноморское побережье на участке Геленджик – Новороссийск, а также Крымский и Абинский районы, не наблюдались ранее за всю историю инструментальных наблюдений. В результате катастрофического паводка в г. Крымске погибли более 170 человек, и был нанесен колоссальный материальный ущерб (Панов и др., 2012).

Согласно М.В. Болгову и Е.А. Коробкиной (2013) за сутки с 7 часов 6 июля по 7 часов 7 июля 2012 года на метеостанции Новороссийск был зафиксирован исторический максимум осадков 275 мм. Основной объем осадков, сформировавших катастрофический паводок, выпал с 22 часов 6 июля по 3 часа ночи 7 июля. В этот период интенсивность осадков достигала 35–45 мм в час (0.58-0.75 мм/мин), а их суммарное количество составило 157 мм. По результатам моделирования всего за два часа расход воды поднялся с 78 м³/с до своего максимального значения, которое составило 361 м³/с около 4 часов утра 7 июля (Рис. 26). Суточное распределение элементов водного баланса во время паводка составило: осадки – 156 и 158 мм, сток – 13 и 86 мм 6 и 7 июля соответственно. Более высокий по сравнению с 6 числом сток 7 июля обусловлен, как и в случае паводка 1988 года, тем, что почво-грунты достигли своей максимальной влагонасыщенности за время прохождения осадков 6 июля. Несмотря на то, что во время паводка 1988 года выпало в полтора раза меньше осадков, чем в 2012 году, более

высокие расходы воды в 1988 году являются результатом более высокой интенсивности выпадения осадков.

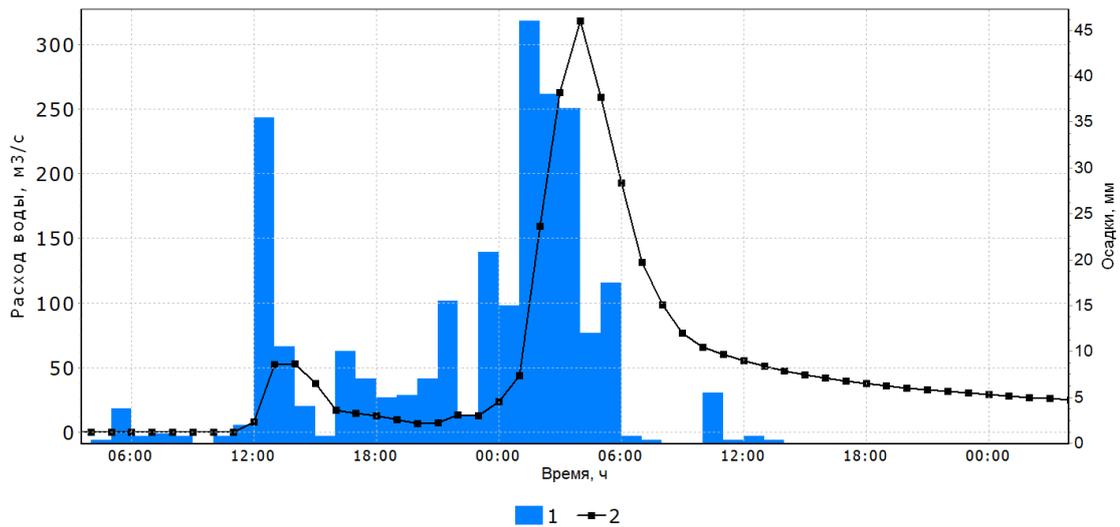


Рисунок 26 Развитие паводка 6-7 июля 2012 года, р. Цемес (г. Новороссийск); 1 – осадки, мм, 2 – рассчитанный 1-часовой расход воды, м³/с

Таким образом, на основе подробных данных о ходе ливневых осадков были промоделированы гидрографы трех катастрофических паводков 1988, 2002 и 2012 гг. на р. Цемес с 1-часовым временным разрешением. Рассчитанные максимальные расходы могут быть приняты за срочную величину расхода и составили 688, 284 и 361 м³/с соответственно (Макарьева и др., 2019б).

Несмотря на большее 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. Результаты моделирования указывают на необходимость учета состояния водосбора, предшествующего экстремальному гидрологическому событию, – именно уникальное сочетание стокоформирующих и метеорологических факторов определяют его величину. Это согласуется с концепцией метода вероятного максимального паводка (PMF).

Максимальные расходы воды паводков 2002 и 2012 годов, рассчитанные методом моделирования и составившие 284 и 361 м³/с, соответствует порядку величин расходов 1% обеспеченности, оцененных в работе Макарьевой и др. (2019б) согласно рекомендациям СП-33-101-2003 (2004) – 285 и 378 м³/с по редуциционной формуле и методу предельной интенсивности соответственно. Таким образом, расход 1% обеспеченности мог быть достигнут два раза за 11 лет. Однако модельный расход для паводка 1988 года, 688 м³/с, почти в два раза превышает расходы 1% обеспеченности, полученные по стандартной методике.

В условиях неопределенности климатических изменений и тенденции к изменению характеристик максимальных осадков, не наблюдаемых ранее, использование методов детерминированного моделирования может служить дополнением, а в будущем и альтернативой используемым в настоящее время методам расчета. А.Е. Асарин и А.Н. Жиркевич (2012) отмечают, что в настоящее время инструментом исследования поведения динамических систем в критических ситуациях может служить метод математического моделирования, который дает возможность получить аналог РМФ и использовать его при принятии инженерных решений.

3.4 Выводы

В Главе 3 представлены результаты апробации методики моделирования гидрографов стока воды с расчетным шагом менее суток и оценка характеристик максимального стока в бассейнах малых рек, характеризующихся формированием быстроразвивающихся ливневых паводков, на основе гидрологической модели «Гидрограф» (на примере рек Черноморского побережья Северного Кавказа):

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, 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.

2. Проведена оценка применимости гидрологической модели «Гидрограф» для расчета срочных максимальных расходов воды в бассейнах малых рек Черноморского побережья Кавказа 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. Данные плювиографов 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.

3. Для оценки максимальных расходов воды неизученной реки выбран бассейн р. Цемес (г. Новороссийск). 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 плувиограмм ливневых осадков на метеорологических станциях рассчитаны максимальные расходы воды трех катастрофических паводков на р. Цемес в 1988, 2002 и 2012 гг. 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.

Глава 4. Разработка методики параметризации гидрологической модели «Гидрограф» в бассейнах горных рек северной криолитозоны на основе краткосрочных данных специальных наблюдений. 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)

Наименее изученной территорией криолитозоны России является Северо-Восток. Это связано с удаленностью и труднодоступностью региона. В то же время регион характеризуется значительным ресурсным потенциалом, необходимым для развития нашей страны. В условиях изменения климата, наиболее ярко выраженного на территории распространения многолетнемерзлых пород (Оценочный доклад..., 2008; Madsen et al., 2013; Holmes et al., 2012), а также при наблюдаемом сокращении гидрометеорологической сети, разработка методики параметризации, верификации и апробации модели для расчета водного баланса и прогноза изменений характеристик стока, в том числе неизученных горных водосборов, является актуальной задачей.

Первые научные работы, посвященные изучению Северо-Востока Сибири, проводились участниками экспедиций в XIX-XX вв. с целью изучения ресурсов территории и описания географических условий местности (Миддендорф, 1862). Климатические, мерзлотные и гидрогеологические условия территории Северо-Востока изучались П.Ф. Швецовым (1951), Н.А. Граве (1959, 1960, 1964), М.М. Корейшей (1957,1963), О.Н. Толстихиным (1970), Н.П. Анисимовой и др. (1975), В.Е. Афанасенко и др. (1975), И.А. Некрасовым (1976), Н.Н. Романовским (1983), М.К. Гавриловой (1998), В.Р. Алексеевым (1978, 1987, 2005), В.В. Шепелевым (1987, 2011) и другими учеными.

Подробные гидрологические изыскания на Северо-Востоке начались в начале 30-х гг. XX в. силами ленинградского Гипротода и Дальстроя. Исследованиями гидрологического режима территории занимались такие известные гидрологи как А.М. Догановский (1968), А.Г. Левин (1959), В.М. Пигузова (1966), В.С. Власенко (1961), Б.Л. Соколов (1989), Н.А. Букаев (1966), В.М. Лебедев (1969), Н.Н. Романовский (1983, 2009) и многие другие. С 1948 по 1997 гг. в верховье р. Колымы функционировала Колымская водно-балансовая станция (КВБС). Организацией станции занимался руководитель гидрометслужбы «Дальстроя» Л.Н. Морозов. Также непосредственное участие в организации станции принимали гидрологи А.Г. Левин и А.С. Кузнецов (позднее). В период работы КВБС накоплен огромный материал

гидрометеорологических и специальных наблюдений, характеризующие природные условия и процессы, происходящие в зоне распространения многолетней мерзлоты (Кузнецов, 1966; Рейнюк, 1959; Кузнецов и Насыбулин, 1969; Бояринцев, 1980; Бояринцев, 1988; Бояринцев и др., 1991; Бояринцев и др., 1992; Банцекина, 2001; Сущанский, 2002; Банцекина, 2002, 2003; Банцекина и Михайлов, 2009).

В настоящее время основное внимание при изучении гидрологического цикла рассматриваемой территории уделяется влиянию изменения климата на гидрологические характеристики рек Северо-Востока (например, Алексеевский и др. (2015), Rawlins et al. (2009), Shiklomanov et al. (2007), Георгиади и Кашутина (2016), Magritsky et al. (2013), Georgievsky (2016) и многие другие).

4.1 Параметризация и верификация гидрологической модели «Гидрограф» на основе краткосрочных данных специальных наблюдений на станции Сунтар-Хаята

Параметризация модели. В условиях крайней недостаточности данных наблюдений на Северо-Востоке привлечение данных полевых наблюдений для параметризации гидрологических моделей показало свою эффективность, даже, если такие наблюдения ограничены по времени (Nesterova и др., 2021).

Примером может являться Высокогорная станция Сунтар-Хаята, которая функционировала в период 1957–1959 гг. в бассейне р. Сунтар в рамках программы Международного геофизического года (Рис. 27). В исследовании использованы отчетные материалы комплексных наблюдений на Высокогорной станции Сунтар-Хаята из архива Института Мерзлотоведения СО РАН в Якутске. В качестве объекта исследования принят водосбор р. Сунтар – устье р. Сахарыньи (приток р. Индигирки, площадь 7680 км²) с наличием данных наблюдений за стоком (Nesterova и др., 2021).

Территория исследования относится к зоне сплошного распространения многолетней мерзлоты, ее мощность под водоразделами составляет 400-600 м, под речными долинами – 200-300 м (Геокриология СССР, 1989).

Высокие пики хребта Сунтар-Хаята (г. Мус-Хая, 2959 м) сочетаются с расчленением их склонов речными долинами. Средняя высота водосбора р. Сунтар составляет 1410 м, достигая максимальной отметки в 2794 м.

Климат исследуемого района резко континентальной с наличием высотной поясности и температурных инверсий. Среднегодовая температура составила -13.8 и -14.1 °С (в июле – 6.4 и 17.5 °С, в январе – -28.0 и -39.6 °С) на станциях Сунтар-Хаята (2068 м) за период 1957-1964 гг. и Агаякан (776 м) за 1957-2012 гг. соответственно.

Снежный покров устанавливается на хребте в сентябре. В зимний период сток отсутствует. Наибольший сток приходится на летние месяцы. В среднем начало половодья приходится на третью декаду мая. В бассейне р. Сунтар, сложенном почво-грунтами с низкой инфильтрационной способностью, роль подземного стока небольшая (Граве и др., 1964).

В истоках р. Сунтар находится ледник № 31 площадью 8.48 км², что составляет 0.11% территории водосбора. Ледниковый сток в районе исследования может превышать 3.8% суммарного годового стока и достигать 6.1% стока за июль и август, как, например, в соседнем бассейне р. Агаякан, где ледники занимают площадь более 1.35% (Лыткин, 2016). В последние десятилетия отмечается устойчивая тенденция сокращения оледенения хребта Сунтар-Хаята (Лыткин, 2016).

Отличительной чертой района является распространение наледей, которые формируются на горных хребтах, в предгорных и межгорных впадинах (Makarieva et al., 2019a; Макарьева и др., 2019г). Для бассейна р. Сунтар наледность достигает 0.5%, а участие наледных вод в формировании годового речного стока оценивается около 7%. Наиболее существенен приток воды от таяния наледей в мае-июне (Соколов, 1975).

Широкое распространение на склонах Сунтар-Хаяты получили многолетние снежники (Ресурсы поверхностных вод..., 1969) и каменные глетчеры, которые, наряду со льдом деятельного слоя и непосредственно летними атмосферными осадками, могут являться важным источником питания местных рек, однако в этом отношении они исследованы недостаточно (Жижин и др., 2012; Лыткин, 2016).

Параметризация модели «Гидрограф» проводилась на основе совместного анализа гидротермического режима почвогрунтов и закономерностей стокоформирования в типичных ландшафтах (Макарьева и др., 2019в, 2020).

Согласно описанной в материалах наблюдений высотной ландшафтной поясности водосбор р. Сунтар разбит на четыре стокоформирующих комплекса (СФК) (Nesterova и др., 2021) (Рис. 28). Для каждого СФК разработана схематизация вертикального почвенно-растительного профиля, учитывающая состав грунта, растительность, процессы снегонакопления и стокоформирования (Рис. 29, Табл. 9).

Гольцовый комплекс расположен в высотной зоне 1900-2700 м (средняя высота 2040 м), его доля составляет 7% от площади водосбора р. Сунтар.

Почвенный профиль комплекса сложен крупнообломочными щебнем аргиллитов (удельный вес 2920 кг/м³) с примесью суглинистого материала, сцементированных льдом и включающим прослой чистого льда до 2 м толщины. Растительность отсутствует. Щебень представляет собой разрушенные морозным выветриванием ледниковые валуны и делювий склонов долины. Глубина сезонного протаивания почво-грунтов в пределах гольцового

комплекса на высотных отметках более 1700 м колеблется от 55 до 75 см (Граве и др., 1964). Для верхнего слоя делювия характерна незначительная влажность и малозаметные колебания ее содержания в течение теплого сезона, несмотря на значительное количество осадков и неравномерность в их выпадении. Это объясняется хорошими фильтрационными способностями щебнистых грунтов. Не испарившаяся влага легко просачивается в глубину и стекает по мерзлому водоупору. Неудачный опыт сооружения стоковой площадки показал, что водоупор представляет сложную поверхность благодаря наличию глубоких трещин и пустот, хотя и имеющих отрицательную температуру, но не заполненных льдом (Граве, 1959).

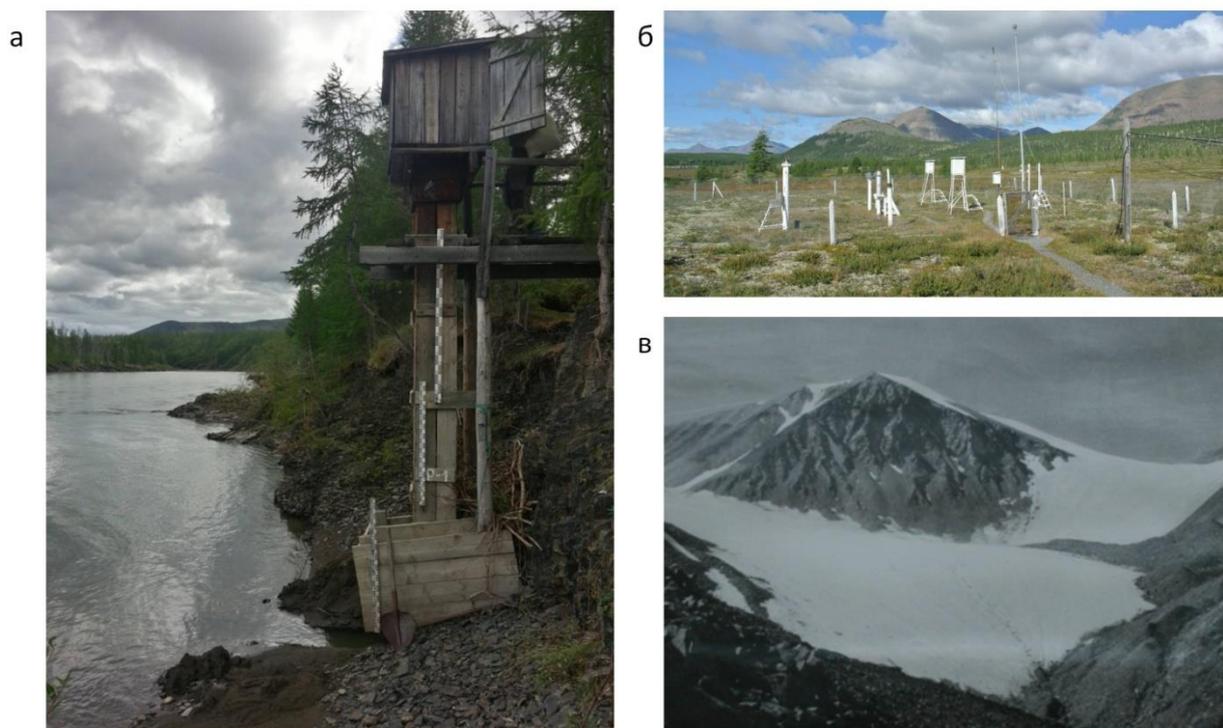


Рисунок 27 Бассейн реки Сунтар: а) гидрологический створ р.Сунтар - устье р. Сахарыньи; б) метеостанция Восточная (фото О. Макарьевой); в) гольцы вблизи станции Сунтар-Хаята (Граве, 1959)

Пояс горной тундры соответствует высотам 1450-1900 м (средняя высота 1630 м) и занимает 37% бассейна. Он характеризуется распространением сомкнутого и угнетенного травянисто-мохового покрова с кустарничками. Верхний 10-сантиметровый слой профиля горной тундры составляет моховой покров, под которым залегает горная порода с включениями загрязненного льда. Сезонно-талый слой в горной тундре составляет 80-90 см.

Тайга (1100-1450 м, средняя высота – 1310 м) состоит из разреженного лиственничника на северных склонах и густых лиственничных лесов на южных склонах и занимает 42% площади водосбора.

Заболоченные редколесья и луговые болота приурочены к долинам и поймам рек (828-1100 м, средняя высота 1060 м) и занимают 14%.

Отличительной чертой лиственничной тайги и поймы на заболоченных грунтах является наличие торфяного горизонта, который находится под моховым покровом и распространяется до глубин 20 и 40 см соответственно. Данный слой характеризуется низкими теплопроводными свойствами, повышенной пористостью и водоудерживающей способностью. Глубина сезонного протаивания изменяется в пределах 85-150 см в тайге и 30-115 см в долинах и поймах рек.

Для моделирования вся площадь водосбора покрыта регулярной гексагональной сеткой, узлами которой стали 32 репрезентативные точки (РТ). Из них 3 точки соответствуют гольцовому комплексу, 11 – тундре, 13 – тайге и 5 – заболоченным редколесьям и луговым болотам.

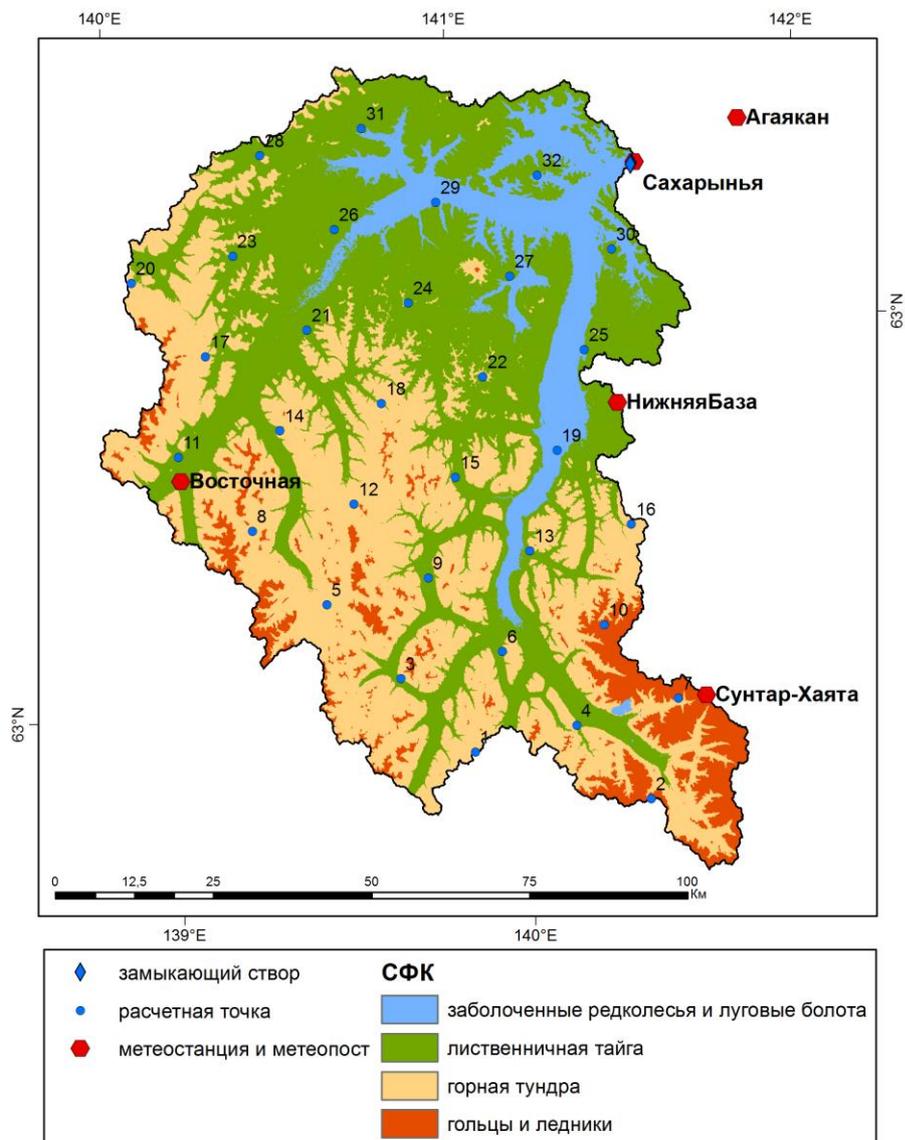


Рисунок 28 Схема бассейна р. Сунтар и распределение стокоформирующих комплексов

В предположении, что процессы формирования стока в горных районах верховьев р. Колымы и в бассейне р. Сунтар схожи, параметры для СФК тайги, заболоченных редколесий и луговых болот были заимствованы из работы О.М. Макарьевой и др. (2020), в которой использовались данные Колымской водно-балансовой станции для их определения (Lebedeva et al., 2014; Лебедева, 2018; Makarieva et al., 2018).

Таблица 9 Почвенные параметры

Параметры модели	Значение параметра (мин/макс)
Толщина, см	10/10
Плотность, г/см ³	0.5/2.5
Пористость, м ³ /м ³	0.9/0.3
Максимальная водоудерживающая способность, м ³ / м ³	0.6/0.1
Влажность завядания, мм	0.15/0.03
Коэффициент фильтрации, мм/ мин ⁻¹	1/0.5
Удельная теплоемкость, ДЖ (кг°С) ⁻¹	1930/780
Удельный коэффициент теплопроводности, Вт/(м °С) ⁻¹	2/0.8
Гидравлический параметр, м ³ /с	<u>Активный слой</u> Верхний органический слой: 10 Нижний минеральный слой: 0.005

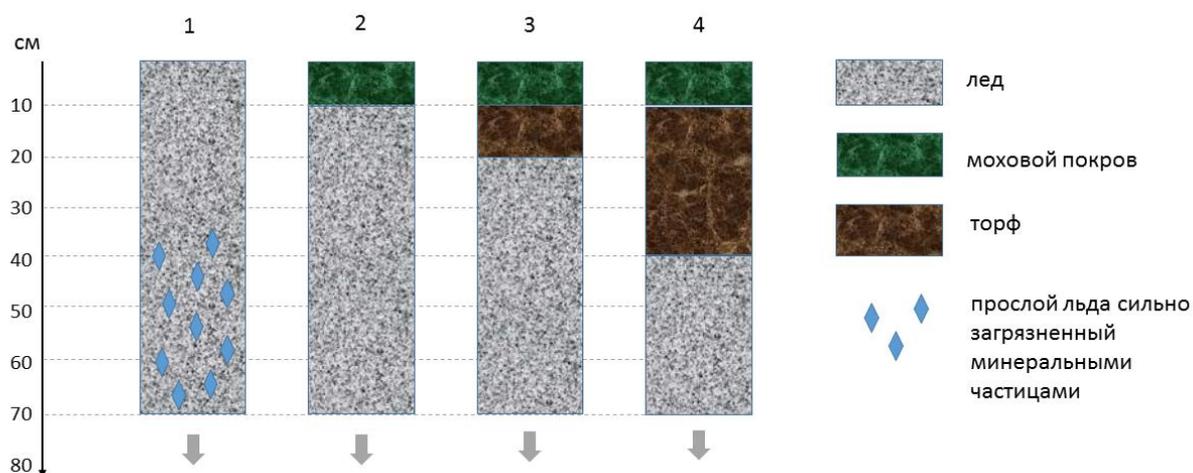


Рисунок 29 Почвенная колонка основных СФК

Подготовка входной метеорологической информации. В качестве входной метеорологической информации для моделирования задаются суточные значения температуры и влажности воздуха, количества осадков для каждой станции в пределах или вблизи водосбора (Nesterova и др., 2021). На основе данных (Справочник по климату СССР, 1968) автором построены зависимости увеличения количества осадков с высотой для теплого (май–август) и холодного (сентябрь–апрель) периодов года (Рис. 30). Годовое количество осадков на станции Сунтар-Хаята более чем в два раза превышает количество осадков, выпадающих в предгорьях. Градиент количества осадков в диапазоне высот 777–1350 и 1350–2068 м составляет 7 мм (5–7 %) и более 35 мм (15–16%) на 100 м соответственно. На основе данных снегомерных съемок Н.А.

Граве и М.М. Корейша (1957) показали, что в среднем за 1957–1959 гг. между высотами 2068–2257 и 2257–2477 м над ур. моря градиенты увеличения осадков с высотой устойчивы и составили 35 (5–8 %) и 30 (4–5 %) мм на 100 м соответственно. Количество твердых осадков на высоте 777 м составляет около 25 % от годовой суммы, на высоте 2068 м – около 60 %. При линейной экстраполяции по этим двум точкам процентное содержание твердых осадков на высоте 2900 м достигает 90% от годовой суммы (Граве, Корейша, 1957).

В среднем за период 1957–1964 гг. годовое количество осадков на станции Сунтар-Хаята по показаниям осадкомера составило 555 мм. Однако, в Справочнике по климату СССР (1968) рекомендуется введение поправок на ветровой недоучет и смачивание прибора, достигающих значений 1.7 (в среднем 1.6) для твердых и 1.3 (в среднем 1,16) для жидких осадков, что приводит к оценкам годового количества осадков на высоте 2068 м в 688 мм (Справочник по климату СССР, 1968) и 800 мм на вершинах хребтов (Васильев, Торговкин, 2002).

При интерполяции температуры и дефицита влажности воздуха учитывался годовой ход градиента обеих величин с высотой. Среднемесячные годовые градиенты температуры и дефицита влажности воздуха, рассчитанные по данным метеостанции Сунтар-Хаята (2068 м) и Агаякан (776 м) изменяются от +1.1°C и +0.01 мБ на 100 м в январе до -1.3°C и -0.35 мБ на 100 м в июне (Nesterova и др., 2021).

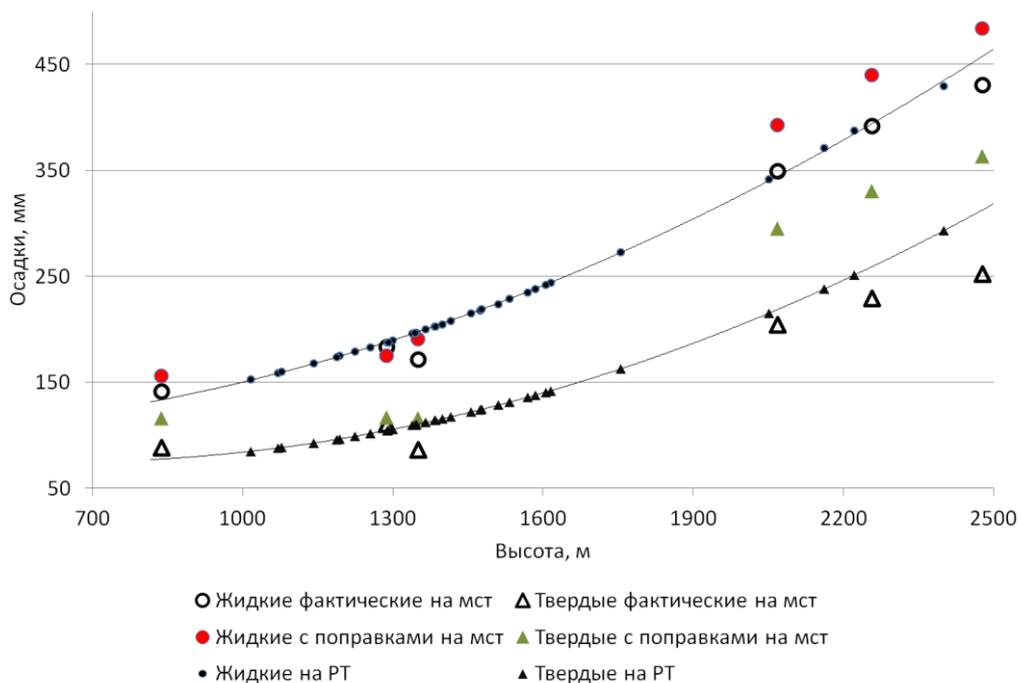


Рисунок 30 Распределение осадков с высотой, хребет Сунтар-Хаята

Моделирование переменных состояний гольцового ландшафта. Площадка станции Сунтар-Хаята располагалась в гольцовом ландшафте в северном массиве хребта на высоте 2040 м в сквозной ледниковой долине. Здесь проводились различные наблюдения, в том числе

измерения температуры почвогрунтов на различных глубинах, наблюдения за снежным покровом и испарением. Эти данные были использованы нами для оценки и уточнения параметров, описывающих гольцовый комплекс (Макарьева и др., 2019в).

Температура почвы. Геотермические измерения производились на площадке Сунтар-Хаята в трех скважинах на глубинах от 10 см до 20 м. Моделирование температуры почвы с суточным расчетным интервалом на различных глубинах проведено с использованием теплофизических свойств почвогрунтов, обобщенных согласно материалам из отчетов Граве и Корейши (1959, 1957, 1960, 1963). Принятые значения среднего объемного веса грунта с пористостью 42% при естественной влажности, при полном насыщении пор льдом и в сухом состоянии равняются 1700, 1930, 1580 кг/м³ соответственно. Величина удельной теплоемкости частиц грунта в сухом состоянии составляет 840 Дж/кг^{°C}, а удельная теплопроводность 1.5 Вт/м ^{°C}.

Тепловой баланс почвы по слоям рассчитывается в модели «Гидрограф» в каждый расчетный интервал времени – ежедневно. Для верификации результатов расчета теплового баланса деятельного слоя были использованы наблюдаемые среднемесячные значения температуры грунта на нескольких горизонтах (до глубины 2 м) на площадке станции Сунтар-Хаята за 1958 год. Средние абсолютные отклонения рассчитанных месячных температур от наблюдаемых величин составили 1.4^{°C}, 1.5^{°C}, 1.1^{°C} и 0.6^{°C}, а их максимальные значения – +3.8^{°C} (июнь), +4.0^{°C} (ноябрь), +3.2^{°C} (июнь) и -1.6^{°C} (январь) на глубинах 5, 50, 100 и 200 см соответственно. В целом, рассчитанные и наблюдаемые величины температуры грунта на разных глубинах соответствуют друг другу (Рис. 31).

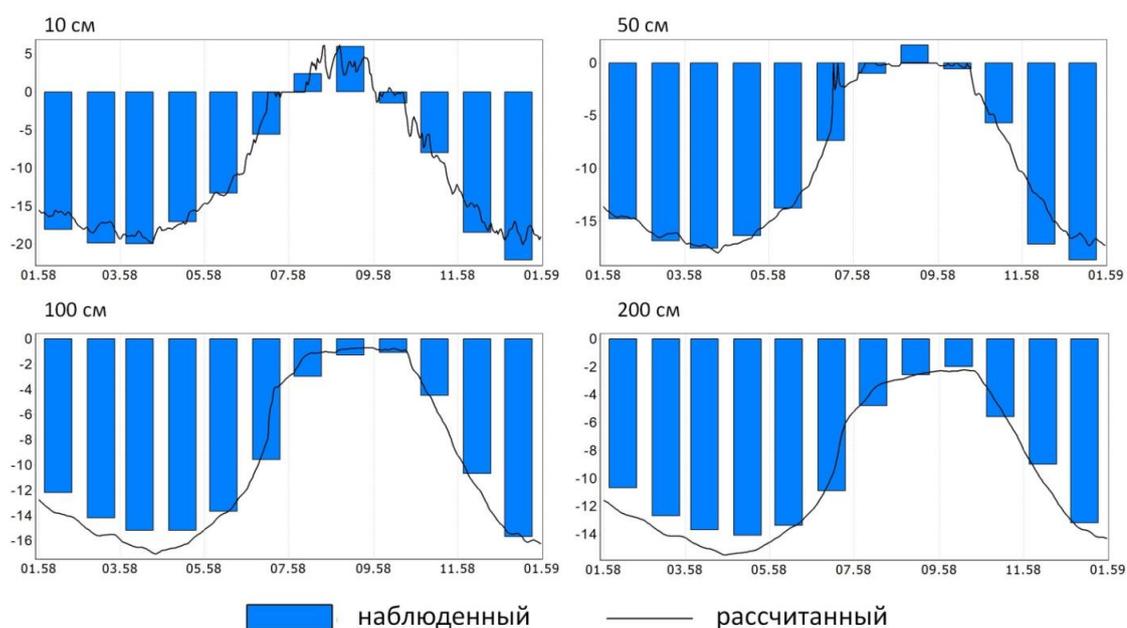


Рисунок 31 Рассчитанная и наблюдаемая температура почвы на заданных глубинах на станции Сунтар-Хаята

Снежный покров. Данные о высоте и запасах снежного покрова на площадке метеорологической станции Сунтар-Хаята использовались для верификации параметров модели «Гидрограф». Мощность снежного покрова измерялась по трем рейкам, установленным по углам треугольника со сторонами 12 м. Водный эквивалент рассчитывался по среднему значению мощности снежного покрова и объемному весу (Корейша, 1963). Сравнение рассчитанных и наблюдаемых величин высоты и запасов снежного покрова за зимние сезоны 1958-1959 гг. представлены на Рис. 32 указывает на адекватность модели.

На основе данных снегомерных съемок, которые проводились в районе станции на продольном профиле длиной 3 км с амплитудой высот более 400 м, был рассчитан коэффициент вариации снежного покрова, составивший 0.57. Он был использован при моделировании перераспределения снежного покрова в гольцовом ландшафте.

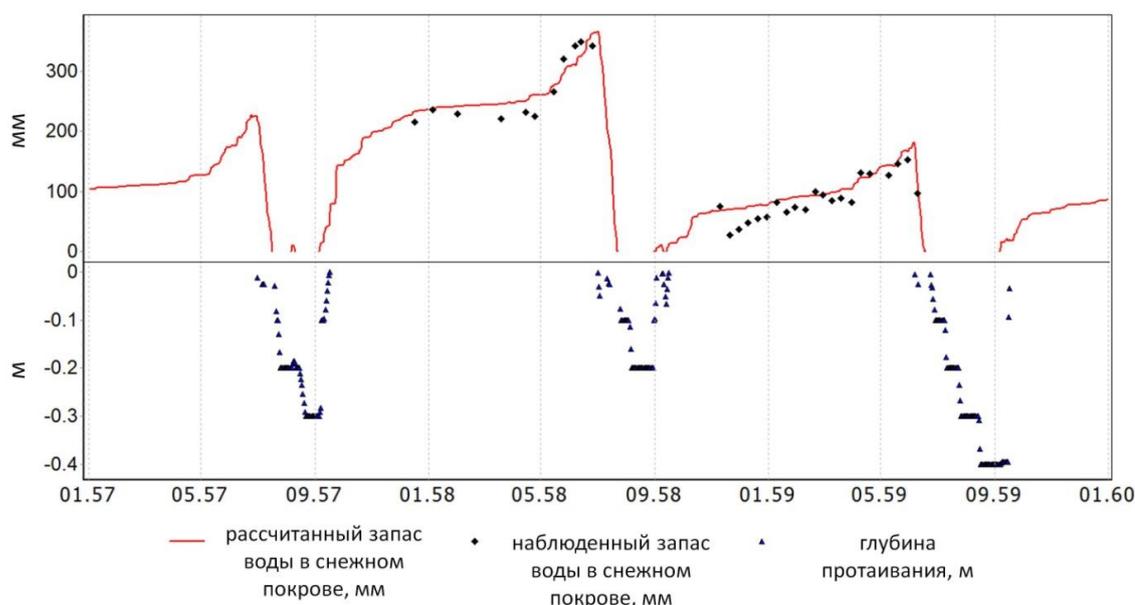


Рисунок 32 Запас воды в снежном покрове (мм), 1957-1960 гг. на станции Сунтар-Хаята

Испарение. Наблюдения за испарением производились с помощью двух почвенных испарителей системы ГГИ-500-50, которые были установлены на площадке станции Сунтар-Хаята в начале июня 1958 года при сплошном, не начинавшем таять снежном покрове и при отрицательной температуре грунта. Испарители были заполнены щебнистым грунтом, слагающим площадку, вставлены в вырытые гнезда на всю свою высоту и оставлены под снежным покровом до полного естественного таяния последнего на площадке, происходившего 20-27 июля. Наблюдения за испарением продолжались весь август 1958 года. Взвешивание испарителей производилось один раз в пять дней, выпадающие осадки регистрировались ежесуточно в непосредственной близости к испарителям (Граве, 1959).

Наблюденные осадки за август 1958 года составили 77 мм, величина просачивания 36 мм, среднее значение суммарного испарения равнялось 44 мм. Рассчитанное значение суммарного испарения за август этого же года составило 37 мм, а в среднем за теплый период 1957-1964 гг. – 50 мм. Результаты расчета не противоречат наблюдениям на каменных осыпях гольцового комплекса Колымской водно-балансовой станции, на которых значение среднегодового испарения в диапазоне высот 1200-1700 м (1979, 1983-1984 гг.) по данным Л.С. Лебедевой и др. (2017) составило 72 мм.

Результаты моделирования процессов формирования стока на водосборе р. Сунтар – устье р. Сахарынья. Непрерывное моделирование стока с суточным разрешением было произведено для бассейна р. Сунтар в створе устье р. Сахарынья за 1957-1964 гг. с использованием данных четырех метеорологических станций (Сунтар-Хаята, Нижняя база, Агаякан, Восточная), В период с 1968 по 2012 года моделирование стока для р. Сунтар происходило для периода 1968-1984 гг. с использованием трех метеорологических станций (Агаякан (776 м), Восточная (1287м), Нежданская (608 м)) и для периода с 1985-2012 гг. с использованием двух метеостанций (Агаякан (776 м), Восточная (1287м)) (Табл. 2). Основные характеристики водного баланса за данные периоды моделирования, а также рассчитанные значения критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (NS) (1970) представлены в Табл. 10. Сравнение наблюдаемых и рассчитанных гидрографов стока на рисунке для каждого года функционирования станции отображены на Рис. 33, гидрографы стока с лучшей, худшей и средней сходимостью для периода 1968-2012 гг. – на Рис. 34.

При моделировании использовались корректирующие коэффициенты 1.1 и 1.15 к твердым и жидким осадкам соответственно. Результаты анализа материалов отчетов (Граве, Корейша и др., 1960, 1963, 1957) и моделирования водного баланса не подтверждают рекомендуемого в (Справочник по климату, 1968) корректирующего коэффициента 1.6 к твердым осадкам, авторы исследования считают его неоправданно завышенным (Макарьева и др., 2019в).

Таблица 10 Характеристики водного баланса, р. Сунтар - устье р. Сахарынья

Период	Y_o	Y_s	P	E	Q_o	Q_s	NS (av)	NS (max)	NS (min)
1957-1964	180	199	344	143	1659	1200	0.75	0.9	0.4
1968-1984	190	218	396	178	785	1275	0.5	0.9	0.7
1985-2012	177	194	360	166	629	926	0.6	0.9	0.5

где Y_o и Y_s – наблюдаемый и рассчитанный среднемноголетний годовой слой стока, мм; P – осадки, мм; E – испарение, мм; Q_o и Q_s – максимальный наблюдаемый и рассчитанный расход, м³/с; NS av – среднее значение NS; max и min – максимальное и минимальное значение NS.

За период 1957-1964 гг. (время функционирования Высокогорной станции Сунтар-Хаята) рассчитанный годовой слой осадков для бассейна р. Сунтар составил в среднем 344 мм, рассчитанный слой стока воды – 199 мм, что в среднем на 10% выше наблюдаемой величины слоя стока (180 мм). Величина испарения с водосбора составила 143 мм, что в полтора раза ниже величины, указанной для района исследования в (Ресурсы поверхностных вод, 1966). Средний критерий эффективности Нэша-Сатклиффа расчета гидрографов в замыкающем створе составил 0.75. В целом, несмотря на небольшое завышение стока в период половодья, рассчитанные гидрографы стока хорошо совпадают с наблюдаемыми как по фазам, так и абсолютным значениям расходов воды (Макарьева и др., 2019в).

На основе результатов моделирования рассчитан вклад каждого СФК в формирование стока в замыкающем створе (Табл. 11, Рис. 35).

На гольцовый комплекс, занимающий 7 % территории водосбора, приходится 20 % общего 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%.

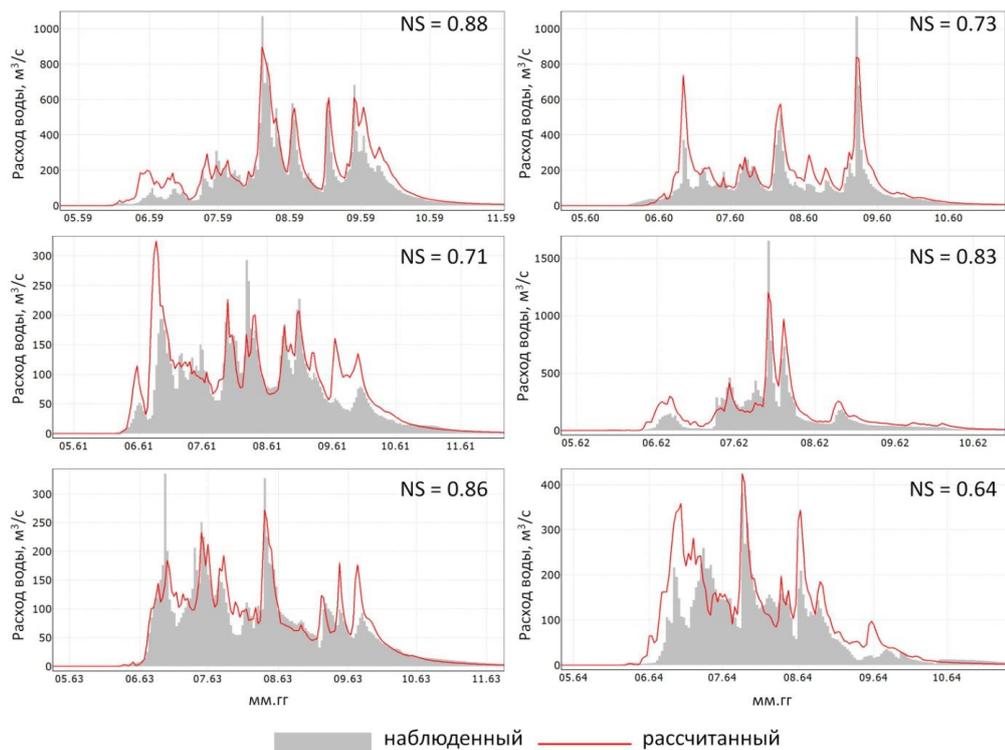


Рисунок 33 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока, р. Сунтар - устье р. Сахарынья, 1959 – 1964 гг.

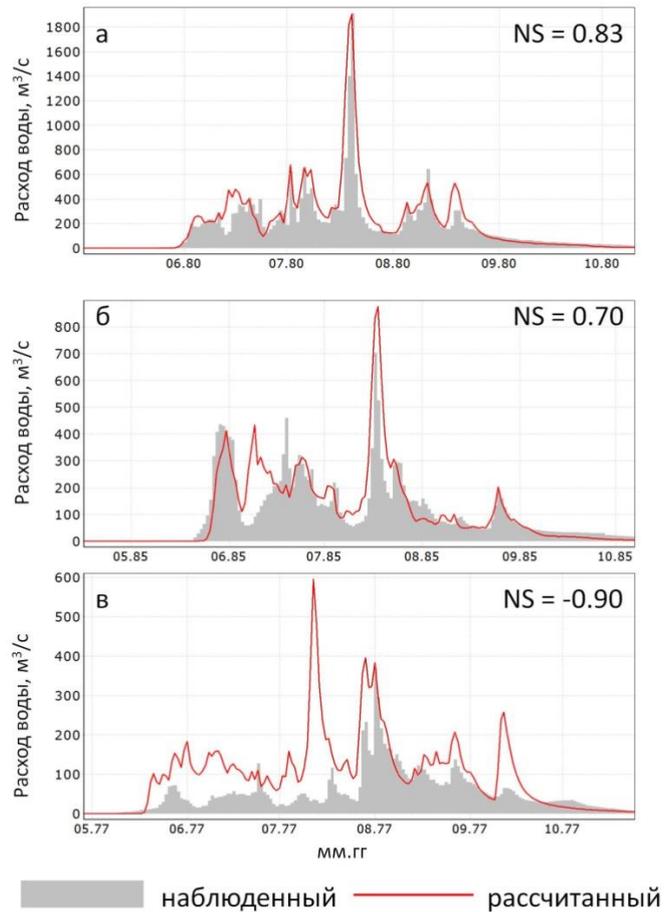


Рисунок 34 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока, р. Сунтар - устье р. Сахарынья, а) среднее значение NS, б) максимальное значение NS, в) минимальное значение NS, 1966-2012

Таблица 11 Водный баланс СФК в бассейне р. Сунтар, 1957-1964 гг.

	Общий	Гольцы	Горная тундра	Тайга и заболоченные редколесья
Рассчитанный сток, мм	199	567	263	105
Осадки, мм	344	618	356	292
Испарение, мм	143	50	86	186
Доля площади, %	100	7	37	56
Доля стока, %	100	20	49	31
Коэффициент стока, б/р	0.59	0.92	0.75	0.36

Вклад гольцовых ландшафтов увеличивается в маловодные годы и в бассейне р. Сунтар может достигать 28 % (например, в 1963 году, общий годовой слой стока составил всего 130 мм, а рассчитанный для гольцового комплекса – 513 мм) (Макарьева и др., 2019в).

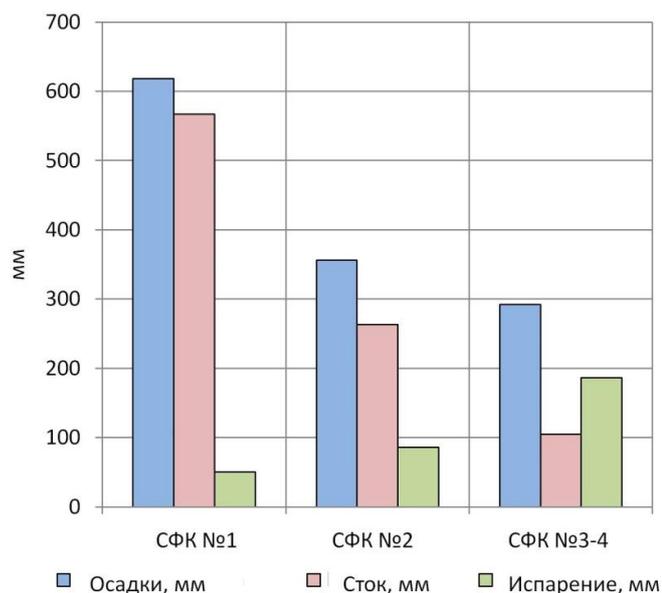


Рисунок 35 Рассчитанные величины водного баланса различных СФК, р. Сунтар, 1957-1964 гг.

Результаты моделирования стока за данный период можно признать удовлетворительными, так как критерий эффективности NS достигает для р. Сунтар в некоторые годы 0.9. Результаты моделирования переменных состояний подтверждают, что разработанный набор параметров удовлетворительно воспроизводит данные наблюдений, полученные на водосборе.

Факторами, обуславливающими погрешность, следует признать низкую точность гидрометеорологических измерений и недостаточно полную оценку доли участия подземных горизонтов в питании рек (Nesterova и др., 2021; Макарьева и др., 2019в).

4.2 Апробация методики оценки характеристик стока и водного баланса на основе краткосрочных наблюдений в задачах расчетов на неисследованных горных водосборах Северо-Востока

Для оценки качества моделирования были выбраны водосборы без специальных наблюдений на водосборе, но с наличием данных о стоке в замыкающем створе. В качестве объектов с продолжительными гидрологическими рядами выбраны четыре бассейна рек Северо-Востока России с площадями водосборов от 84 до 8290 км²: р. Сахарынья – устье, р. Артык-Юрях – 3.5 км от устья (бассейн р. Индигирка), р. Чаркы – 3.5 км от устья (бассейн р. Яна), р. Анмангында – Тенькинская трасса, 159-й км (бассейн р. Колыма) (Табл. 12).

В процессе моделирования были использованы следующие данные: метеорологическая и гидрологическая информация, распределение стокоформирующих комплексов (согласно описанию СФК в бассейне р. Сунтар и на КВБС – выделение производилось с использованием

цифровой модели рельефа, высоты и экспозиции склонов), неизменный набор разработанных параметров растительного и почвенного покровов.

Таблица 12 Результаты моделирования стока в неизученных бассейнах рек

Бассейн реки	Река – створ	S	H	Период	Y _o	Y _s	P	E	Q _o	Q _s	NS (av)	NS (max)	NS (min)
Индибирка	Сахарынья – устье	84.4	833	1966-2012	93.0	113	294	181	14	12	0.3	0.7	-0.8
Индибирка	Артык-Юрях	644	591	1966-1991	82.0	81.8	274	189	90.3	149	0.1	0.7	-10
Яна	Чаркы – 3.5 км от устья	8290	274	1966-2007	216	223	361	120	1424	1490	0.3	0.7	-1.8
Колыма	Анмангында – 159 км трассы	400	668	1966-1987	273	237	375	125	161	81.1	0.4	0.7	-0.9

где S – площадь водосбора, км²; H – средняя высота водосбора, м; Y_o и Y_s – наблюдаемый и рассчитанный среднесуточный годовой слой стока, мм; P – осадки, мм; E – испарение, мм; Q_o и Q_s – максимальный наблюдаемый и рассчитанный расход, м³/с; NS_{av} , NS_{max} и NS_{min} – среднее, максимальное и минимальное значение NS .

Для моделирования стока бассейна р. Сахарынья применялись метеоданные с двух метеостанций (Агаякан (776 м), Восточная (1287м)) за период 1966-2012 гг. При расчете гидрологических характеристик р. Анмангында была использована одна метеостанция Усть-Омчуг (576 м, 1966-1987). В качестве входной информации для р. Чаркы – 3.5 км от устья были взяты данные с метеостанции Усть-Чаркы (273 м, 1966-2007). Моделирование р. Артык-Юрях производилось на основе данных с двух станций: Юрта (950 м) и Предпорожная (415 м) за период 1966-1991 гг. Результаты моделирования водного баланса и гидрографов стока представлены в Табл. 12 и на Рис. 36 – 37.

Результаты моделирования можно считать удовлетворительными в условиях крайней недостаточности данных (использование при моделировании одной или двух метеостанций) и полного отсутствия информации о процессах формирования стока на выбранных водосборах. Несмотря на невысокое среднее значение критерия эффективности Нэша-Сатклиффа, что связано с завышением данным критерием эффективности моделирования в периоды паводковых пиков и малый вклад в его оценку в периоды меженного стока, рассчитанные и наблюдаемые гидрографы имеют сравнительно хорошую сходимость. В некоторые годы значение NS достигает для всех водосборов 0.7.

Тем не менее, малые водосборы требуют уточнения распространения выделенных СФК по картам более высокой степени подробности и космическим снимкам, так как разрешение цифровой модели рельефа (например, SRTM) не всегда позволяет правильно учитывать распределение комплексов.

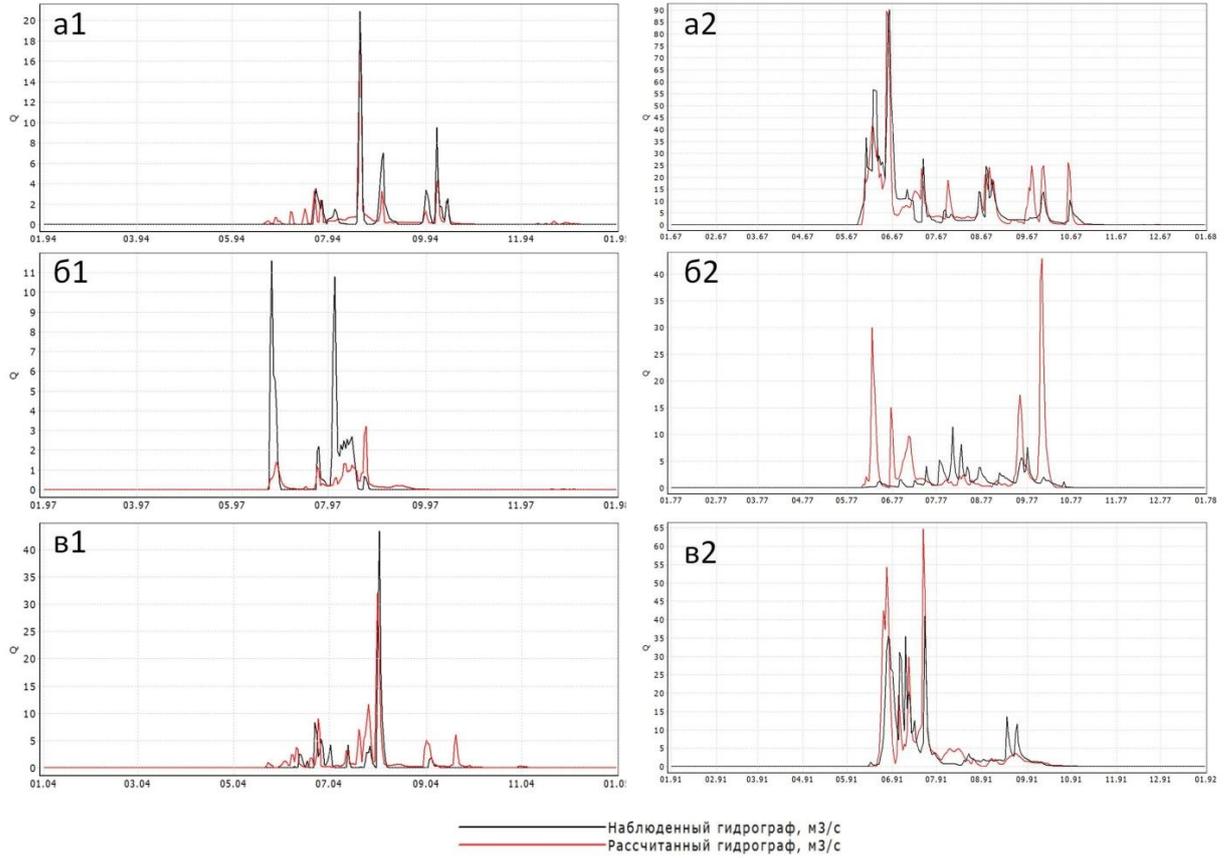


Рисунок 36 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока; 1 – р. Сахарынья, 2 – р. Артык-Юрях; а, б, в – высокое, низкое, среднее значения коэффициента NS соответственно

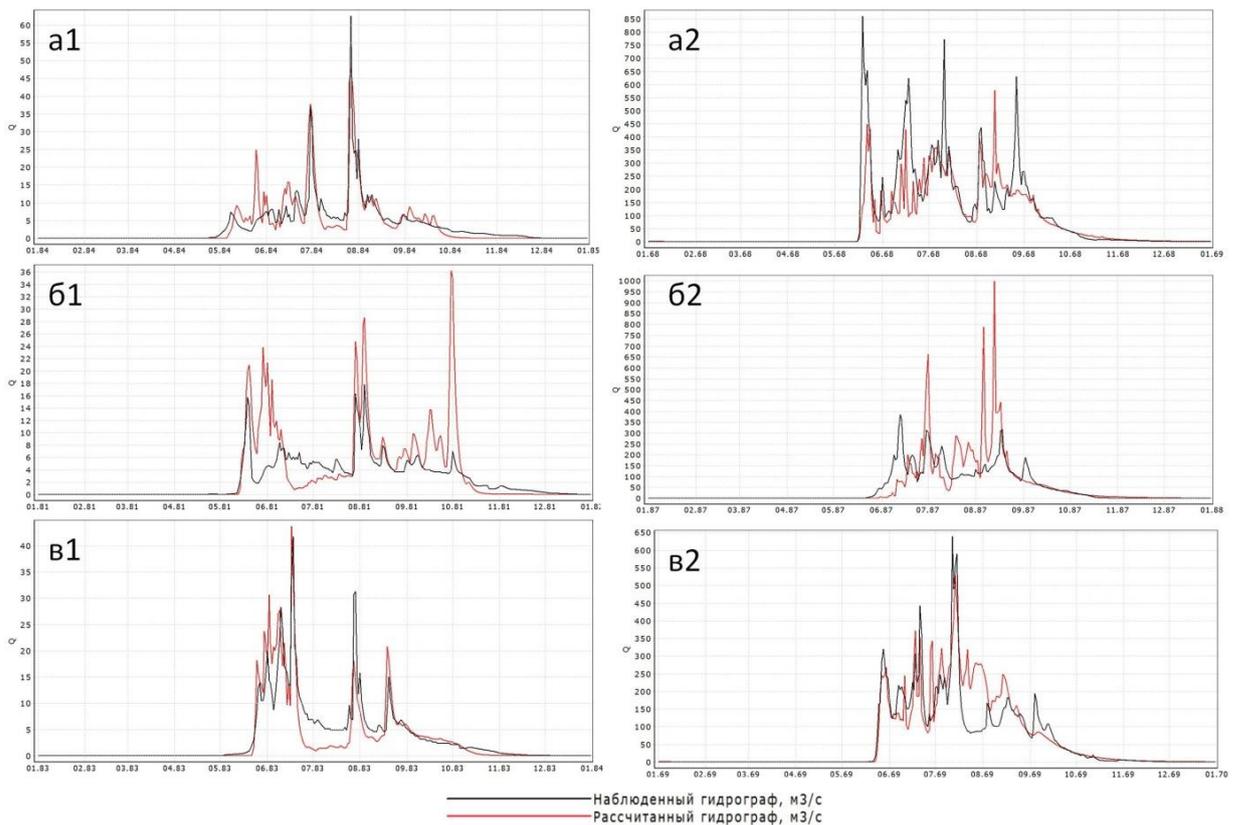


Рисунок 37 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока; 1 – р. Анмангында, 2 – р. Чаркы; а, б, в – высокое, низкое, среднее значения коэффициента NS соответственно.

Также необходимо отметить, что бассейны р. Чаркы и р. Анмангынды имеют большую долю наледного питания в весенне-летний период. В данной работе такой вид питания не учитывался, что может серьезным образом повлиять на результаты моделирования, так как наледи являются объектами, перераспределяющими сток внутри года. Возможно, более высокий наблюдаемый в летние месяцы межлетний сток (по сравнению с рассчитанным), который можно отметить на Рис. 11, имеет высокую долю наледного питания.

Таким образом, разработанный набор параметров может быть применим для моделирования стока в условиях крайней недостаточности данных, что подтверждается удовлетворительными результатами расчетов на водосборах различной площади.

4.3 Апробация методики оценки характеристик стока и водного баланса на основе краткосрочных наблюдений в задачах прогнозирования изменений стока

Северо-Восток России относится к регионам, которые наиболее сильно подвержены влиянию изменения климата. Анализ месячных данных стока в бассейнах рек Яна и Индигирка (1936-2015 гг.) показал наличие статистически значимых ($P < 0.05$) положительных тенденций в мае и осенний период (Makarieva et al., 2019b). Значения трендов месячных слоев стока для реки Сунтар составили 6.8 мм или 103% в мае, 9.9 мм или 49% в сентябре, 3.3 мм или 70% в октябре и 0.43 мм или 52% в ноябре (Makarieva et al., 2019b). Наблюдается уменьшение количества осадков зимой (от 8 до 13 мм) и отсутствие существенных изменений в другие сезоны. Согласно статье Makarieva et al. (2019b) повышение годовой температуры воздуха на $+2.0^{\circ}\text{C}$ привело к увеличению количества жидких осадков и стока воды в сентябре примерно на 12 мм. Выявленные зависимости между изменениями стока и количеством жидких осадков в сентябре в период 1991-1996 гг., свидетельствуют о том, что фазовое состояние осадков может быть одним из основных факторов, который влияет на увеличение расхода воды рек криолитозоны в осенне-зимний период (Макарьева, Нестерова, 2020).

Моделирование стока бассейна р. Сунтар за период 1966-2012 гг. позволило количественно воспроизвести выявленные на наблюдаемых данных тренды увеличения слоев стока (Табл. 13). По данным ранговых корреляционных тестов Манна-Кендалла и Спирмена (Kendall, 1975; Mann, 1945) и теста Петтитта (Pettitt, 1979) значимые положительные тенденции рассчитанного стока наблюдались в мае (1.3 мм или 118 %), сентябре (10.2 мм или 38.1%), октябре (1.3 мм или 33.3%) и ноябре (0.35 мм или 35.9%). Таким образом, в целом моделируемые тренды совпадают с наблюдаемыми (Nesterova et al., 2019a, 2021). Также согласно расчетам, доля жидких осадков увеличилась в среднем на 10% (или 13,6 мм), что соответствует наблюдаемому значению 12 мм. Период изменения величин в осенний сезон совпадает с наблюдаемыми данными и относится к периоду 1993-1996 гг. (Рис. 38).

Таблица 13 Наблюденные 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)

Таким образом, моделирование позволило воспроизвести значения положительных трендов характеристик речного стока, а также период их изменения, подтверждая гипотезу о том, что увеличение количества жидких осадков осенью из-за потепления климата может быть основным фактором изменения стока в осенне-зимний период в данном регионе.

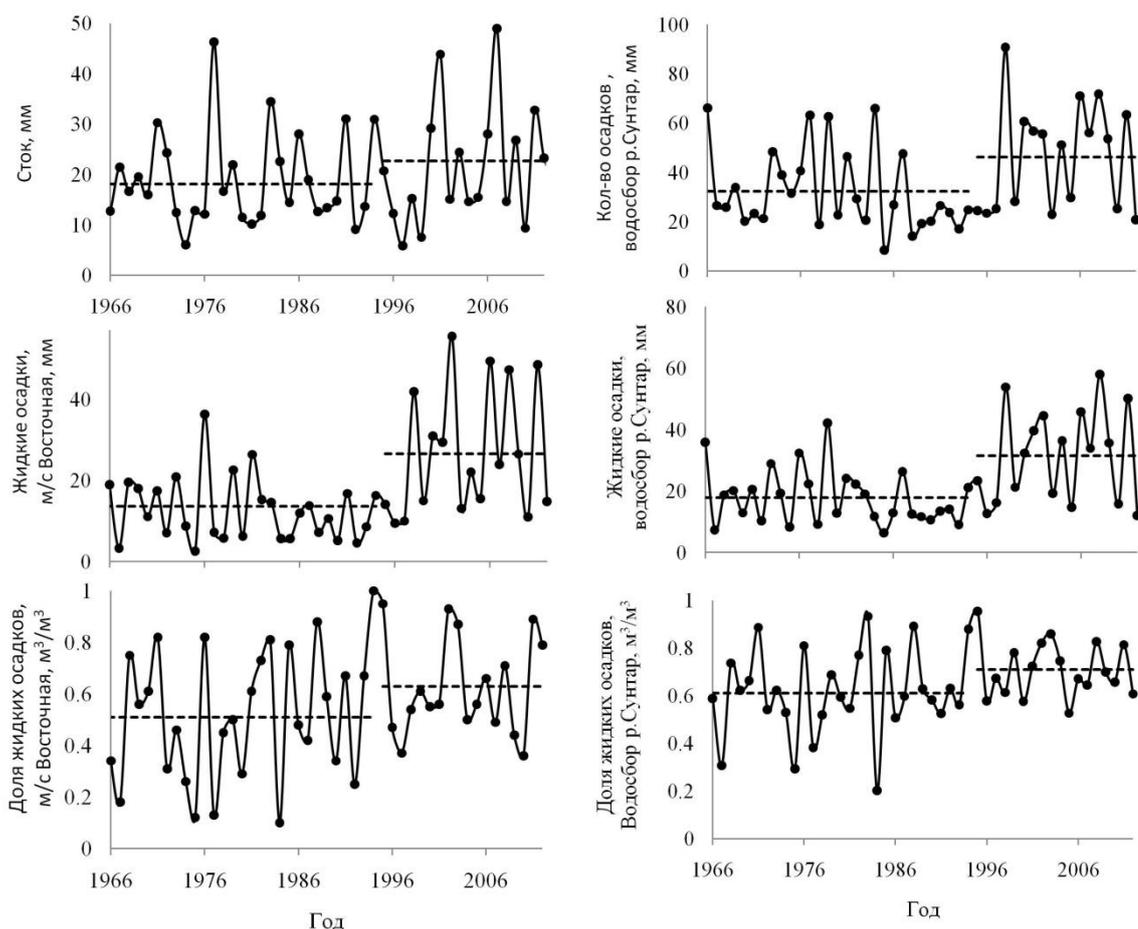


Рисунок 38 Рассчитанные изменения гидрометеорологических характеристик в бассейне р. Сунтар, 1966-2012 гг.

4.4 Апробация методики оценки характеристик стока и водного баланса в задачах расчета максимальных расходов воды бассейнов рек Северо-Востока России

Статистика по Магаданской области свидетельствует, что за последние годы катастрофические паводки в этом регионе происходят ежегодно. Так в результате прохождения паводка в августе 2013 года повреждено 74 км дорог и 15 мостов, в том числе на федеральной трассе «Колыма», ущерб составил более 600 миллионов рублей. В 2014 году в результате паводка

оказалась закрыта областная дорога "Магадан – Балаганное – Талон", ущерб был оценен в размере 700 миллионов рублей. В августе 2016 года ущерб от паводка в регионе достиг 250 миллионов рублей. В 2017 году произошло разрушение подъезда к мосту на 542-м км трассы «Колыма», что привело к перекрытию трассы и, как следствие, 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 года) (СМИ, URL: https://www.eastrussia.ru/material/doroga_zhizni).

Согласно И.Д. Ростову и др. (2017) при анализе термических изменений в Охотском море было установлено, что в процессе чередования «холодных» и «теплых» периодов в течение 10-15 лет наблюдается тенденция потепления вод в прибрежных акваториях. В среднем по всем прибрежным станциям, скорость роста среднегодовых температур составила $0.17^{\circ}/10$ лет, а в отдельных районах она была в 1.5-2 раза выше (Ростов и др., 2017). Анализируя различные параметры атмосферной циркуляции над дальневосточными морями, ученые приходят к выводу, что количество «холодных» синоптических типов сократилось, активность и продолжительность зимнего муссона уменьшилась, в то время как летний увеличился (Chernokulsky et al., 2019). Таким образом, для территории Северо-Востока России в будущем будет наблюдаться увеличение количества и величины паводков. В связи с этим возникает необходимость оценки срочных максимальных расходов воды.

Апробация метода расчета гидрографов стока на внутрисуточном интервале проведена при моделировании катастрофического паводка 2014 г. в бассейне р. Магаданки – г. Магадан (площадь 48.5 км^2), впадающей в Тауйскую губу Охотского моря.

Для верификации модели «Гидрограф» было проведено непрерывное моделирование с суточным шагом за период 1971-2015 гг. Результатами расчета стали гидрографы стока и значения элементов водного баланса. Для оценки эффективности моделирования стока воды ряды рассчитанных расходов воды сравнивались с наблюдаемыми значениями на основе величины критерия Нэша-Сатклиффа (NS). На Рис. 39 представлен рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока для 2004 года.

Анализ результатов показывает, что в основном сроки достижения экстремальных значений стока (половодья и паводков) идентичны, расхождения с наблюдаемыми данными приходятся на величину расходов. Медианная величина критерия эффективности NS для суточных расходов воды достигает 0.42. Наблюденный и рассчитанный среднегодовой годовой слой стока составляет 769 и 764 мм соответственно.

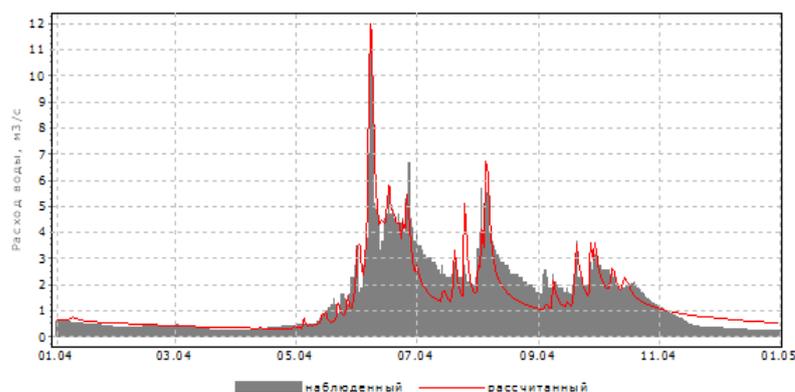


Рисунок 39 Суточные рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Магаданка — г. Магадан, м³/с (на примере 2004 года, NS = 0.86)

Наиболее разрушительным паводком в Магаданской области является паводок 2014 года. По данным Доклада об экологической ситуации в Магаданской области за 2014 год время его прохождения на реках Сусуманского, Омсукчанского, Ольского и Хасынского районов пришлось на 23-24 июля, на реках Тенькинского и Ягоднинского районов – 28-31 июля. Подъемы уровней воды над предпаводочными составили на реках центральных районов 1.0 – 2.47 м, на реках Охотского побережья 1.59 – 4.12 м. (Доклад об экологической ситуации в Магаданской области в 2014 году). За 22-23 июля 2014 в Магадане выпало 196 мм осадков (108 и 88 мм соответственно) при месячной норме июля в 69 мм. Установлены два рекорда июльских дождей: перекрыт абсолютный суточный максимум (65 мм), установленный в 1990 году, и обновлен абсолютный максимум месяца (149 мм), продержавшийся с 1978 года (СМИ, URL:<https://www.gismeteo.ru/news/stihiynye-yavleniya/10842-v-magadane-ustanovleno-dva-rekorda-iyulskih-dozhdey>). За 48 часов в пос. Армань (41 км от г. Магадан) наблюденное количество осадков составило 225 мм, пос. Ола (28 км от г. Магадан) – 149 мм. За 12 часов на этих станциях выпадало от 47 до 88 мм осадков. За третью декаду осадков в Армани было отмечено 9 декадных норм, Оле – 7 декадных норм, в центральных районах – 1-6 декадных норм. Пик паводка на реке Магаданке в районе горнолыжной базы был зарегистрирован 23 июля 4 часа утра, наблюдаемый уровень воды составил 162 см. Река выходила на пойму, ширина реки достигала 40 м при обычных 7-10 м.

Рассчитанный суточный максимальный расход воды рассматриваемого паводка 2014 года на р. Магаданка – г. Магадан составил 31.6 м³/с, в то время как наблюдаемый суточный достигает 38.1 м³/с (Рис. 40). Максимальный срочный расход за весь период наблюдения в городе Магадане был оценен в 76.8 м³/с по отметкам уровней высоких вод.

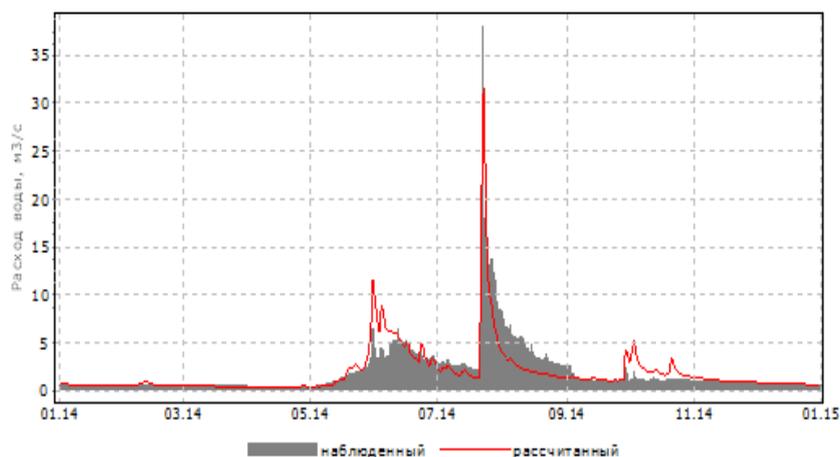


Рисунок 40 Суточные рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока р. Магаданка – г. Магадан, 2014 г.

Детализированная информация о ходе осадков с pluviографов для расчета на внутрисуточном интервале до и во время паводка была получена с метеорологической станции «Магадан». Сумма осадков по pluвиографу за период с 21.07 8:30 утра и до 23.07 11:40 составила 268 мм. По результатам моделирования максимальный расход паводка по часовым значениям pluвиографов с метеостанции «Магадан» составил 35 м³/с (Рис. 41).

Также моделирование паводка было произведено с использованием входных данных климатической модели WRF, предоставленные Шиховым А.Н. (Пермский университет). Модель WRF (Weather Research and Forecasting) – численная модель прогнозирования погоды, разработанная в США, и предназначена как для проведения атмосферных исследований, так и для оперативного прогнозирования. В результате расчета по модели WRF были получены распределенные по водосбору значения количества осадков. Максимальный расход воды при использовании в расчете данных модели WRF составил 55.3 м³/с (Рис. 41).

Климатическая модель WRF рассчитывает значение осадков для всех репрезентативных точек, то есть охватывает всю площадь водосбора. Значения осадков с pluвиографов, хоть и дают более детальную информацию, чем данные с осадкомеров Третьякова, все же являются измерениями в локальной точке. Так как метеостанция «Магадан» расположена за пределами водосбора и на значительно более низких высотных отметках, предполагается, что использование данных климатической модели дает более точные результаты.

В целом, результаты работы подтверждают принципиальную возможность применения метода детерминированного гидрологического моделирования для расчета срочных максимальных расходов воды при использовании данных pluвиографов и климатических моделей на территории Северо-Востока России.

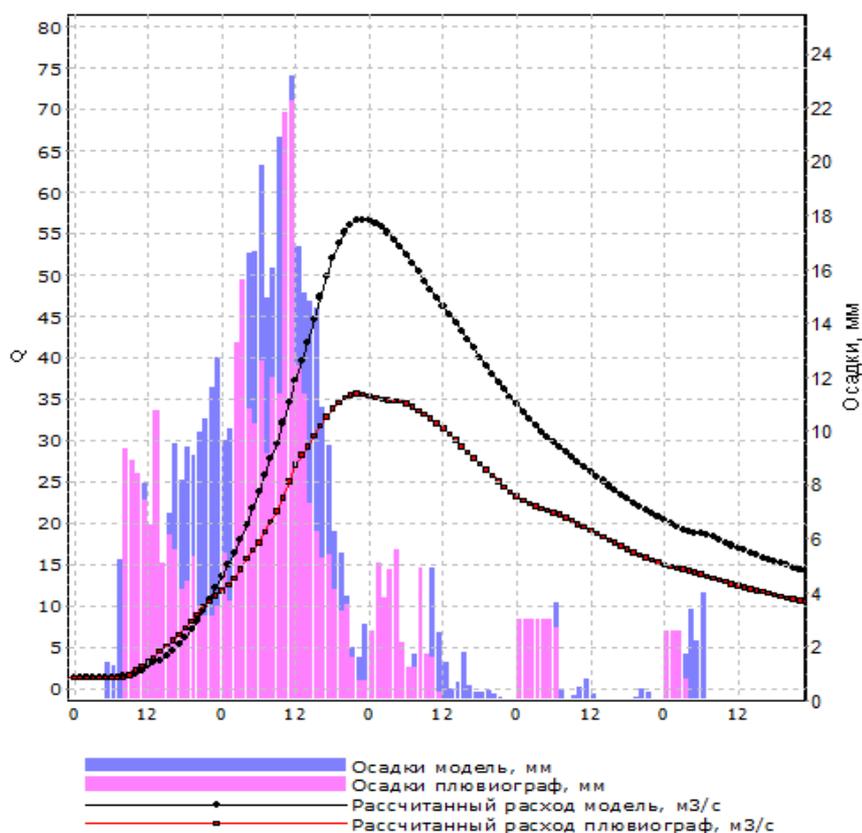


Рисунок 41 Результаты моделирования с часовым шагом по данным pluвиографа и климатической модели WRF

4.5 Выводы

Глава 4 посвящена разработке методики параметризации гидрологической модели «Гидрограф» в неизученных бассейнах горных рек северной криолитозоны на основе краткосрочных данных специальных наблюдений, ее верификации и апробации 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):

1. На основе данных наблюдений на Высокогорной станции Сунтар-Хаята (верховья р. Индигирки) по программе Международного Геофизического года в 1957-1959 гг. разработаны параметры гидрологической модели «Гидрограф», описывающие процессы формирования стока в высокогорной гольцовой зоне бассейна р. Сунтар.
2. Проведено моделирование переменных состояний снежного покрова и динамики тепла в профиле грунта в гольцовой зоне, а также процессов формирования стока на всем водосборе р. Сунтар. Результаты моделирования оцениваются как удовлетворительные.
3. Модельные расчеты позволили оценить среднемноголетние величины элементов водного баланса различных ландшафтов, их вклад в формирование стока воды в замыкающем

створе горной реки, а также предложить уточнения справочных величин среднемноголетних годовых осадков и испарения для района исследования. Суммарно сток с гольцов и горных тундр, занимающих 44 % площади водосбора, в среднем составляет 69 % стока в замыкающем створе р. Сунтар, достигая 75 % в маловодные годы.

4. Представлены результаты применения 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. Результаты моделирования признаны удовлетворительными, а разработанная методика расчета может быть применима для моделирования стока в условиях крайней недостаточности данных.

5. Приведены результаты апробации методики оценки характеристик стока и водного баланса в задачах расчета изменений водного режима. Моделирование стока бассейна р. Сунтар за период 1966-2012 гг. позволило количественно воспроизвести выявленные на основе наблюдаемых данных тренды увеличения слоев речного стока в различные сезоны года.

6. 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 плевниографов и климатических моделей.

Глава 5. Разработка параметрического обеспечения математической модели «Гидрограф» в целях расчета характеристик стока и элементов водного баланса в бассейнах горных рек южной криолитозоны России. Апробация разработанных наборов параметров в задачах оценки максимальных расходов воды различной обеспеченности и расчета характеристик катастрофических паводков неизученных горных рек

В условиях широкомасштабного хозяйственного освоения Дальнего Востока, увеличения транспортного и других видов строительства, создания связей с зарубежными партнерами зона южной криолитозоны является важным экономическим и стратегическим районом. Тем не менее, гидрологический режим рек региона также характеризуется слабой изученностью, обусловленной редкой сетью гидрометеорологических наблюдений, что затрудняет проектирование строительных и проведение восстановительных работ.

Таким образом, для района южной криолитозоны также необходима параметризация и апробация гидрологической модели как для проведения расчетов характеристик стока и водного баланса рек с наличием и отсутствием данных наблюдений, так и в задачах оценки максимальных расходов воды различной обеспеченности.

5.1 Параметризация и верификация гидрологической модели «Гидрограф» для горных водосборов зоны БАМ на основе данных специальных наблюдений на гидрологическом полигоне "Могот". Результаты апробации

Параметризация модели. В 1976-1985 гг. Государственным гидрологическим институтом (ГГИ) был организован экспериментальный гидрологический полигон «Могот», на котором проводился комплекс работ, направленный на изучение процессов формирования стока и других элементов водного и теплового баланса в зоне хозяйственного освоения Байкало-Амурской магистрали (Василенко, 2013). Данные непрерывных наблюдений, полученные за время функционирования полигона, являются уникальными для среднегорных районов южной криолитозоны.

Гидрологический полигон «Могот» располагался в средней части южного склона средневысоких хребтов Станового и Тукурингра примерно в 60 км к северу от г. Тынды на водоразделе рек Амур и Алдан, и занимает водосбор р. Нелки ($S=30.8 \text{ км}^2$) и трех ее притоков – ручьев Захаренок, Филипер и Оникс (Рис. 42).

Природные условия территории типичны для низкогорных среднетаежных ландшафтов южного склона Станового хребта. Эти ландшафты характеризуются сочетанием низкогорий и избыточно увлажненных межгорных понижений (Василенко, 2013). Рельеф полигона

представлен округлыми и плоскими водоразделами, крутыми склонами теневой экспозиции и более выположенными склонами световой экспозиции.

Исследуемая территория занята преимущественно лиственничным редколесьем, залесенность водосбора р. Нелки составляет 80%, а водосборов притоков – до 90%. Главными представителями растительности являются лиственница даурская и береза белая. В покрове прослеживаются багульник, голубика, брусника, зеленые мхи и ягель. В пределах дна долин широко развиты болота (мари), покрытые мощным (до 40 см) моховым покровом.

Полигон расположен в зоне распространения сплошной многолетней мерзлоты мощностью 100-250 м с температурами $-1-3^{\circ}\text{C}$. Почвы представлены различными сочетаниями мерзлотных горно-таежных почв с укороченным профилем, обилием гравелистых включений всех горизонтов и малой мощностью гумусового горизонта. Почвенно-грунтовый слой находится в мерзлом состоянии 7-8 месяцев в году, поэтому происходит сильное выхолаживание верхних горизонтов зимой.

Продолжительность периода с отрицательными температурами воздуха достигает 195-220 дней в году. Значение среднегодовой температуры воздуха составляет -7.5°C . В теплый период (апрель-сентябрь) выпадает более 80% годовой суммы осадков при норме около 560 мм. Снежный покров появляется в конце сентября – начале октября и сохраняется до начала мая. Максимальный запас воды в снеге отмечается, как правило, в марте-апреле и сильно изменяется от года к году (от 42 до 160 мм за период 1976-1985 гг.).

На полигоне в разные периоды проводились наблюдения за метеорологическими элементами, тепловым и радиационным балансом, испарением с почвы, запасом влаги в почво-грунтах, запасом воды в снеге, протаиванием и промерзанием деятельного слоя почвы, расходами воды на пяти створах. Все данные систематизированы Н.Г. Василенко в монографии (Василенко, 2013). В данной работе проведен анализ данных наблюдений полигона (Василенко, 2013) в задаче параметризации модели.

При параметризации модели «Гидрограф» экспериментальный водосбор р. Нелки был разбит на четыре СФК (Нестерова и др., 2018), описанных на основе ландшафтных и почвенных съемок (Василенко, 2013) (Рис. 42).

1. Вершины водоразделов расположены на высотах более 850 м и характеризуются хорошо дренируемыми почвогрунтами. Растительность представлена разреженным лиственничником. Почво-грунты имеют мощность 100-120 см. Верхний слой представлен сухим покровом лишайников, переходящим в суглинок и супесь.

2. Склоны теневой экспозиции, находящиеся в пределах высотных отметок 650-850 м, имеют в составе почвенного профиля выраженный горизонт, сформированный лесным опадом. На данном СФК из-за достаточной увлажненности почвы произрастает наиболее густая

растительность, представленная багульниково-брусничниковыми лиственничниками. Толщина органического слоя почво-грунтов составляет более 20 см, глубина СТС достигает 120 см. Более крутые склоны теневой экспозиции, на которых потери осадков не столько высоки, как на других СФК, являются основным ландшафтом, формирующим сток (Василенко, 2013).

3. Склоны световой экспозиции, также лежащие в диапазонах высот от 650 до 850 м, характеризуются приходом большего количества солнечной радиации, из-за чего данный СФК имеет наибольшую глубину протаивания, достигающую 160 см, а также наименее развитую растительность, состоящую из багульно-брусничковых лиственничников и вторичных березняков. Мощность органического слоя составляет 15-20 см, большую часть почвенной колонки составляют супеси, распространенные на глубинах 40-160 см.

4. Днища долин рек распространены на высотах менее 650 м. Они заняты переувлажненными голубичными лиственничниками, сфагновыми мхами и местами голубично-осоковым растительным сообществом. Глубины СТС достигают наименьших величин по сравнению с остальными СФК, а именно 30-40 см. Отличительной чертой данного комплекса является наличие торфяного горизонта и мощного мохового покрова (Нестерова и др., 2018).

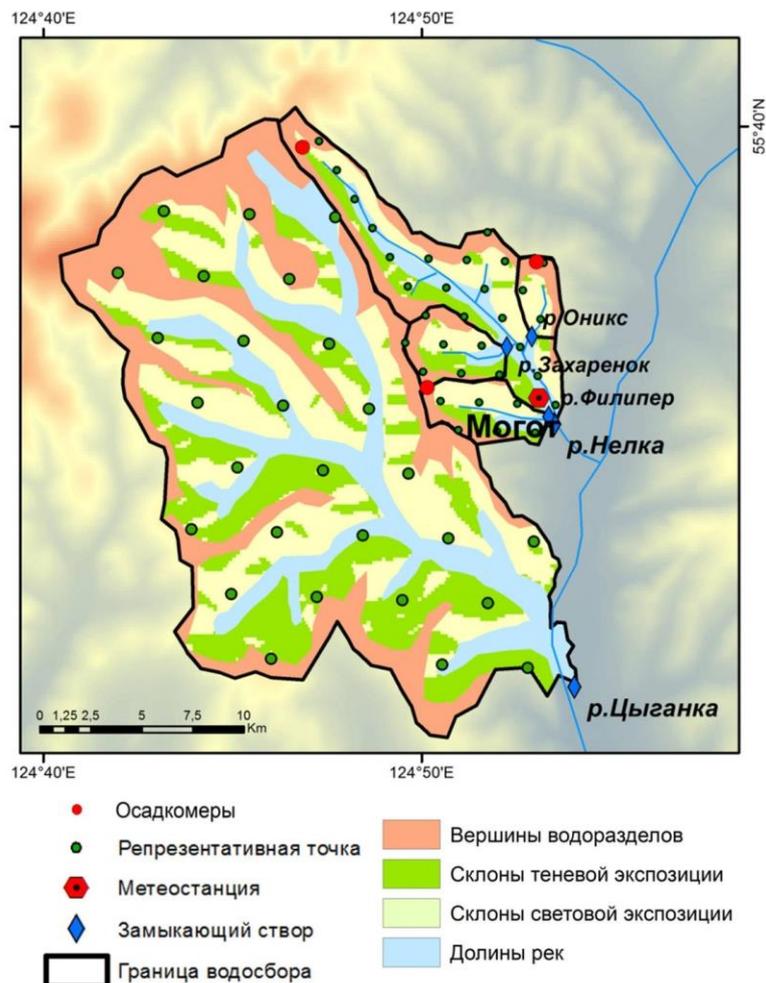


Рисунок 42 Объект исследования и распределение стокоформирующих комплексов

Согласно Л.С. Лебедевой и др. (2015, 2017, 2018) для каждого выделенного СФК был разработан типичный профиль подстилающей поверхности (Рис. 43), свойства которого изменяются по глубине от поверхности растительного покрова до глубины 1 – 3 м. Каждой колонке задавался уникальный набор параметров, описывающий водно- и теплофизические свойства разных горизонтов, составляющих профиль (например, лесной опад, мох, легкий суглинок, супесь, торф).

Параметризация модели производилась с использованием данных о распределении и физических свойствах почво-грунтов на различных глубинах и подстилающей поверхности на основе описаний Н.Г. Василенко (Василенко, 2013). При задании величин почвенных параметров модели (Табл. 14) нами были использованы результаты исследований водно-физических свойств почвы: плотность и гранулометрический состав почвенных слоев, наименьшая и наибольшая влагоемкости почво-грунтов, коэффициенты фильтрации, а также запасы воды в СТС. Определения свойств почвы проводились на каждом из выделенных ландшафтов, что позволило установить различия между процессами стокоформирования в различных комплексах. Гидравлические параметры истечения стоковых элементов определились методом ручной калибровки с использованием наблюдаемых гидрографов стока на малых водосборах и на основе общих представлений о происходящих процессах. Например, сток в верхнем горизонте почво-грунтов, сформированном из мохового покрова, происходит значительно быстрее, чем в минеральном слое (Нестерова и др., 2018).

Таблица 14 Почвенные параметры

Параметры	Метод определения параметра	Лишайники	Опад	Мох	Легкий суглинок	Супесь	Торф
Плотность, кг/м ³	полевой	1680	1300	520	2600	2600	1700
Пористость, м ³ / м ³	полевой	0.87	0.92	0.90	0.60	0.35	0.83
Максимальная водоудерживающая способность, м ³ / м ³	полевой	0.25	0.30	0.35	0.25	0.15	0.40
Коэффициент фильтрации, мм/мин.	полевой	24	12	1.8	0.1	0.01	0.1
Теплоемкость, Дж/(кг°С)	оценка по типу грунтов	780	840	1930	830	830	1930
Теплопроводность, Вт/(м°С)	оценка по типу грунтов	1.5	1.3	0.8	1.7	1.7	0.8
Гидравлический параметр, м ³ /с	экспертная оценка, калибровка	<u>Активный слой</u> Верхний органический слой: 10 Нижний минеральный слой: 0.005					

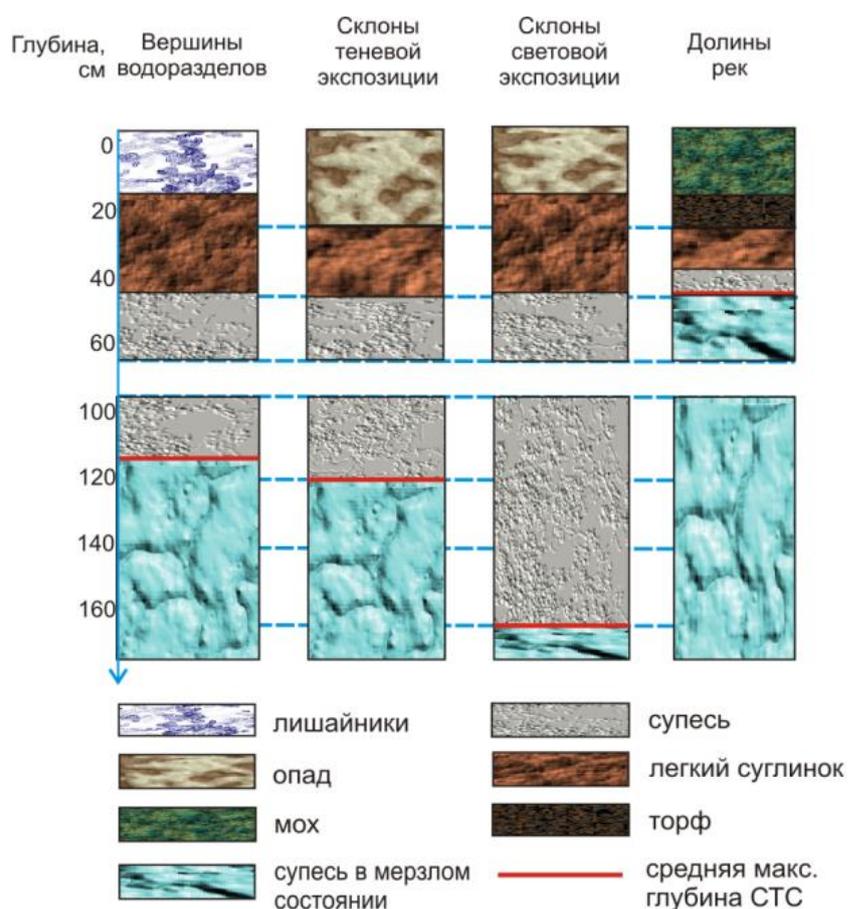


Рисунок 43 Почвенные колонки типичных СФК

Подготовка входной метеорологической информации. В качестве входной метеорологической информации для моделирования задаются суточные данные по температуре и влажности воздуха, количеству осадков для метеорологических станций в пределах или вблизи каждого водосбора. При расчетах в горных районах учитывается градиент температуры воздуха и количества осадков с высотой. Распределение осадков в зависимости от высоты склонов рассчитывалось для летнего и зимнего периода отдельно по девяти метеостанциям и метеопостам исследуемого района. Для теплого периода устойчивой зависимости количества осадков от высоты построить не удалось, а для зимнего периода градиент увеличения количества осадков на 100 м высоты составил 5 мм в диапазоне высот 600-1000 м (Нестерова и др., 2018).

Для моделирования водосборов полигона «Могот» за 1976-1985 гг. в летнее время использовались данные метеорологической станции Могот и трех осадкомеров, находящихся в бассейне р. Нелки, а в зимнее время – данные метеорологической станции Тында, находящейся на расстоянии 60 км от полигона.

Моделирование переменных состояний. 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 модели. В этом разделе приводятся значения уточненных параметров модели, играющих важную роль при моделировании процессов формирования стока в исследуемом районе, и результаты сравнения рассчитанных и наблюдаемых величин (Нестерова и др., 2018).

Снежный покров. Испарение со снежного покрова в период начала формирования снежного покрова и снеготаяния играет значительную роль в водном балансе исследуемой территории. В среднем за период 1977-1985 гг. годовая величина испарения со снежного покрова по данным Н.Г. Василенко (Василенко, 2013) составила 25 мм, достигая 19 мм в апреле. На основе данных наблюдений коэффициент испарения со снега был принят равным 23 и $17 \cdot 10^{-11}$ м $(\text{гПа} \cdot \text{с})^{-1}$ при положительной и отрицательной температуре воздуха соответственно, что позволило получить расчетные величины, близкие к наблюдаемым. Результаты сравнения рассчитанного и наблюдаемого испарения со снежного покрова за гидрологический год по данным (Василенко, 2013) за период 1980-1985 гг. приведены на Рис. 44. В среднем за 1980-1983 гг. по Н.Г. Василенко (2013) испарение со снежного покрова за апрель составляет 17 мм, однако Suzuki (2013) дает оценку в 6.4 мм. Согласно работам Zhang (2004) величина испарения снега на полигоне «Могот» с 13 марта по 22 апреля 2002 г. составляет суммарно 15.7 и 10.4 мм на вершинах водоразделов и залесенных склонах соответственно. В данном исследовании при оценке параметров модели авторы ориентировались на результаты, полученные Н.Г. Василенко (2013).

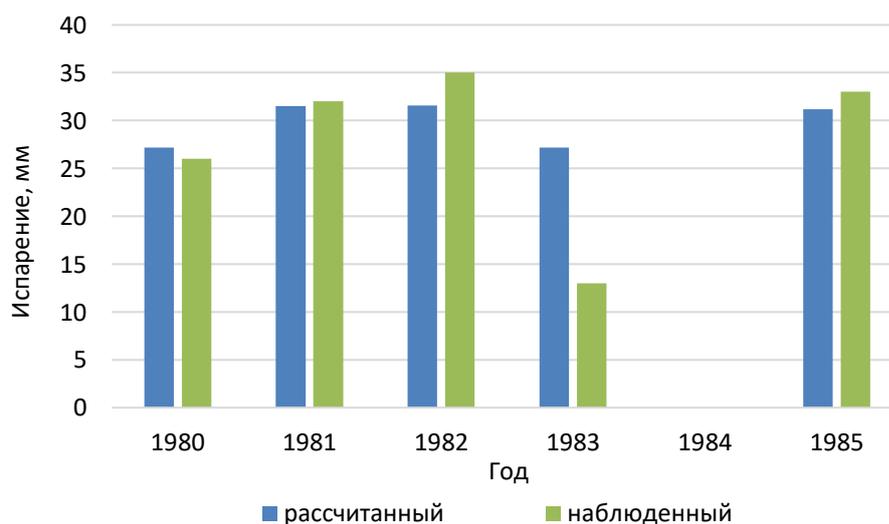


Рисунок 44 Рассчитанные и наблюдаемые среднегодовые значения испарения со снега (мм), 1980-1985 гг.

Для оценки адекватности моделирования запасов снежного покрова нами были использованы средние запасы воды в снеге по водосбору р. Нелки, рассчитанные в (Василенко, 2013) на основе результатов маршрутных снегомерных съемок общей длиной маршрутов до 50 км. Наблюдаемые величины сравнивались с аналогичными рассчитанными значениями (Рис. 45). Результаты показывают, что при удовлетворительном моделировании сроков снеготаяния

рассчитанная величина максимальных запасов снежного покрова в некоторые годы (1981-1982, 1983-1984 гг.) значительно ниже «наблюденной». Авторы связывают такое расхождение с недостаточной точностью входной информации о зимних осадках из-за значительной удаленности метеорологической станции.

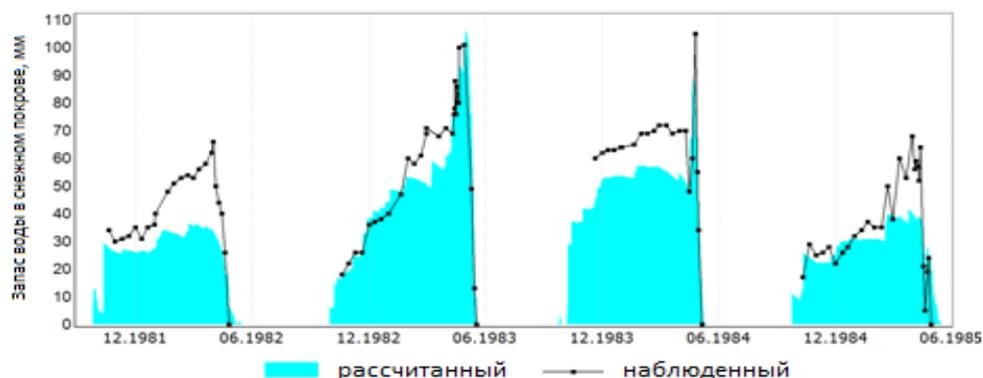


Рисунок 45 Рассчитанный и наблюдаемый запас воды в снежном покрове (мм), 1981-1985 гг.

Глубина протаивания и промерзания и температура почво-грунтов. Режим промерзания и протаивания сезонно-талого слоя (СТС) определяет формирование стока воды и, в свою очередь, зависит от экспозиции склонов, влажности/льдистости почво-грунтов, растительного покрова и промывного режима участков. Оттаивание начинается в мае, когда его интенсивность на всех ландшафтных комплексах составляет от 1 до 1.5 см/сут, к июню снижаясь до 0.8–0.9 см/сут, а к концу июля составляя всего 0.5–0.1 см/сут (Василенко, 2013). Полное промерзание деятельного слоя почв на полигоне «Могот» происходит к концу декабря, в некоторые годы к концу ноября. Максимальные глубины оттаивания достигают 160 см на склонах световой ориентации и наблюдаются в начале сентября.

Для оценки результатов моделирования динамики тепла (и, косвенно, динамики влаги) в почве мы сравнили величины средневзвешенных по водосбору р. Нелки глубин протаивания и промерзания почво-грунтов на даты съемки с 1980 по 1984 гг. с аналогичными модельными данными (Рис. 46). Максимальные наблюдаемые значения СТС не превышают 150 см (Василенко, 2013), в то время как рассчитанные величины достигают 160 см, также рассчитанные сроки промерзания в некоторые годы запаздывают по сравнению с наблюдаемым, однако, в целом динамика процесса описывается моделью адекватно.

Дополнительно было проведено сравнение рассчитанной и наблюдаемой температуры почвы на глубинах 50, 100, 150 см от поверхности для площадки, расположенной на склоне теневой экспозиции за период 1979-1981 гг. (Рис. 47). Годовая амплитуда температур на поверхности почвы составила 40°C, снижаясь на глубине 150 см до 5°C. Несмотря на неполный ряд наблюдаемых данных, результаты сравнения этих значений с рассчитанными следует

признать удовлетворительными. Наибольшие расхождения характерны для величин на глубине 150 см в начале августа, когда, судя по наблюдаемой температуре почвы, данный горизонт почвенного профиля уже оттаял, а по результатам моделирования тот же горизонт находится в состоянии 0°C (Нестерова и др., 2018).

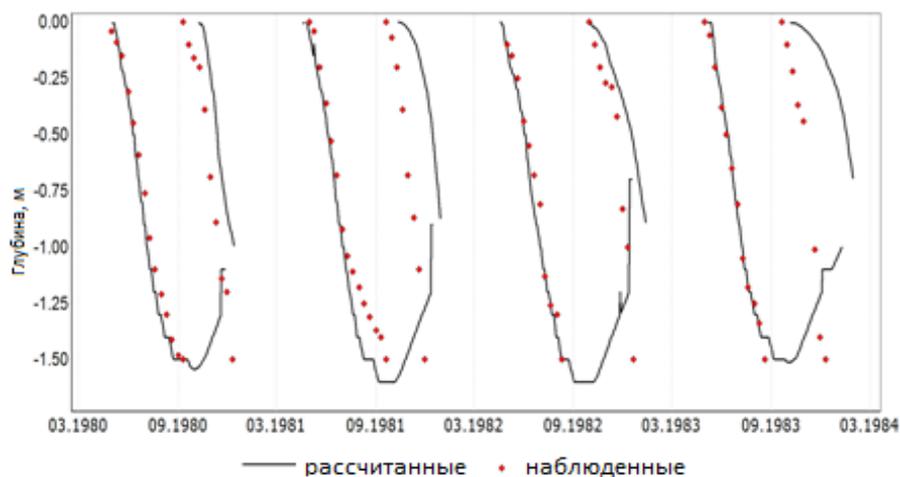


Рисунок 46 Глубины протаивания и промерзания почвогрунтов (м), 1980-1984 гг.

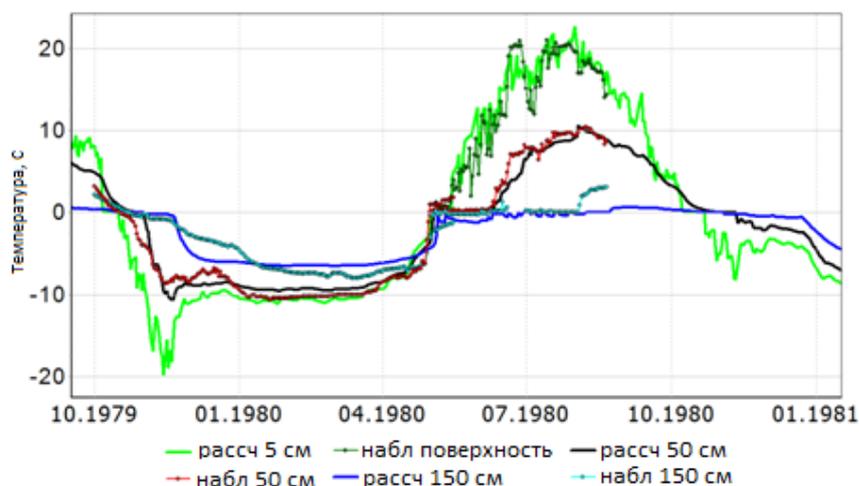


Рисунок 47 Рассчитанные и наблюдаемые суточные значения температуры грунта ($^{\circ}\text{C}$) на глубинах 5, 50, 150 см, 1980 г.

Испарение с поверхности ландшафтов. Учет испарения с поверхности водосборов полигона «Могот» производился весовым методом при помощи испарителей ГГИ-500. Также для определения суммарного испарения за годовые и месячные интервалы был использован метод водного баланса, по которому среднемноголетний годовой слой испарения с бассейна р. Нелки за период 1977-1985 гг. составил около 325 мм (Василенко, 2013). Оцененные величины параметра максимальной испаряемости с почвенно-растительного покрова составили 8, 20 и 24 10^{-10} м ($\text{гПа}\cdot\text{с}$) $^{-1}$ для вершин водоразделов, склонов и долин соответственно. Это позволило получить расчетное значение среднемноголетнего слоя испарения с поверхности водосбора 327 мм, соответствующие наблюдаемым величинам (Василенко, 2013).

В целом, результаты моделирования переменных состояний на водосборе р. Нелка показывают, что модель и набор параметров удовлетворительно воспроизводят процессы, происходящие на водосборе (Нестерова и др., 2018).

Результаты моделирования процессов формирования стока водосборов полигона «Могот». Непрерывное моделирование стока было произведено за период работы полигона «Могот» (1976-1985 гг.) для бассейнов р. Нелки с ее притоками и р. Цыганки с разработанным набором параметров. Основные компоненты водного баланса, а также рассчитанные значения критерия эффективности Нэша-Сатклиффа (NS) (Nash, Sutcliffe, 1970) представлены в Табл. 15, а гидрографы стока воды с высоким и низким значением NS на Рис. 48-52.

Таблица 15 Основные результаты моделирования, водосборы гидрологического полигона «Могот»

Река-створ	S	H	Период	Y _o	Y _s	P	E	Q _o	Q _s	NS (m/av)	NS (max, год)	NS (min, год)
Оникс	3	780	1976– 1985	243	342	607	259	0.66	1.20	0.65/0.64	0.79(1979)	0.31(1985)
Филипер	4.5	710	1976– 1985	255	346	634	285	1.37	3.02	0.55/0.40	0.77(1981)	- 0.12(1984)
Захаренок	5.8	700	1976– 1985	216	363	628	260	1.51	2.88	0.35/0.26	0.76(1978)	- 0.14(1977)
Нелка	30.8	850	1976– 1985	295	323	658	327	9.73	15.2	0.71/0.70	0.87(1981)	0.58(1985)
Цыганка	150	720	1976– 1985	–	308	617	306	–	–	–	–	–

где S – площадь водосбора, км²; H – средняя высота водосбора, м; Y_o и Y_s – наблюдаемый и рассчитанный среднемноголетний годовой слой стока, мм; P – осадки, мм; E – испарение, мм; Q_o и Q_s – максимальный наблюдаемый и рассчитанный расход, м³/с; t и av – медиана и среднее значение NS; max и min – максимальное и минимальное значение NS.

Невязка между годовыми рассчитанными и наблюдаемыми слоями стока на р.Нелка не превышает 28 мм (р. Нелка), составляя менее 10%. Для малых водосборов данное значение может превышать 100 мм (например, р. Захаренок). Мы связываем это с низким качеством учета стока на малых ручьях. В среднем годовой слой стока на ручьях составляет 238 мм, а их площадь – 46% от площади водосбора р. Нелки. Таким образом, с учетом стока р. Нелки в 295 мм на оставшуюся часть (54%) должно приходиться около 340 мм слоя стока. При условии, что данная территория характеризуется схожим распределением стокоформирующих комплексов, такая разница (более 100 мм) выглядит недостоверной.

Медианные значения годового критерия эффективности NS варьируется от 0.35 до 0.71 (Табл. 15). Удовлетворительные значения NS и значительная невязка баланса на ручьях указывают на то, что данный критерий не характеризует в точности сам результат моделирования и может являться только одним из критериев достоверности.

Наилучшее совпадение рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока характерны для бассейна р. Нелки. Максимальное значение критерия NS достигает здесь 0.87 в 1981 году.

Одной из основных задач моделирования стока на неизученных реках является расчет и прогноз максимальных расходов половодья и паводков. Для получения этих характеристик моделирование может выполняться с расчетным шагом менее суток. В данной работе вычисления производились с суточным шагом. Сравнение рассчитанных и наблюдаемых значений максимальных суточных расходов р. Нелки показывает, что наибольшие расхождения в среднем не превышают $1 \text{ м}^3/\text{с}$ (или 17%). Максимальная разница наблюдается в 1984 году, когда данное значение превысило $5 \text{ м}^3/\text{с}$ (56%). Согласно результатам моделирования основную роль в формировании стока играет почвенный и глубокий почвенный сток. Его доля в общем стоке составляет 99%.

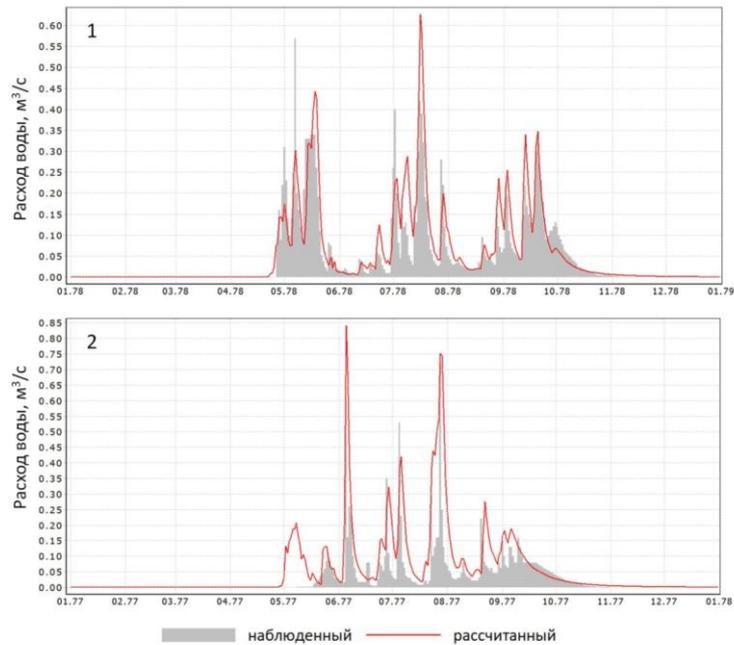


Рисунок 48 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока воды с высоким (1) и низким (2) значением NS, р. Захаренок (1978, 1977 гг.)

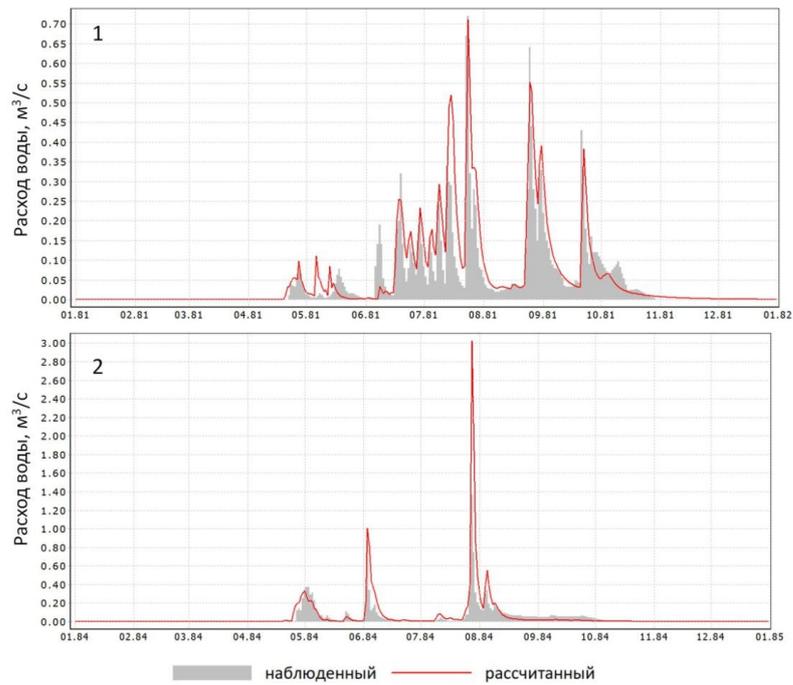


Рисунок 49 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока воды с высоким (1) и низким (2) значением NS, р. Филипер (1981, 1984 гг.)

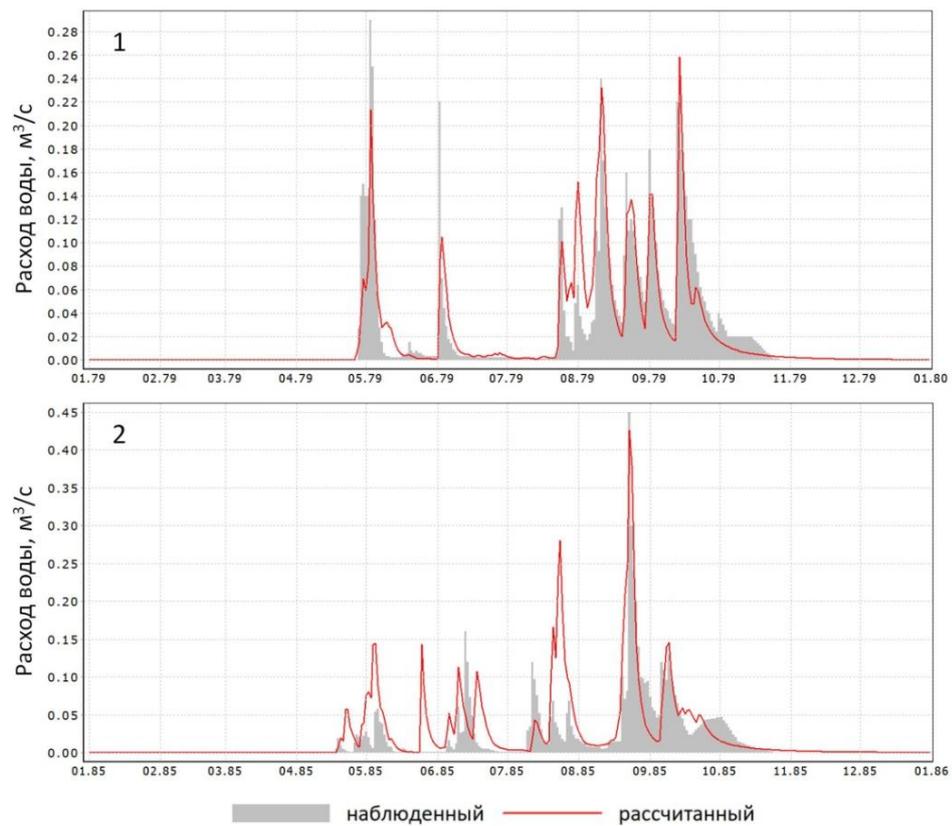


Рисунок 50 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока воды с высоким (1) и низким (2) значением NS, р.Оникс (1979, 1985 гг.)

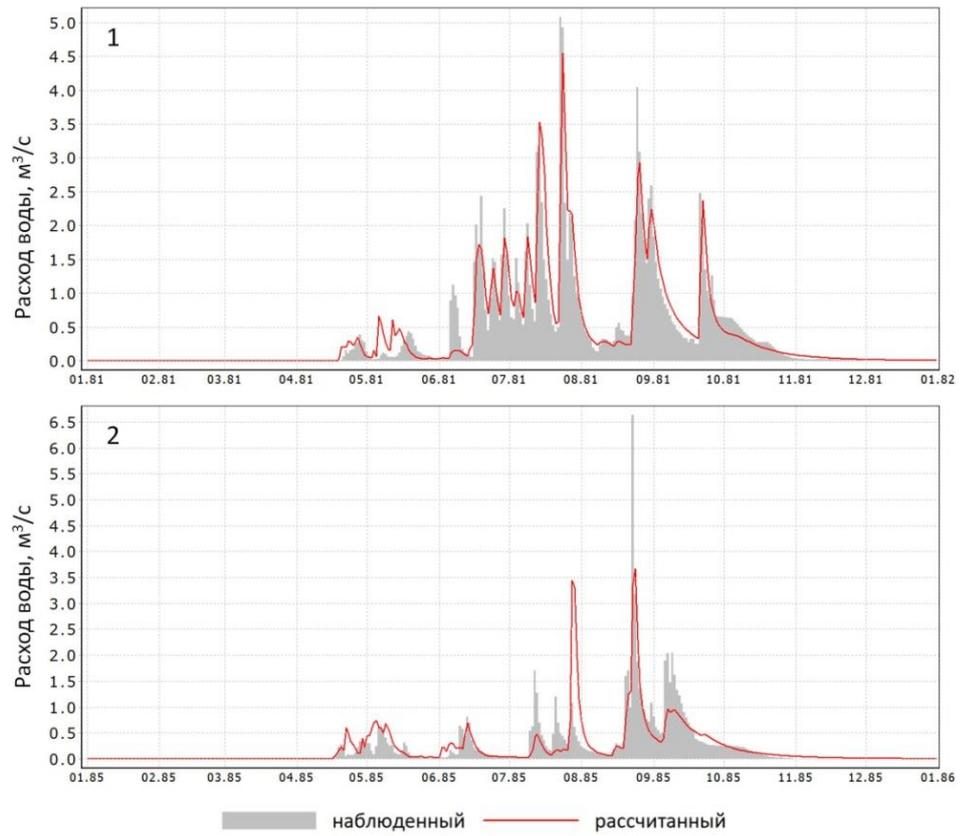


Рисунок 51 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока воды с высоким (1) и низким (2) значением NS, р. Нелка (1981, 1985 гг.)

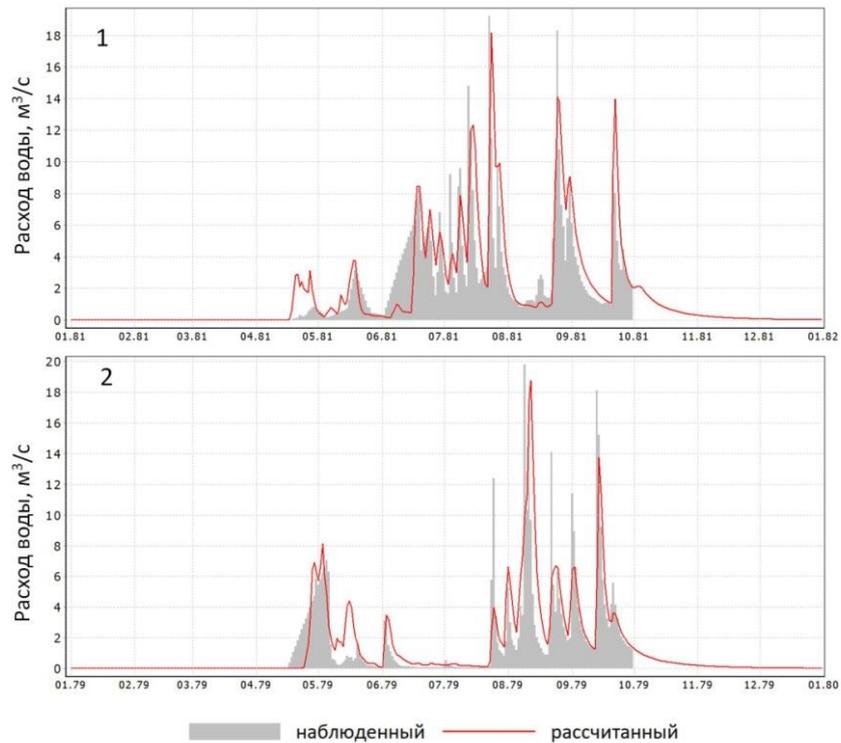


Рисунок 52 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока воды с высоким (1) и низким (2) значением NS, р. Цыганка (1981, 1979 гг.)

Таким образом, разработанный набор параметров модели «Гидрограф» применим для моделирования переменных состояния и водного баланса водосборов гидрологического полигона «Могот». Результаты моделирования за период 1976-1985 гг. являются удовлетворительными.

Апробация разработанного набора параметров в задачах оценки характеристик стока и водного баланса неисследованных горных водосборах южной криолитозоны (зона БАМ).

Для установления возможности использования разработанных параметров на неисследованных водосборах выбраны бассейны двух более крупных рек Тында и Унаха с длительными историческими рядами наблюдений в замыкающем створе, имеющие площади 4060 и 1950 км² соответственно (Рис. 53). При расчете использовались выделенные для данного региона СФК с неизменными параметрами почвенно-растительного покрова и поверхности почвы. Моделирование стока на средних реках Унаха и Тында проводилось за 1966-2012 гг. При расчетах для бассейнов этих рек за 1966-2012 гг. были использованы данные двух станций стандартной метеорологической сети, расположенных в замыкающих створах рек (Тында – 528 м, Унаха – 543 м).

Основные результаты моделирования, рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока представлены в Табл. 16 и на Рис. 54.



Рисунок 53 Объекты исследования и распределение стокоформирующих комплексов по выбранным водосборам

Таблица 16 Основные результаты моделирования, р. Унаха – с. Унаха, р. Тында – г. Тында

Река – створ	S	H	Период	Y _o	Y _s	P	E	Q _o	Q _s	NS (m/av)	NS (max, год)	NS (min, год)
Унаха – с. Унаха	1950	635	1966–1994	327	342	640	300	875	456	0.46/ 0.40	0.69(1991)	-0.41(1974)
Тында – г. Тында	4060	752	1966–2012	286	293	645	354	1450	2500	0.52/ 0.31	0.73(1972)	-2.3(2005)

где S – площадь водосбора, км²; H – средняя высота водосбора, м; Y_o и Y_s – наблюдаемый и рассчитанный среднемноголетний годовой слой стока, мм; P – осадки, мм; E – испарение, мм; Q_o и Q_s – максимальный наблюдаемый и рассчитанный расход, м³/с; t и av – медиана и среднее значение NS; max и min – максимальное и минимальное значение NS.

Разница между годовыми рассчитанными и наблюдаемыми слоями стока на больших по площади водосборах колеблется от 7 мм (р. Тында) до 15 мм (р. Унаха). Несмотря на крайнюю недостаточность метеорологической информации в бассейнах рек Унаха и Тында (по одной метеостанции на бассейн) результаты моделирования на них можно также признать удовлетворительными. Максимальные значения NS для данных водосборов составляют 0.73 и 0.69 для рр. Тында и Унаха соответственно.

Таким образом, использование разработанных на данных специальных наблюдений параметров возможно для моделирования стока различных по площади водосборов с наличием и отсутствием данных специальных наблюдений (Нестерова и др., 2018).

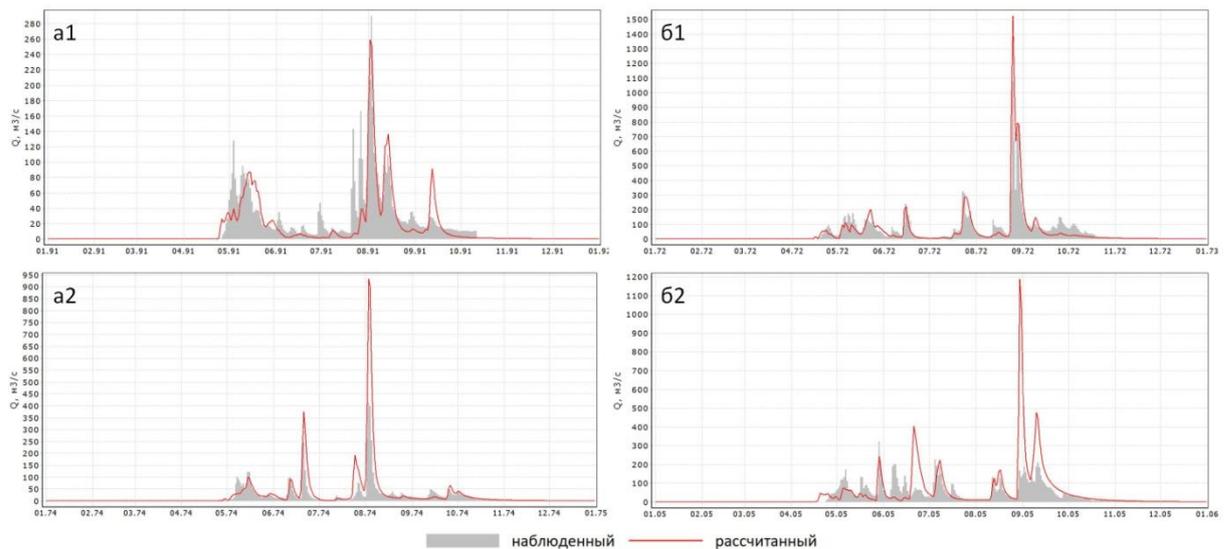


Рисунок 54 Рассчитанные и наблюдаемые гидрографы стока воды с высоким (1) и низким (2) значением NS: а – р. Унаха (1991, 1974 гг.); б – р. Тында (1972, 2005 гг.)

5.2 Параметризация гидрологической модели «Гидрограф» для горных рек Тувинской котловины. Аprobация методики в задаче расчета характеристик стока и водного баланса неизученной горной реки южной криолитозоны на примере р. Хемчик (Республика Тыва)

В Республике Тыва высокие половодья и катастрофические летне-осенние дождевые паводки регулярно приводят к возникновению чрезвычайных ситуаций, затоплению домовладений, разрушению мостовых переходов через горные реки и нарушению транспортного сообщения удаленных районов с региональными центрами. Согласно официальному portalу Республики Тыва только за 2014 год ущерб от наводнения составил более 767 миллионов рублей (<https://www.tuvaonline.ru/2014/06/16/v-tuve-obschiy-uscherb-ot-pavodka-sostavil-bolee-767-millionov-rublej.html>), причем в большей степени повреждения были нанесены объектам транспортной инфраструктуры (URL: http://gov.tuva.ru/press_center/news/activity/11161/). Задачей данного раздела работы является оценка расходов воды малой обеспеченности на основе методов математического моделирования. При исследовании возможности применения методики выбран бассейн р. Хемчик – с. Хемчик (Рис. 55). Выбор объекта обусловлен проблемами гидрологических расчетов на паводкоопасных территориях и водных объектах (в том числе, на р. Хемчик) Бай-Тайгинского, Барун-Хемчикского, Дзун-Хемчикского и Сут-Хольского районов Республики Тыва.

Параметризация модели. Тувинская котловина расположена в Саяно-Тувинской горной системе и представляет собой понижение рельефа между хребтами Западного Саяна, Шапшальским, Танну-Ола, Сангилен и Академика Обручева (Ресурсы поверхностных вод, 1973). Этот регион характеризуется контрастными физико-географическими условиями и хорошо выраженной вертикальной поясностью – ландшафты изменяются от высокогорий с ледниками до степных и даже полупустынных в долинах рек.

Река Хемчик, левый приток р. Енисей, берет начало на восточных склонах Шапшальского хребта. Общая площадь бассейна р. Хемчик составляет 27000 км². Хемчикская котловина составляет западную часть Тувинской котловины.

Максимальная высота водосбора составляет 3559 м, высота створа при впадении в р. Енисей – 519 м, средняя высота – 1720 м. В верхнем течении река имеет горный характер с узкой долиной и отвесными берегами. В котловине характер течения меняется на равнинный с извилистым руслом и небольшой скоростью.

Согласно данным из (Ресурсы поверхностных вод, 1973), питание реки Хемчик смешанное: снеговое и дождевое с большой долей подземного. Тип водного режима – дальневосточный с весенним половодьем и с ярко выраженными дождевыми паводками. Летне-осенние пики, сформированные дождями, могут в 2-5 раз превышать подъемы половодий. Летне-осенняя и зимняя межень также высокая. Доли источников питания в годовом стоке реки Хемчик

распределяются следующим образом: снеговое – 34%, дождевое – 23%, подземное – 43%. Подземное питание повышено вследствие распространения каменистых россыпей, осыпей и каменисто-щебнистых грунтов, способствующих фильтрации талых снеговых и дождевых вод (Каманин, Лиханов, 1964).

В горных частях бассейна р. Хемчик расположены небольшие ледники; максимальная площадь отдельного ледника достигает 0.86 км². Общая площадь ледников по современным данным (Raup et al., 2007) составляет 12.4 км². Ледники спускаются по склонам до отметок 2900–2600 м и обеспечивают дополнительное питание реки в летний период.

Территория характеризуется недостаточным увлажнением, умеренно теплым летом и умеренно суровой, малоснежной зимой. Среднегодовая температура воздуха за период 1966–2012 гг. колеблется от -2.3°C (метеостанция (далее - м/с) «Мугур-Аксы», 1850 м) до -1.3°C (м/с «Чадан», 723 м), достигая максимальных значений в июле +17.7°C и минимальных в январе -27.5°C (м/с «Тээли», 880 м). В холодный период характерны температурные инверсии. Устойчивый переход температуры через ноль происходит в конце марта–начале апреля. В горах переход сильно запаздывает и на высоте около 3000 м наступает только в июне. Осенью этот переход происходит в начале октября в долинах рек и в сентябре в верховьях.

Из-за обрамления Хемчикской котловины с запада и севера горными системами, влагоносные воздушные массы приходят сюда сильно обедненные влагой, большая часть которой остается на наветренных склонах Алтая и Саян. Хребет Танну-Ола задерживает остатки влаги северо-западных воздушных течений. На станциях, расположенных в долине р. Хемчик на высотах 539–880 м, выпадает от 145 (м/с «Ийме») до 267 мм (м/с «Шагонар») осадков в год. Осадки на высокогорной станции «Мугур-Аксы», расположенной вблизи водосбора р. Хемчик – на северных склонах хребта Цаган-Шибэту (Рис. 55) на значительной абсолютной высоте 1850 м составляют в среднем всего 147 мм в год (Табл. 17). Более 80% осадков выпадают в теплое время года с мая по сентябрь (данные станции «Тээли»).

Таблица 17 Основные характеристики метеорологических станций

Код станции	Название	Абсолютная высота, м	Температура воздуха, °C	Среднеголетний слой осадков, мм	Период наблюдений
36074	Большой Он	787	-1.3	509	1966-2012
36078	Тээли	880	-1.4	190	1966-2012
36085	Ийме	640	-2.4	145	1976-1988
36087	Чадан	723	-1.3	232	1976-2012
36089	Шагонар	539	-1.1	267	1986-2012
36278	Мугур-Аксы	1850	-2.3	147	1966-2012

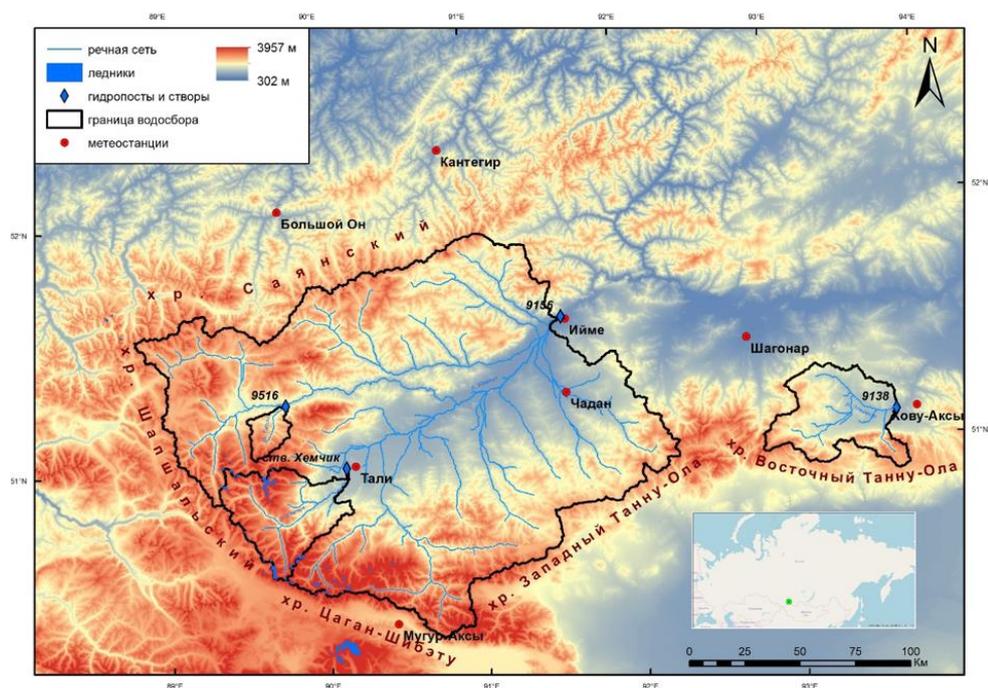


Рисунок 55 Объект исследования

До 1995 года в бассейне р. Хемчик действовали два гидрологических поста (Рис. 50, Табл. 18), на которых измерялись расходы воды: р. Тапсы – с. Кара-Холь (код поста 9516, площадь водосбора 302 км², период наблюдений 1977-1994 гг.) и р. Хемчик – с. Ийме (код 9156, 25500 км², 1975-1993 гг.) (Ежегодные данные о режиме..., 1952-2012). В настоящее время пост в с. Ийме является уровенным. За период наблюдений средний многолетний слой стока для данных рек составил 191 и 128 мм соответственно.

Объектом моделирования является водосбор р. Хемчик в створе села Хемчик. Площадь расчетного водосбора составляет 1750 км² (Рис. 55), его средняя и максимальная высота 2240 и 3606 м (г. Ан-Оюк) соответственно, данные приведены в Табл. 18. Значительная площадь ледников бассейна р. Хемчик (9.1 км²) расположена в пределах этого водосбора.

Таблица 18 Основные характеристики водосборов

Код поста	Река – створ	S	H1/H2	R	Q	G	Y ₀	P
-	Хемчик – устье	27000	3606/ 1720	13.7	-		-	-
9156	Хемчик – с. Ийме	25500	3606/ 1756	13.6	943	1986	128	1975-1993
-	Хемчик – с. Хемчик	1750	3606/ 2240	18.7	261*	2002*	230*	*1966-2012
9516	Тапсы – с. Кара-Холь	302	3091/ 2097	15.7	49	1980	191	1977-1994
9138	Элегест – с. Хову-Аксы	1850	2602/ 1305	10.2	157	2003		1969 – наст. (нет данных 1994-2000)

где S – площадь водосбора, км²; $H1$ и $H2$ – максимальная и средняя высота водосбора, м; R – средневзвешенный уклон водосбора, град; Q – максимальный срочный расход воды, м³/с; G – год наблюдения максимального срочного расхода; Y_0 – средний годовой слой стока, мм; P – период наблюдений за расходами воды. *Данные моделирования

Из-за отсутствия каких-либо данных специальных наблюдений оценка параметров проводилась на основе экспертной оценки, справочных данных, результатов исследований в схожих условиях и общих представлений о водном балансе исследуемого водосбора, а их верификация – с использованием данных о ежедневных расходах воды на двух гидрологических постах (Табл. 18).

Для выделения СФК в проекте ГИС были использованы почвенная (Карта почв..., 1988) и ландшафтная (Ландшафтная карта..., 1980) карты. Основными ландшафтами являются гольцы, горные южно-сибирские лиственничные и кедрово-лиственничные леса и опустыненные степи (Курбатская и др., 2018). Среди почв преобладают каштановые буроземы и подбуры. В верхних частях водосборов встречаются гольцы и высокогорные почвы. Также в долинах рек располагаются аллювиальные почвы. Породообразующие породы плотные и щебнистые.

На основе картографической информации было произведено обобщение схожих ландшафтов. Далее по стандартным спутниковым снимкам ArcGIS «World Imagery» устанавливалось соответствие данных ландшафтной карты с реальными ландшафтами. Все ландшафты легко визуально дешифрировались, поэтому определение СФК велось в основном по спутниковым снимкам. На водосборе р. Тапсы – с. Кара-Холь выделение СФК проводилось также по ориентации склона из-за четкого разделения: на склонах южной экспозиции расположены степи, на склонах северной – хвойные леса.

Все разнообразие ландшафтов и почв было обобщено в 4 СФК. Гольцы и тундры в верхней части водосборов располагаются в среднем до отметок 2000 м. Хвойные леса находятся в пределах от 2000 м до 1300 м, степь от 1300 м и ниже. В долинах рек также выделялся ландшафт «долинные луга». Однако из-за небольшого процентного соотношения (не более 3% площади водосборов) он был объединен с СФК «степи». В пределах водосбора р. Хемчик до створа Ийме

гольцы занимают 23% площади, хвойные леса – 49%, степи – 28%. В бассейне реки Тапсы до с. Кара-Холь увеличивается доля гольцов (33%) и уменьшается доля степей (18%). Водосбор реки Хемчик до створа Хемчик имеет наибольший процент высокогорных ландшафтов среди исследуемых водосборов – 36%, на хвойные леса приходится 48%, на степи 16% (Рис. 56), данные приведены в Табл. 19. С уменьшением доли высокогорных ландшафтов уменьшается также средневзвешенный уклон водосборов (Табл. 19). В процессе выделения СФК не учитывались различные типы леса и соответствующие им специфические условия. Северные склоны хребта Танну-Ол покрыты темнохвойными лесами, часто с густым моховым покровом, под которым лежит многолетнемерзлая толща. Склоны южной экспозиции характеризуются сухими почвами без наличия мерзлоты, на которых господствуют светлые лиственничники (Каманин, Лиханов, 1964).

На Рис. 56 отражены результаты схематизации СФК для водосборов разного размера. На общей схеме в бассейне р. Тапсы присутствуют только два СФК, на более подробной врезке видны азональные (на выраженных южных склонах) вкрапления третьего «степного» СФК.

Модель «Гидрограф» содержит в себе блок алгоритма, описывающий водный баланс ледников и их вклад в формирование гидрографа стока (Виноградов, Виноградова, 2010). Однако, в связи с отсутствием какой-либо проверочной информации, ледники не выделялись в особый СФК и моделирование ледникового питания не проводилось. Взамен ледники были концептуально представлены в виде снежников, сохраняющихся в течение года на горных вершинах. Это не противоречит результатам исследований (Ганюшкин и др., 2011) в горных массивах северо-западной части внутренней Азии (Монгун-Тайга, Таван-Богд-Ола и др.) о современной тенденции трансформации малых ледников в снежники и каменные глетчеры.

Для Хемчикской котловины не существует никаких данных о распределении водного баланса кроме общих указаний на то, что сток рек формируется в высокогорной части водосбора, так как атмосферные осадки, выпадающие в котловине, практически полностью расходуются на испарение (Ресурсы поверхностных вод, 1973). На основе результатов исследований радиационного баланса и процессов испарения в горном бассейне реки Хараа-гол (Северная Монголия) авторы в работе (Minderlein, Menzel, 2014) делают выводы о том, что в степных ландшафтах, в отличие от залесенных склонов, сток воды не формируется.

Параметризация выделенных СФК носит предельно схематический характер, она основывалась на нескольких предположениях:

- В пределах СФК «степь» коэффициент стока составляет менее 0.1, речной сток формируется только во время снеготаяния, когда почва находится в промерзшем состоянии. В

течение лета все осадки расходуются на испарение. Годовой слой осадков около 200 мм. Слой стока не более 10-20 мм.

- Основная часть осадков, выпадающих в зоне СФК «гольцы», расходуется на речной сток, в основном – его подземную составляющую. В высокогорной зоне южных склонов Западных Саян выпадает 400 мм, северных склонов Танну-Ола и восточных склонов Шапшальского хребта – 500 мм осадков (Каманин, Лиханов, 1964). Коэффициент стока составляет 0.7-0.8 (Копысов, 2005).

- СФК «хвойный лес» является промежуточным ландшафтом – его вклад в формирование стока в два раза меньше, чем СФК «гольцы». В то же время, в лесном поясе сумма осадков может быть в 2-3 раза выше, чем в «степном» СФК (Каманин, Лиханов, 1964). Среднее количество осадков 350 мм. Коэффициент стока 0.50 (Копысов, 2005).

Большая часть речного стока формируется почвенным и подземным путем. Доля поверхностного стока мала и составляет не более 5-10% от общего.

Годовое распределение осадков в пределах водосборов для репрезентативных точек (РТ) было задано согласно принятым закономерностям, также были откалиброваны коэффициенты испарения СФК.

Входной информацией для моделирования являлись суточные данные о температуре и влажности воздуха, осадках на метеорологических станциях. Интерполяция осадков производилась с учетом коэффициента отношения годового количества осадков на РТ и метеорологической станции. При интерполяции температуры и влажности воздуха производилась корректировка значений на величину их высотного градиента с учетом инверсий в зимний период.

Таблица 19 Распределение СФК в пределах водосборов

СФК, %	р. Тапсы – с. Кара-Холь	р. Хемчик – с. Ийме	р. Хемчик – с. Хемчик	р. Элегест – с. Хову-Аксы
1 «гольцы»	33	23	36	8
2 «лес»	49	49	48	48
3 «степи»	18	28	16	44

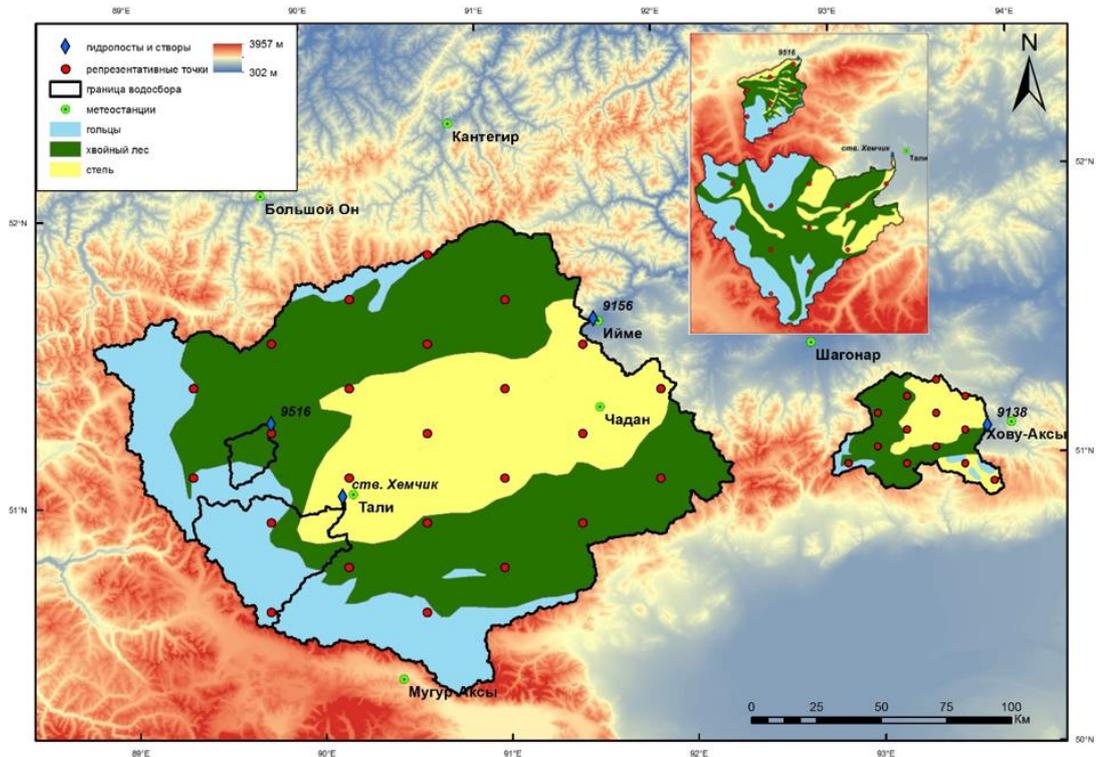


Рисунок 56 Схематизация водосборов

Результаты моделирования процессов формирования стока. Проведено суточное моделирование гидрографов стока на двух водосборах различного масштаба для верификации предложенной концептуальной схемы процессов формирования стока. Периоды моделирования определялись наличием совместных рядов входной метеорологической информации и данных наблюдений за стоком, данные приведены в Табл. 20.

Для моделирования стока в бассейне р. Тапсы – с. Кара-Холь (средняя высота водосбора 2100 м) использовались данные метеорологической станции «Тээли» (высота 880 м). За период 1980-1993 гг. рассчитанные элементы годового водного баланса распределились следующим образом: осадки – 430 мм, сток – 180 мм, испарение – 250 мм. В этот же период наблюдаемый слой стока составил 200 мм. Все величины округлены до десятков мм. Критерий эффективности Нэша-Сатклиффа (NS) изменялся от отрицательных значений до 0.68 (медианное значение 0.30, среднее -0.07). Низкие значения NS обусловлены высокой степенью неопределенности входных данных об осадках (Nesterova et al., 2019b).

Для расчета стока в бассейне р. Хемчик в створе Ийме (площадь 25500 км²) были использованы данные шести метеорологических станций. Расчет проводился за период 1976-1988 гг. Рассчитанный слой стока составил 120 мм, что оказалось на 8% ниже наблюдаемой величины (130 мм). Рассчитанные значения осадков и испарения составили 390 и 270 мм соответственно. Медианное и среднее значения критерия NS достигли 0.60 и 0.48. Пример

рассчитанных и наблюдаемых гидрографов стока с высокими и низкими критериями качества для р. Тапсы – с. Кара-Холь и р. Хемчик в створе Ийме представлены на Рис. 57.

Таблица 20 Водный баланс и критерии эффективности

Река – створ	S	Период	Y _o	Y _s	P	E	NS (m/av)	NS (max, год)	NS (min, год)
Тапсы – с. Кара-Холь	302	1980-1993	200	180	430	250	0.30/-0.07	0.68 (1987)	-1.9 (1981)
Хемчик – с. Ийме	25500	1976-1993	130	120	400	270	0.60/0.48	0.71 (1979)	-0.03 (1978)
Хемчик – с. Хемчик	1750	1966-2012	--	230	470	240	-	-	-

где S – площадь водосбора, км²; Y_o и Y_s – наблюдаемый и рассчитанный среднееголетний годовой слой стока, мм; P, E – рассчитанные осадки и испарение, мм; *t* и *av* – медиана и среднее значение NS; *max* и *min* – максимальное и минимальное значение NS.

Верификация результатов моделирования проведена также на основе сравнения рассчитанных и наблюдаемых кривых повторяемости максимальных расходов воды (Рис. 58). Для р. Тапсы рассчитанная кривая в пределах повторяемости чаще 15 лет лежит незначительно выше эмпирической – рассчитанные расходы завышены на 10-15% по сравнению с наблюдаемыми величинами. В области повторяемости реже 15 лет рассчитанная кривая имеет плавную выположенную форму, в то время как эмпирическая кривая резко поднимается вверх. Максимальная наблюдаемая величина расхода 49 м³/с занижена на 5-8% на рассчитанной кривой. Однако, согласно Ежегодным данным о режиме и ресурсах поверхностных вод суши (1980) «максимальный расход воды 1980 г. вычислен «по кривой, приближенно экстраполированной от расхода 4.62 м³/с». На Рис. 59 приведен график связи уровней и расходов за 1980 г. Отметим, что изменение величины максимального расхода на ±25% не уменьшает величину достоверности аппроксимации кривой уровень-расход R² даже на 1%.

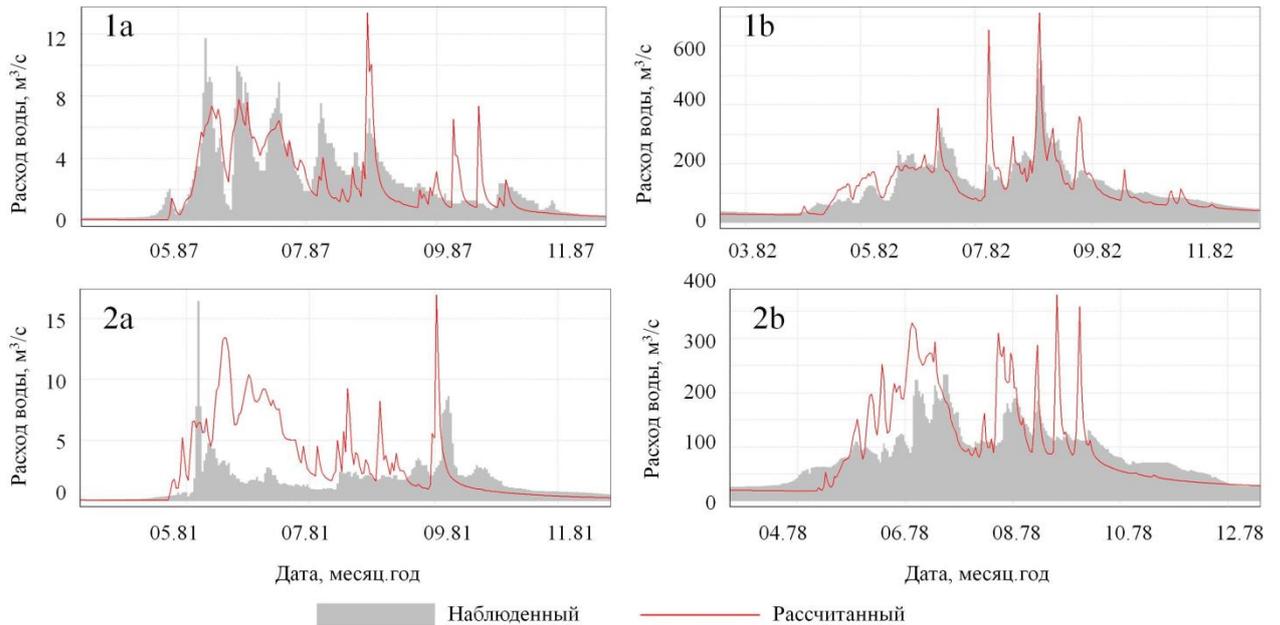


Рисунок 57 Пример рассчитанного и наблюдаемого гидрографа стока с высоким значением критерия эффективности (1) и низким (2): а – р. Тапсы – с. Кара-Холь; б – р. Хемчик – с. Ийме

Для р. Хемчик в створе Ийме рассчитанная кривая значительно превышает эмпирическую кривую в пределах повторяемости до 10 лет – разность величин составляет до 250 м³/с (около 30%). В районе повторяемости реже 10 лет разность величин значительно падает до 5-7%. Таким образом, расходы малых повторяемостей имеют большую сходимость. Одной из явных причин завышения наблюдаемых расходов воды в створе р. Хемчик – с. Ийме является необходимость корректировки данных наблюдений за осадками на метеорологических станциях, расположенных в Хемчикской котловине, в сторону значительного увеличения (до 2-2.5 раз) в высокогорных районах для моделирования водного баланса водосбора. В горах количество дней с осадками в теплый период (с мая по сентябрь) может на 20-40% превышать количество дней с осадками в котловине, поэтому суточные суммы осадков должны быть распределены в течение сезона более равномерно, чем моделируются, а максимальные суточные суммы осадков имеют более низкую вероятность.

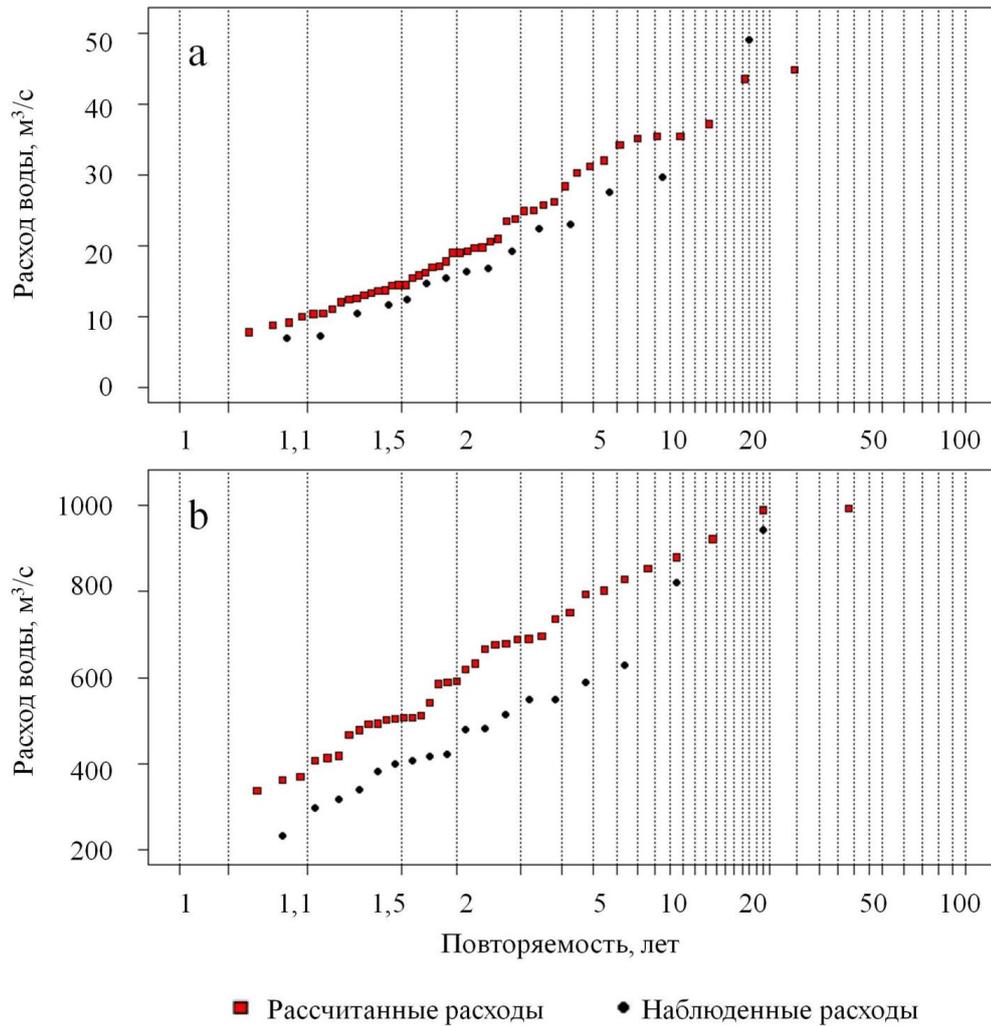


Рисунок 58 Кривые повторяемости максимальных расходов воды по наблюдаемым и рассчитанным рядам максимальных расходов: а – р. Тапсы – с. Кара-Холь (1979-1993 гг. наблюдаемые, 1966-2012 гг. рассчитанные); б – р. Хемчик – с. Ийме (1975-1993 гг. - наблюдаемые, 1976-2012 гг. – рассчитанные)

Моделирование стока воды для водосбора реки Хемчик – с. Хемчик проводилось за период 1966-2012 гг. с использованием метеорологических данных наблюдений на станции «Тээли». В среднем за этот период по данным моделирования слой осадков составил 470 мм, испарения и стока – 240 и 230 мм соответственно. Примеры рассчитанных гидрографов стока за многоводный (2002) и маловодный (1978) годы представлены на Рис. 60. Максимальный рассчитанный среднесуточный расход составил 260 м³/с (6 июля 2002 г.). Рассчитанное суммарное количество осадков 5 июля составило 85.4 мм. Величины слоев суточного стока за 5 и 6 июля достигли 10.3 и 13.0 мм соответственно.

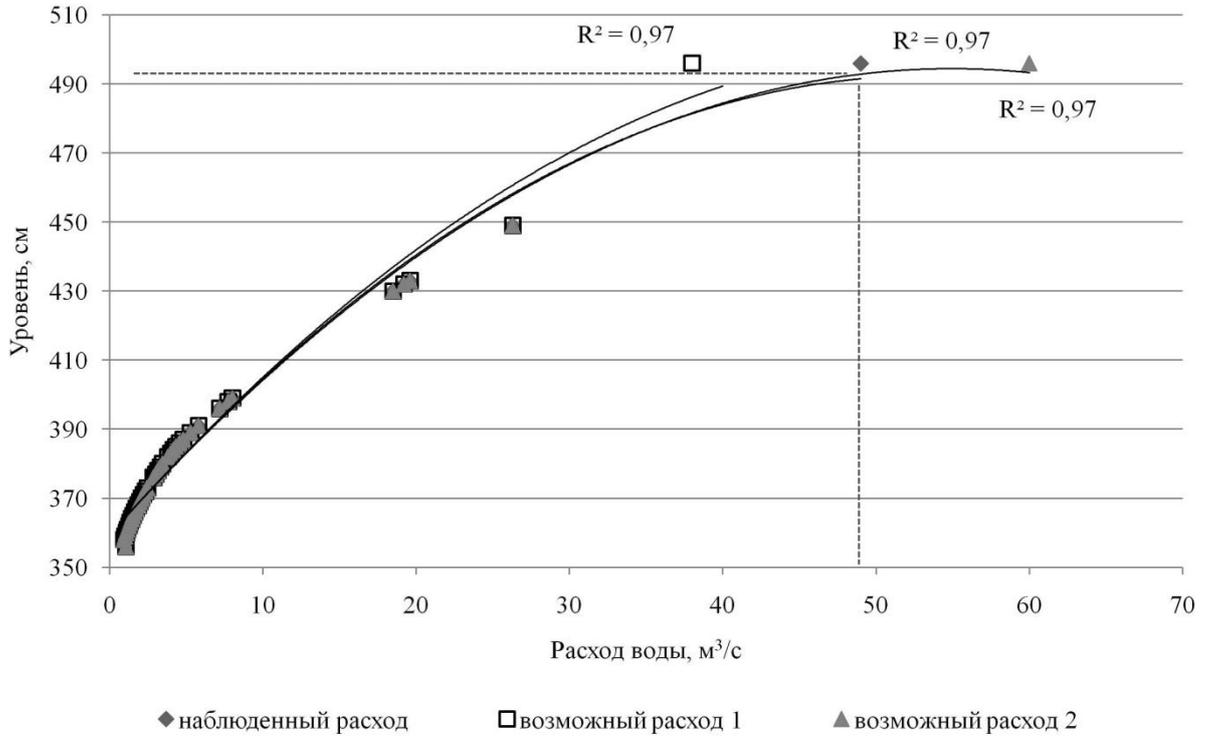


Рисунок 59 Кривая связи расходов и уровней, р. Тапсы – с. Кара-Холь, 1980 г. Изменение величины максимального расхода на $\pm 25\%$ не меняет величину достоверности аппроксимации кривой уровень – расход R^2

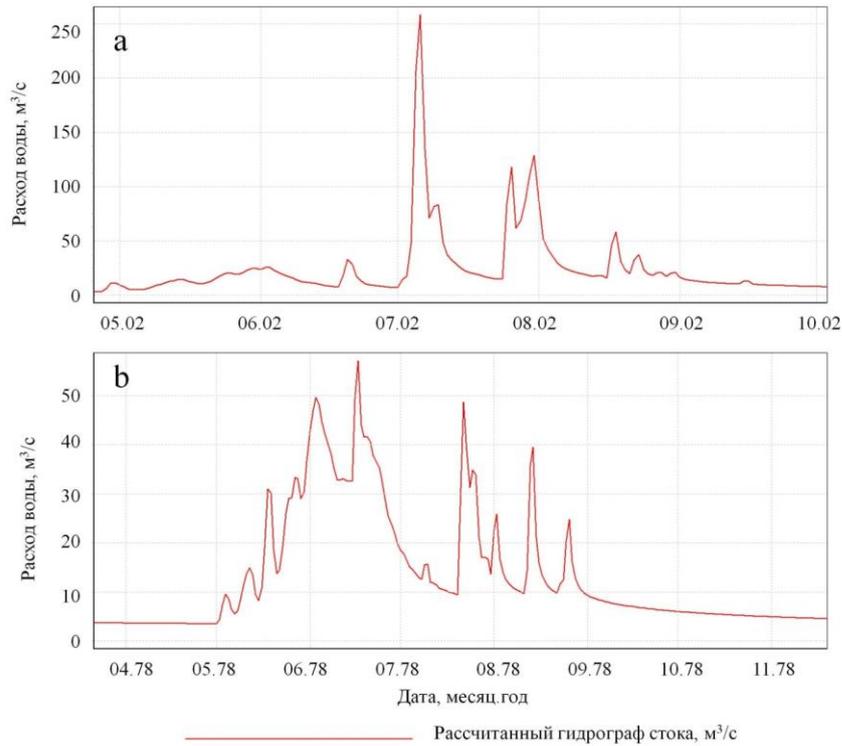


Рисунок 60 Рассчитанный гидрограф стока: а – многоводного (2002) и б – маловодного (1978) годов, р. Хемчик – с. Хемчик

В работе (Борщ др., 2015) показано, что для расчетов срочных расходов воды могут быть использованы эмпирические зависимости максимального срочного расхода воды от среднесуточной величины. На Рис. 61 представлена зависимость максимальных месячных расходов воды в теплый период года, выраженных в единицах модуля стока ($\text{л км}^{-2}\text{с}^{-1}$), для рек Тапсы, Элегест и Хемчик в створе Ийме. Для р. Тапсы модуль стока максимальных расходов достигает $100 \text{ л км}^{-2}\text{с}^{-1}$, для рр. Элегест и Хемчик – $40 \text{ л км}^{-2}\text{с}^{-1}$. Зависимость суточных и срочных расходов имеет линейный характер. Достоверность аппроксимации R^2 для всех трех рек превышает 0.98. Среднее отклонение величин составляет 5.2% (медиана 3.4%), максимальное отклонение составило 34% для р. Элегест для расхода воды 90% обеспеченности. Таким образом, для рек разного размера в исследуемом регионе использование суточных расходов воды в качестве срочных максимальных является обоснованным.

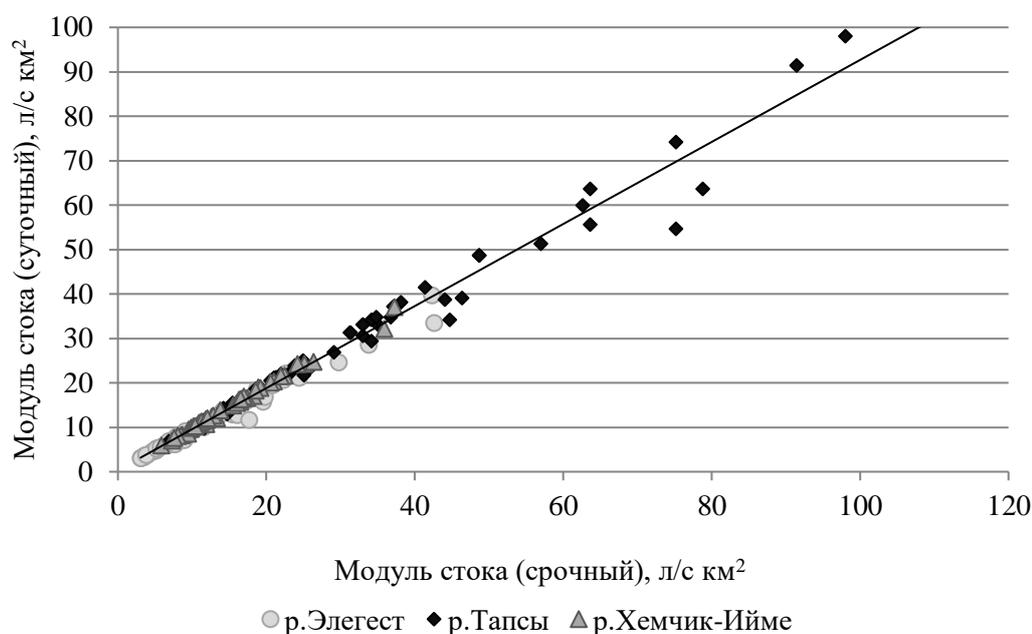


Рисунок 61 Зависимость срочного модуля стока от суточного для рек с наличием данных наблюдений

В работе Макарьевой и др. (2019а) проведены расчеты максимальных расходов различной обеспеченности на основе методов СП 33-101-2003 при использовании р. Элегест, как реки аналога. На Рис. 62 представлено сравнение кривых обеспеченностей максимальных расходов паводков, полученных на основе математического моделирования и методов СП 33-101-2003. Несовпадение кривых составляет $60\text{-}80 \text{ м}^3/\text{с}$ для обеспеченностей $90\text{-}60\%$ и более $100 \text{ м}^3/\text{с}$ (полтора – два раза) для $40\text{-}10\%$ -х обеспеченностей. Наилучшее совпадение характерно для 0.5% . Кривая, рассчитанная по СП 33-101-2003, уходит резко вверх и превышает эмпирическую кривую, построенную на основе смоделированных величин, на значении 0.1% .

Несмотря на соответствие водосборов рр. Хемчик и Элегест требованиям СП 33-101-2003 для рек-аналогов, условия формирования стока на них значительно отличаются. Например,

средняя и максимальная высота водосбора р. Элегест почти на 1000 м ниже, чем в бассейне р. Хемчик. Бассейн р. Элегест имеет гораздо меньший уклон водосбора, а также более значительную долю степных (48% – р. Элегест, 16% – р. Хемчик) и меньшую долю высокогорных ландшафтов (8% – р. Элегест, 36% – р. Хемчик).

Помимо этого, отличительной чертой водосбора реки Хемчик до створа Хемчик является наличие ледников, не характерное для водосбора р. Элегест. Максимальные модули стока, наблюдаемые на р. Элегест, характерны для р. Хемчик в створе Ийме и в два раза ниже, чем на реке Тапсы (Рис. 62). Таким образом, водосбор реки Элегест не является «достаточно высокогорным» аналогом для водосбора р. Хемчик в створе Хемчик.

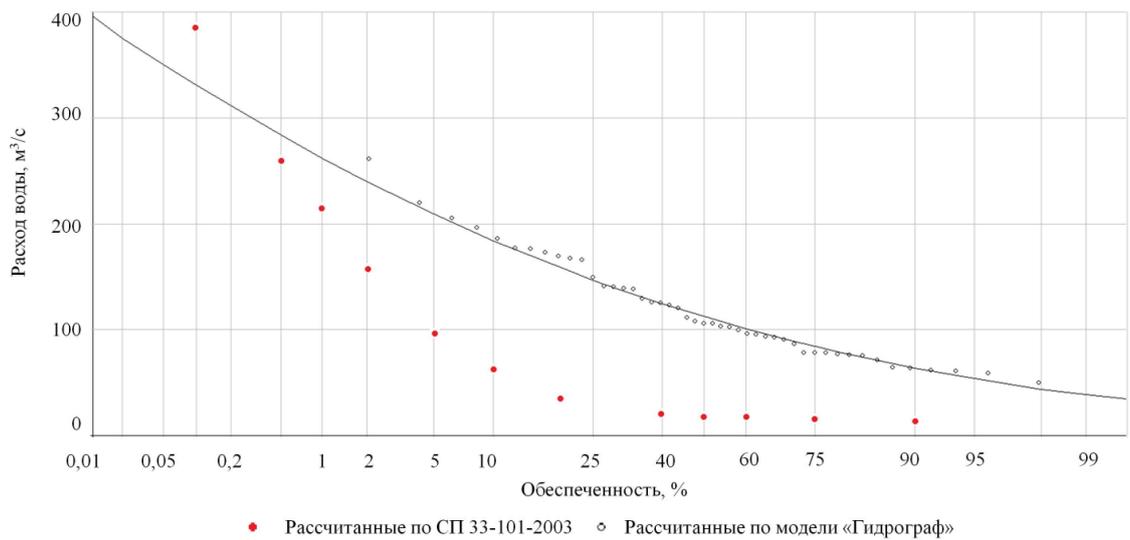


Рисунок 62 Кривые обеспеченности максимальных расходов воды паводков, рассчитанные на основе расходов модели «Гидрограф» и методами СП 33-101-2003. р. Хемчик – створ Хемчик

Проблема выбора рек-аналогов характерна для других регионов России. В работе (Макарьева и др., 2017) на примере расчетов на малых водосборах Восточной Сибири и Дальнего Востока авторы показали, что выбор рек-аналогов, обеспеченных современными данными наблюдений, сильно ограничен. Рассчитанные гидрологические характеристики могут отличаться в разы при использовании нескольких рек-аналогов, одновременно соответствующих требованиям СП 33-101-2003. В большей степени это касается горных рек. Использование методов математического моделирования может служить полезным дополнением при решении практических задач в слабоизученных регионах.

5.3 Параметризация гидрологической модели «Гидрограф» для горных рек Восточных Саян. Апробация методики в задаче расчета характеристик катастрофического паводка на примере р. Ия (Иркутская область)

Иркутская область также является одним из наиболее паводкоопасных регионов России, расположенных в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов. В зонах возможного затопления в Иркутской области расположены 222 населенных пункта, в том числе восемь городов (Тулун, Киренск, Нижнеудинск, Иркутск, Усть-Кут, Черемхово, Зима, Ангарск). Площадь периодически затапливаемых пойменных земель превышает 25 000 км², или около 4% от общей площади региона (Кичигина, 2018). На территории Иркутской области наводнения могут возникать вследствие половодья и дождевых паводков, а также заторов и зажоров. Часто наводнения имеют смешанный генезис — на половодье накладываются дожди или заторы, а дождевые паводки в некоторые годы усугубляются селями. Крупные наводнения в южной части Иркутской области наблюдались в 1984, 1996 и 2001 гг. (Кичигина, 2018). Несмотря на высокую повторяемость разрушительных паводков, в Атласе природных и техногенных опасностей и рисков (Атлас природных и техногенных опасностей..., 2007), юг Иркутской области отнесен к зоне умеренно опасных наводнений.

В конце июня 2019 года на реках Иркутской области, стекающих с гор Восточного Саяна (Ия, Уда, Бирюса и Ока) прошли экстремальные дождевые паводки, которые стали самыми разрушительными в регионе за всю историю наблюдений. Наибольший подъем уровня воды был зафиксирован на посту р. Ия – г. Тулун (с 474 до 1387 см за трое суток) в период первого паводка, 26 июня – 5 июля 2019 г. Зафиксированный уровень воды более чем на 5 м превысил опасную отметку 850 см и на более чем 2.5 м – исторический максимум 1133 см, отмечавшийся в 1984 г. Паводок привел к катастрофическому затоплению г. Тулун и других населенных пунктов, расположенных в пойме р. Ия. Всего при наводнении пострадали 107 населенных пунктов, погибли 25 человек и 8 пропали без вести (<https://ria.ru>). По предварительным данным, материальный ущерб от паводка в регионе составил 29 млрд. руб. (<https://www.kommersant.ru>). В период 28 июля – 4 августа 2019 г. на р. Ия произошел еще один значительный паводок (максимальный уровень воды достиг отметки 1121 см). Он по масштабу сопоставим с паводком 1984 года, до 2019 года считавшимся максимальным.

Задачей данного раздела работы являлся анализ факторов, приведших к формированию катастрофического паводка в июне 2019 г., а также расчет и оценка характеристик паводков в июне и июле 2019 г. на р. Ие при использовании модели «Гидрограф», данных наблюдений метеорологических станций и прогноза по глобальной модели погоды ICON.

Параметризация модели. Река Ия берет начало на северных склонах Восточного Саяна высотой до 2789 м (г. Холба) при слиянии рек Холбы и Хиаи. Водораздельная линия бассейна р.

Ия проходит на юго-западе по Удинскому хребту, на юге – Окинскому хребту, на северо-западе – Бирюсинскому хребту. В орографическом отношении территория бассейна делится на две части: горную от истока до Передового хребта и равнинную. В верховье река имеет горный характер, в нижней части бассейна русло становится относительно прямолинейным с широкой поймой. Водный режим реки характеризуется невысоким весенне-летним половодьем, интенсивными дождевыми паводками, следующими друг за другом, и низкой зимней меженью (Ресурсы поверхностных вод, 1972).

Климат территории резко континентальный, он определяется положением в центре материка, значительной приподнятостью над уровнем моря и сложностью орографии: зима морозная, малооблачная с небольшим количеством осадков, что обусловлено образованием над территорией мощных малоподвижных антициклонов; лето короткое относительно жаркое, в это время над территорией развиваются циклоны, с которыми связано выпадение значительного количества осадков (Ресурсы поверхностных вод, 1972). Среднегодовая температура воздуха на метеорологической станции (м/с) Икей за период 1966-2012 гг. составила -1.1°C . Осадки в течение года распределены неравномерно, около 80% годовой суммы выпадает в летний период. Дожди летом бывают как обложного, так и ливневого характера. Годовая сумма осадков колеблется от 350 мм (м/с Куйтун) до 760 мм (м/с Белозиминская) (Рис. 63).

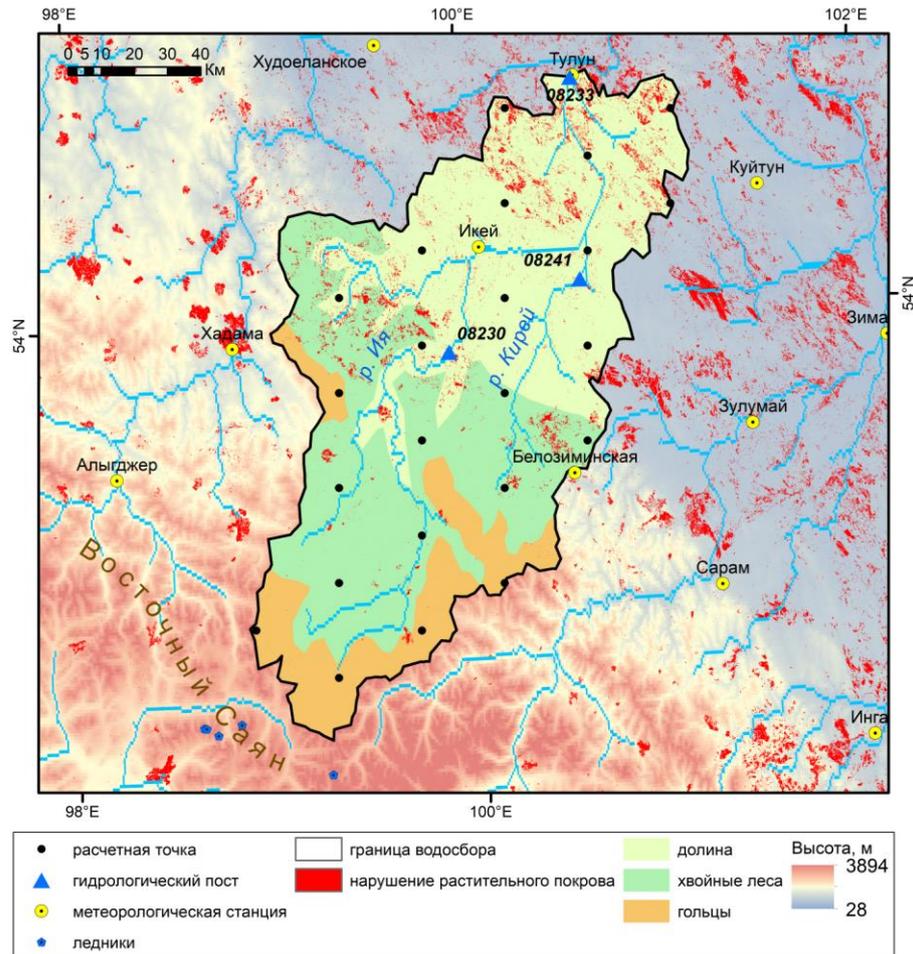


Рисунок 63 Схема бассейна р. Ия – г. Тулун

Водосбор р. Ия относится к зоне темнохвойной тайги. В горах значительные территории занимают гольцы – скалистые склоны без растительности (Атлас Иркутской области, 1962). В высокогорных частях бассейна встречаются единичные скопления «вечного» снега, однако ледники находятся за пределами водосбора (Рис. 63) (Raup et al., 2007).

В бассейне р. Ия в настоящее время действуют три гидрологических поста, на которых проводятся измерения расходов воды. Их характеристики приведены в Табл. 21. Гидрологический пост р. Ия – г. Тулун расположен в 4 км ниже г. Тулуна, в 1.2 км ниже железнодорожного моста. Площадь водосбора составляет 14500 км². Наблюдения за стоком ведутся с 1921 года, а непрерывные данные по максимальным уровням и расходам воды опубликованы с 1936 года (Автоматизированная информационная система, 2008-2019; Ежегодные данные о режиме и ресурсах..., Т.1, В.13, 1981-2000; Ежегодные данные о режиме и ресурсах..., Т.7, В.2-4, 1952-1980). Основная доля стока формируется в горной части водосбора, так на 8090 км² (56% площади водосбора) приходится около 280 мм стока, а на оставшуюся равнинную часть около 50 мм в год, что в сумме составляет 330 мм в створе гидрологического поста в г. Тулун.

В пределах бассейна р. Ия в настоящее время действует две м/с – Икей и Тулун, обе станции расположены в равнинной части водосбора. До 1999 года на восточной границе водосбора действовала м/с Белозиминская (высота 755 м), на которой годовое количество в 1.6-1.8 раз превышало количество осадков на ныне действующих станциях. Совмещенные графики осадков на метеостанциях и гидрографов стока в период максимальных паводков на р. Ия за исторический период в 1980 и 1984 гг. указывают на значительную роль горной части территории в формировании экстремальных расходов воды. Таким образом, основная стокоформирующая часть водосбора уже более 20 лет является полностью неосвещенной данными наблюдений за осадками и другими метеорологическими величинами.

Таблица 21 Основные характеристики гидрологических постов

Код поста	Река – створ	S	H ₁ /H ₂ /H ₃	R	Q ₁ /Q ₂	G	Y _o	P
8230	Ия – Аршан	5140	2781/570/1483	4.7	867(1470)	2010	534	1963-2017
8233	Ия – Тулун	14500	2781/436/979	2.4	4400/4040	1984	331	1941-2017
8241	Кирей – Уйгат	2950	2485/485/873	4.4	436(439)	2010	443	1959-2017

где S – площадь водосбора, км²; H₁, H₂, H₃ – максимальная, минимальная и средняя высота водосбора, м; R – средневзвешенный уклон реки, ‰; Q₁, Q₂ – максимальный срочный и суточный расход воды за указанный период наблюдений, м³/с; G – год наблюдения максимального расхода; Y_o – средний годовой слой стока, мм; P – период наблюдений за расходами воды.

В целях параметризации модели «Гидрограф» бассейн р. Ия был разбит на три стокоформирующих комплекса (СФК) – гольцы, темнохвойный лес и долины рек (Рис. 63). Выделение СФК проводилось на основе спутниковых снимков Landsat и ландшафтной карты СССР (Ландшафтная карта СССР, 1980). Данный подход позволяет расширять информацию, полученную с помощью снимков, подробными описаниями ландшафтов.

Гольцовый комплекс сформирован альпинотипными горами с распространенными на них тундрами, покрытыми стлаником, и голыми скалами. Темнохвойный лес состоит из кедровой сосны, пихт и елей на горных склонах. Долины рек представляют собой поймы и надпойменные террасы с лугами и злаково-разнотравными лесами с участками низинных болот. В пределах гольцов формируется быстрый сток с отсутствием перехвата влаги растительностью и малым задержанием влаги в почво-грунтах, хвойные леса, наоборот, отличаются большой способностью перехвата и формированием почвенного стока. В пределах долинного комплекса значительную роль играет испарение, величина которого может превышать 80% от годового количества осадков.

Водосбор р. Ия также был покрыт регулярной сеткой репрезентативных точек (РТ), в узлы которой в процессе моделирования с учетом высотных градиентов интерполируются данные метеорологических станций.

Параметры СФК определялись на основе ранее выполненных работ (Макарьева и др., 2019а; Макарьева и др., 2020) с использованием справочных материалов о водно-физических свойствах почвогрунтов (Агрогидрологические свойства почв Иркутской области, 1968), а также материалов наблюдений на опорных станциях комплексной водобалансовой и агрометеорологической сети почвенно-испарительных и снего-испарительных пунктов (Материалы наблюдений опорных станций, 1970-1985). В настоящей работе были использованы сведения станции Солянка (Красноярский край, 365 км от г. Тулун) об агрогидрологических свойствах почвы, глубине протаивания и промерзания, испарении с поверхности суши и снежного покрова.

Результаты моделирования процессов формирования стока. Для верификации модели Гидрограф проведено моделирование стока для трех действующих створов (Табл. 22) с суточным шагом. Период моделирования 1970-1996 гг. определялся наличием метеоданных для 7 станций, в том числе м/с Белозиминской, наиболее репрезентативной для горной части водосбора и закрытой после 1996 г. (Рис. 63).

Результаты моделирования элементов водного баланса и величины критерия эффективности моделирования Нэша-Сатклиффа (NS) (Nash, Sutcliffe, 1970) представлены в Табл. 22.

Рассчитанные величины среднемноголетнего годового слоя осадков составили 586 мм для бассейна р. Ия – г. Тулун и 771 мм для р. Ия – п. Аршан. Рассчитанные и наблюдаемые величины стока составили 338 и 326 мм для р. Ия – г. Тулун и 528 и 540 мм для р. Ия – п. Аршан. Рассчитанная годовая величина испарения составляет около 250 мм. Минимальные и максимальные значения годового слоя осадков и стока в бассейне р. Ия – г. Тулун наблюдались в 1993 и 1986 годах. Они составили в 1993 г. (сухой год) 400 и 205 мм, а в 1986 г. – 765 и 440 мм соответственно.

Ошибка моделирования среднемноголетней величины годового стока не превышает 7%. Критерий Нэша-Сатклиффа NS составил в среднем от 0.58 до 0.68, медиана от 0.61 до 0.71. Максимальные величины NS превосходят 0.80 для каждого водосбора. Примеры сравнения наблюдаемых и рассчитанных гидрографов стока разной степени сходимости для трех водосборов представлены на Рис. 64.

Таблица 22 Водный баланс и критерии эффективности, 1970-1996

Код поста	Река – створ	Период	S	Y _о	Y _s	P	E	NS (m/av)	NS (max, год)	NS (min, год)
8230	Ия – Аршан	1970-1996	5140	540	528	771	243	0.69/0.62	0.80 (1974)	0.10 (1971)
8233	Ия – Тулун	1970-1996	14500	326	338	586	247	0.72/0.67	0.86 (1972)	0.32 (1983)
8241	Кирей – Уйгат	1970-1996	2950	374	402	688	286	0.66/0.57	0.85 (1972)	-0.11 (1993)

где S – площадь водосбора, км²; Y_o и Y_s – наблюдаемый и рассчитанный среднемноголетний годовой слой стока, мм; P , E – рассчитанные осадки и испарение, мм; t и av – медиана и среднее значение NS ; max и min – максимальное и минимальное значение NS .

Верификация результатов моделирования проведена также для максимальных расходов воды. На Рис. 65 приведено сравнение кривых вероятности превышения рассчитанных и наблюдаемых годовых максимальных расходов воды стока за период 1970-1996 гг. Кривые имеют как почти полную сходимость в области средних обеспеченностей, так и удовлетворительное совпадение в областях малых и больших обеспеченностей. В пределах обеспеченностей 8-17% наблюдается некоторое превышение рассчитанных максимальных расходов над наблюдаемыми, которое в области менее 4% переходит в превышение наблюдаемых расходов. Однако расхождение не превышает величины 300 м³/с (8 %).

В целом, результаты моделирования следует признать удовлетворительными, а модель «Гидрограф» пригодной для изучения процессов формирования стока рассматриваемой территории.

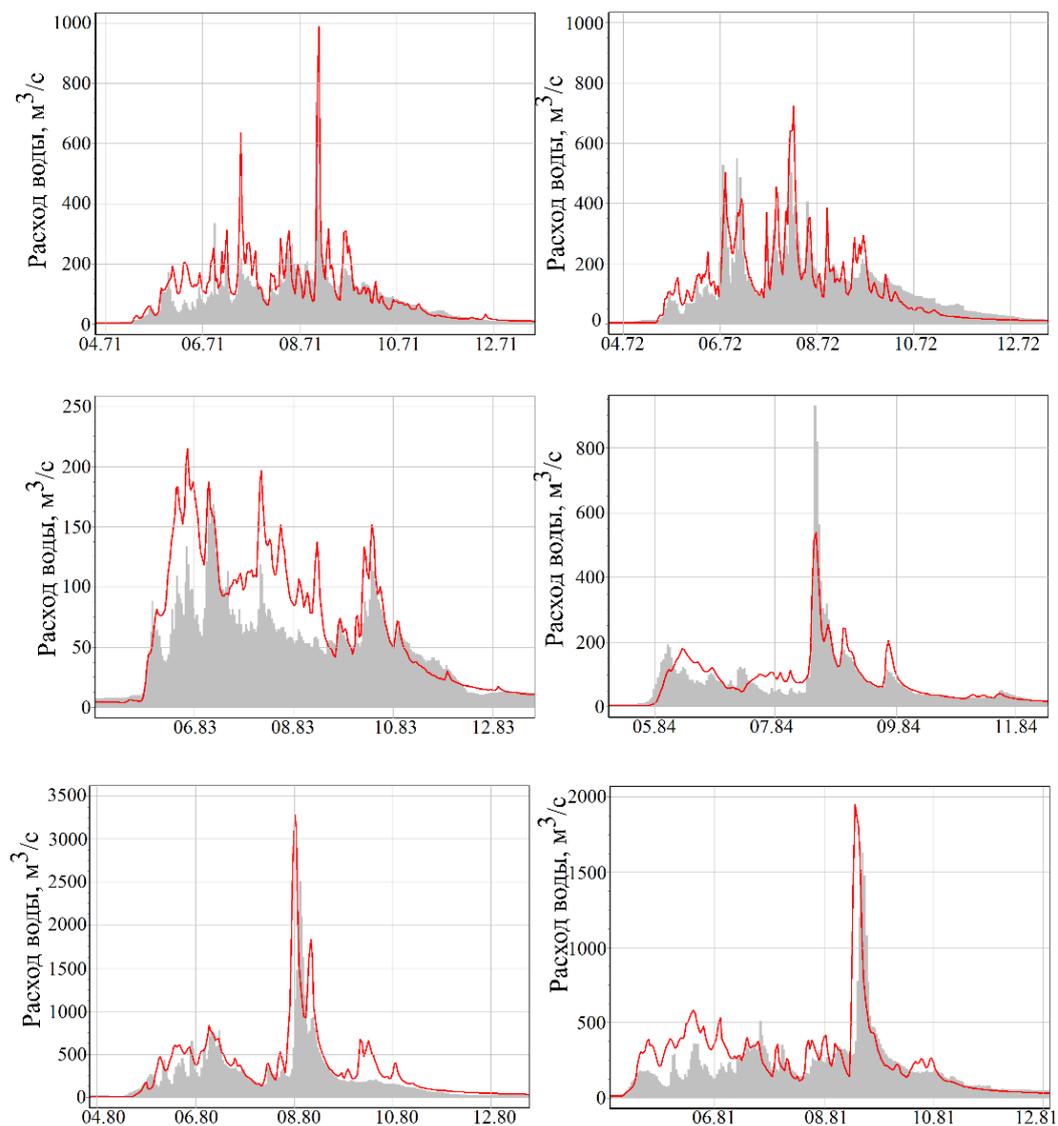


Рисунок 64 Пример рассчитанного и наблюдаемого гидрографа стока с высоким значением критерия эффективности (а) и низким (б): 1 – р. Кирей, Уйгат; 2 – р. Ия, Аршан; 3 – р. Ия, Тулун.

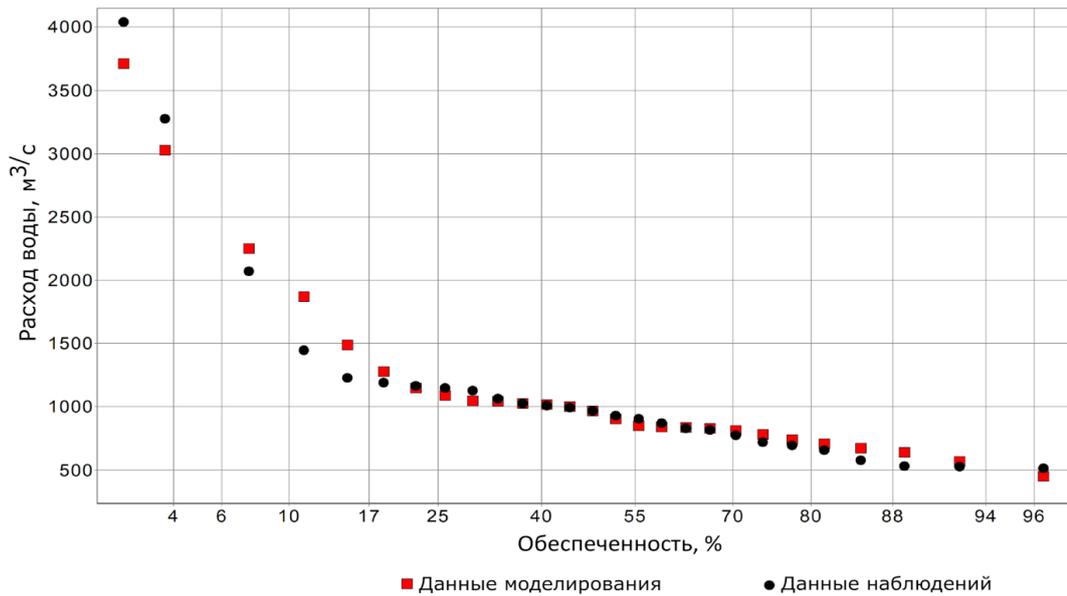


Рисунок 65 Кривые обеспеченности максимальных расходов воды по данным моделирования и наблюдений, р. Ия – г. Тулун, 1970-1996 гг.

Метеорологические условия формирования паводка в июне 2019 г. Для оценки метеорологических условий формирования паводка были использованы предоставленные Шиховым А.Н. (Пермский университет) данные глобальной модели прогноза погоды ICON, разработанной метеослужбой Германии (DWD) (Zängl et al., 2015). Суточные прогнозы данной модели получены с ftp-сервера DWD (Zängl et al., 2015) с шагом по времени 3 ч и пространственным разрешением 13 км. Такое разрешение можно считать достаточным для прогноза зон осадков, формирующихся за счет процессов синоптического масштаба (т.е. циклонов и их атмосферных фронтов).

В соответствии с данными модели ICON, наибольшее количество осадков за период с 00 ч 25 июня по 00 ч ВСВ 26 июня прогнозировалось в северо-восточной части бассейна р. Ия (до 90 мм). В самом г. Тулун за это время выпало 68 мм, что очень близко к прогнозному значению. В горной части бассейна ожидаемое количество осадков за сутки составило всего 20-30 мм. Осадки, выпавшие 25-26 июня, сформировали первую волну паводка.

26 июня в горной части бассейна р. Ия выпало экстремальное количество осадков. По данным гидропоста Аршан за двое суток выпало 255 мм (<https://tass.ru/sibir-news/6640452>). В соответствии с прогнозом модели ICON, количество осадков с 00 ч ВСВ 26 июня по 00 ч ВСВ 27 июня в средней части бассейна ожидалось в пределах 90-100 мм, а в высокогорной – 50-70 мм. Осадки, выпавшие 26 июня, сформировали вторую, наиболее высокую и разрушительную волну паводка.

Всего за период с 00 ч ВСВ 24 июня по 00 ч ВСВ 28 июня в среднем по бассейну р. Ия по данным модели ICON прогнозировалось выпадение 170 мм осадков, в средней (предгорной)

части бассейна до 250 мм. В высокогорной части бассейна р. Ия количество осадков прогнозировалось в пределах 125-150 мм.

Сравнивая фактические и модельные данные об осадках, можно отметить, что модель несколько завысила количество осадков на станции Тулун (Рис. 67). В то же время модель недооценила количество осадков в центральной части бассейна в Аршане, где только за двое суток выпало 255 мм. Это может быть связано со сравнительно низким разрешением модели, что ведет к сглаживанию полей осадков. По этой же причине модель может недооценивать эффект орографического усиления осадков в горах. Тем не менее, данные модели позволили получить реалистичную картину пространственного распределения осадков по бассейну (Рис. 66) и объяснить некоторые ключевые особенности формирования паводка.

При сравнении данных по осадкам модели ICON с данными pluviографов, приведенным к равномерному 3-часовому шагу для метеостанции Тулун (Рис. 68) и с данными суточного разрешения для метеостанции Икей (Рис. 69) получено, что временное распределение осадков существенно отличается, однако, общая сумма осадков за рассматриваемые периоды отличается не более чем на 7%.

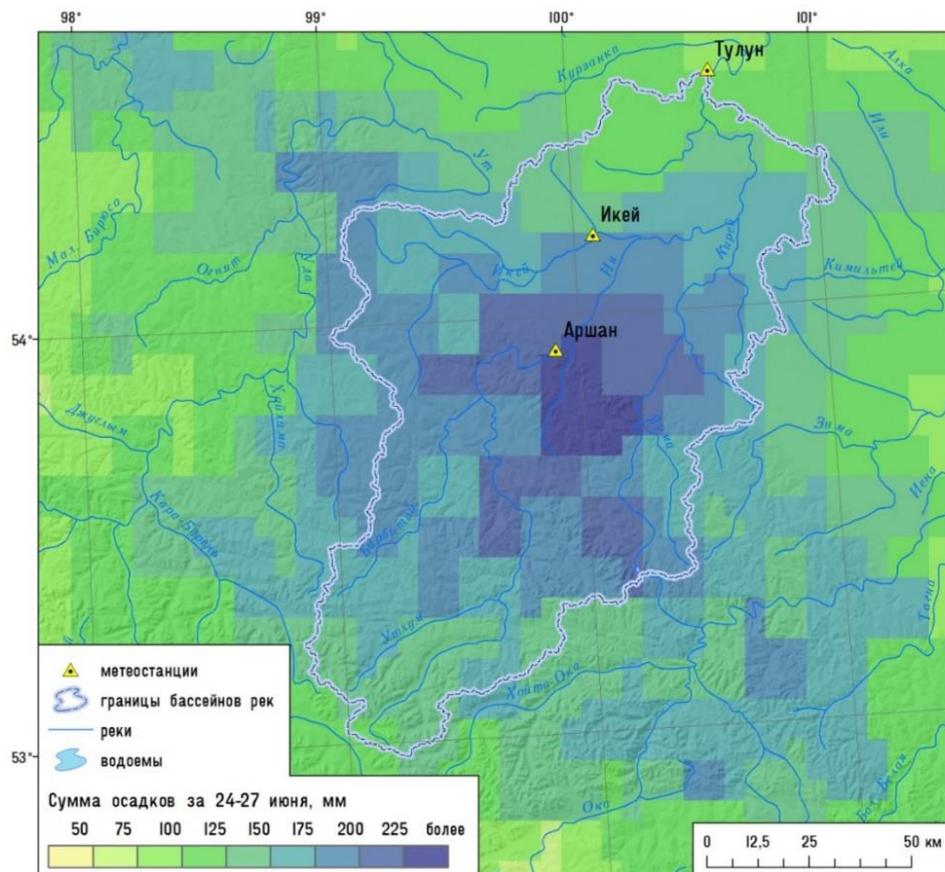


Рисунок 66 Пространственное распределение суммы осадков за период 24-28 июня 2019 г. по данным модели
ICON

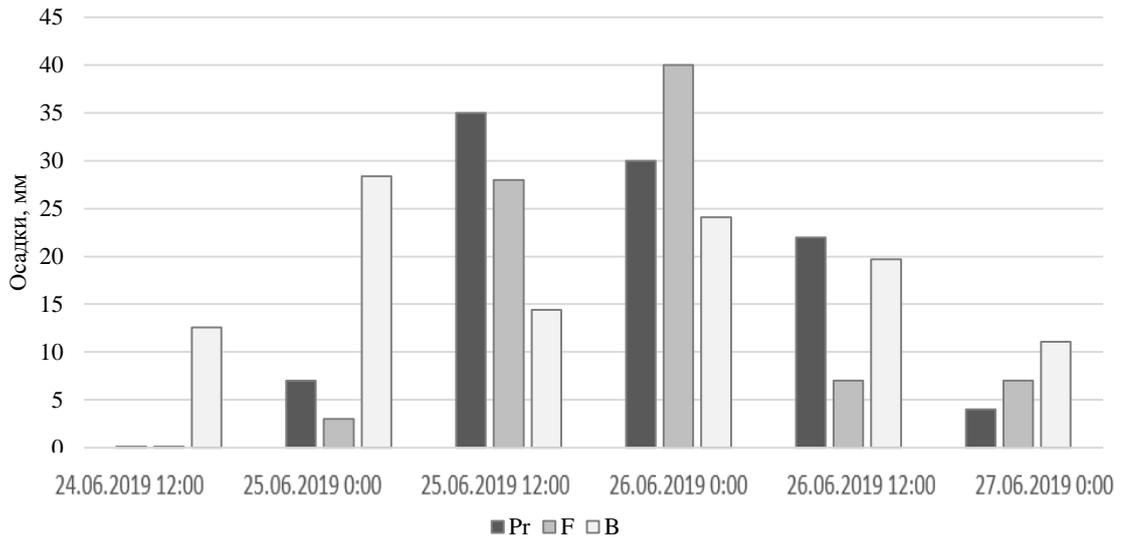


Рисунок 67 Сопоставление фактического количества 12-часовых сумм осадков на метеостанциях Тулун (F) с данными модели ICON (Pr) и со средним количеством осадков для бассейна р. Ия – Тулун по данным модели ICON (B)

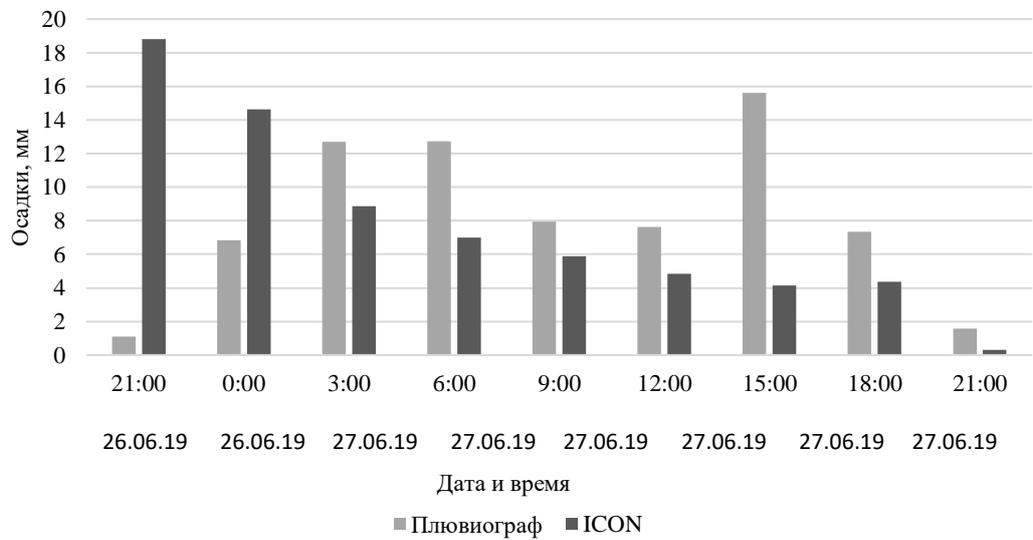


Рисунок 68 Сравнение 3 - часовых данных по осадкам на метеостанции Тулун

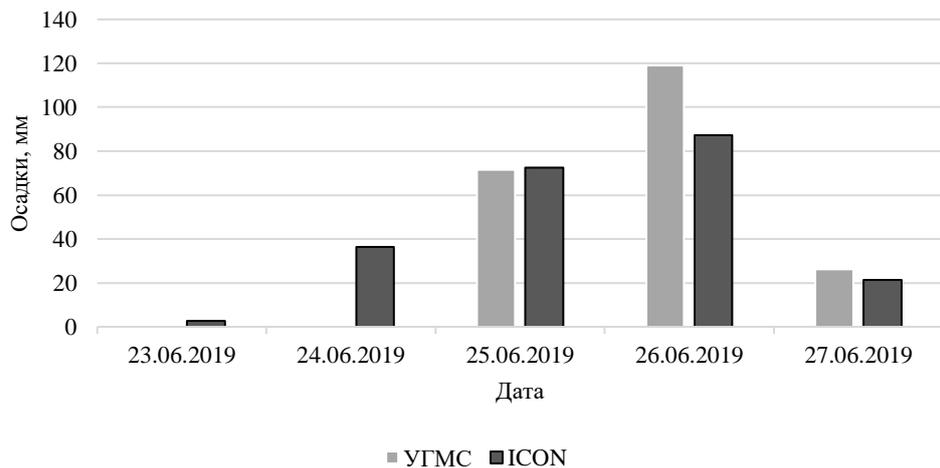


Рисунок 69 Сравнение суточных данных по осадкам на метеостанции Икей

Моделирование паводков 2019 г. по данным метеорологических станций и метеорологической модели ICON. Для расчета гидрографов паводков летом 2019 г. на р. Ия – г. Тулун в качестве входной информации были использованы суточные метеорологические данные двух станций Иркутского УГМС Икей и Тулун. Интерполяция осадков в расчетные точки производилась с учетом распределения осадков по высоте в горной части водосбора, верифицированного на предыдущем этапе исследования.

Согласно расчетам с 25 по 27 июня 2019 года в бассейне р. Ия – г. Тулун выпало 239 мм осадков, 25 июня – 79 мм, 26 июня – 132 мм, 27 июня – 28 мм. Рассчитанный слой стока 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.

В конце июля 2019 г. на р. Ия прошел второй паводок. С 26 по 28 июля 2019 г. согласно расчетам в бассейне р. Ия – г. Тулун выпало 156 мм осадков. Максимальный рассчитанный суточный расход достиг величины 3100 м³/с 31 июля 2019 г.

Моделирование паводка 26-30 июня 2019 г. на р. Ия было также проведено на основе метеорологической модели ICON. В качестве начальных условий был принят 1989 год, который по условиям весеннего половодья примерно совпадал с 2019 г. Таким образом, до 31 мая моделирование проводилось на основе данных метеорологических станций за 1989 год в суточном режиме, а с 1 по 30 июня на основе 3-часовых рядов температуры и дефицита влажности воздуха и осадков модели ICON. По итогам моделирования получено, что максимальный рассчитанный 3-часовой расход составил 5260 м³/с, максимальный суточный расход составил 4780 м³/с. Слой осадков по водосбору за период 25-27 июня составил 170 мм, а слой стока паводка за период 25 июня – 5 июля 136 мм.

На Рис. 70 представлено сравнение рассчитанных гидрографов стока на основе данных модели ICON и метеостанций. По данным метеостанций максимальный расход превысил прогноз по модели ICON на 1800 м³/с, а слой стока паводка на 26 мм. Согласно расчету по данным метеостанций слой осадков, выпавших на водосбор за период 25-27 июня 2019 г. составил 239 мм, что на 70 мм больше, чем по модели ICON. Фазы поднятия и спада гидрографа паводка хорошо совпадают, однако, согласно расчету по данным модели ICON максимальный расход наступает на 1 сутки раньше.

В работе Ю.Г. Мотовилова и др. (2021) приведены результаты моделирования паводка летом 2019 года при использовании информационно-моделирующего комплекса физико-математической модели формирования речного стока ECOMAG. Согласно расчетам, максимальный рассчитанный расход воды на реке у г. Тулун на 40 % превысил исторический

максимум и составил $5640 \text{ м}^3/\text{с}$ (на Рис. 70 отмечен красной точкой), что на $930 \text{ м}^3/\text{с}$ меньше расхода, полученного по данным метеорологических станций и модели «Гидрограф» и на $380 \text{ м}^3/\text{с}$ больше, чем по данным метеорологической модели ICON. В целом, расход, рассчитанный с использованием модели «Гидрограф», соответствует результатам оценки максимального рассчитанного расхода, полученного по модели ECOMAG.

Для оценки максимальных расходов воды и расчета уровней затопления также была использована гидродинамическая модель, учитывающая влияние гидротехнических сооружений (Болгов и др. 2020). Расход воды, при котором наблюдалось хорошее соответствие рассчитанных отметок и зафиксированных при изысканиях положений максимального уровня, составил $6700 \text{ м}^3/\text{с}$, что всего на $130 \text{ м}^3/\text{с}$ больше, чем по данным метеорологических станций и модели «Гидрограф». Также было установлено, что расчетные значения рекомендовано получать путем обобщения результатов нескольких методов гидрологического расчета.

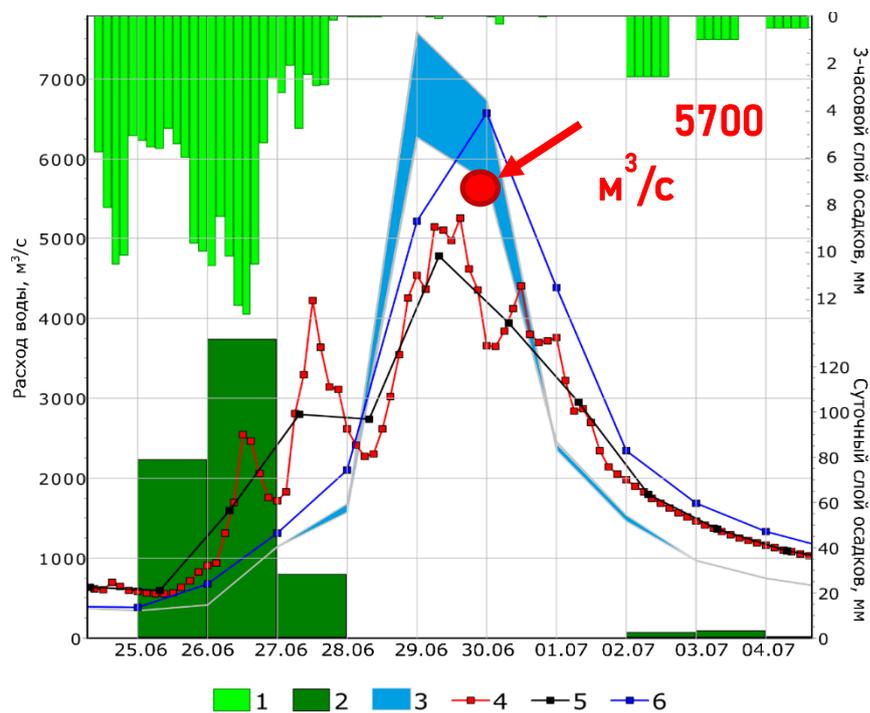


Рисунок 70 Результаты моделирования паводка на р. Ия – г. Тулун в июне 2019 г. на основе данных модели погоды ICON и сравнение с рассчитанным гидрографом на основе данных метеостанций:

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. Красная точка - максимальный рассчитанный расход воды согласно Ю.Г. Мотовилову и др. (2021)

5.4 Выводы

Глава 5 представляет результаты разработки параметрического обеспечения математической модели «Гидрограф» в целях расчета характеристик стока и элементов водного баланса в бассейнах горных рек южной криолитозоны, а также апробацию 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):

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. Удовлетворительные результаты моделирования позволили использовать разработанный набор параметров для расчета характеристик стока и водного баланса горных рек различного масштаба с наличием данных наблюдений и без них.

2. Исследованы возможности 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 Макарьевой и соавт. (2019) по СП 33-101-2003.

3. Выполнено исследование применимости разработанной методики в задачах расчета катастрофического паводка в бассейне р. Ия в 2019 г. 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 среднемноголетней величины годового стока не превышает 7%. Для расчетов характеристик 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 во время паводка.

Заключение

Целью диссертационной работы являлась разработка и совершенствование методики гидрологических расчетов в бассейнах горных рек России, отличающихся климатическими и физико-географическими условиями и характеризующимися различной степенью изученности, на основе метода математического моделирования с учетом современного изменения климата. В исследовании представлены результаты апробации разработанной методики в таких задачах, как расчет водного баланса и характеристик стока, в том числе, максимального, неисследованных рек горных районов России, оценка компонентов водного баланса стокоформирующих комплексов на основе краткосрочных данных специальных наблюдений, воспроизведение наблюдаемых изменений гидрологических характеристик в современных условиях. Также исследована возможность применения методики в задачах расчета максимальных характеристик стока горных рек, находящихся в различных физико-географических условиях.

Сделаны следующие выводы:

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 наблюдаемых 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.

Метод детерминированного 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 историческим и современным данным наблюдений. Тем не менее, метод применим для изучения процессов формирования стока в удаленных труднодоступных горных районах России, для оценки характеристик стока на водосборах с отсутствием данных наблюдений.

Результаты работы подтверждают принципиальную возможность применения метода детерминированного гидрологического моделирования для расчета срочных максимальных расходов воды при использовании детальных данных об осадках и климатических моделей. Новизна предлагаемого подхода заключается в учете основных процессов формирования стока и создании методики расчета и прогноза возможных изменений экстремальных характеристик водного режима для исследуемого региона, 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 наличие данные плювиографов чрезвычайно полезны для анализа факторов формирования катастрофических паводков и совершенствования методов математического моделирования. Другим источником получения дополнительной 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 (Макарьева и др., 2018в).

Список литературы

1. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО), 2018. 20. URL: <https://gmvo.skniivh.ru> (дата обращения: 13.05.2019).
2. Агрогидрологические свойства почв Иркутской области (справочник). 1968. Иркутск. 549 с.
3. Алексеева, А.А., 2014. Подходы к решению проблемы прогнозирования сильных летних осадков. Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации 351, 64-84.
4. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Колтерманн П.К., Торопов П.А., Школьный Д.И., Белякова П.А., 2016. Наводнения на Черноморском побережье Краснодарского края. Водные ресурсы, Том 43, № 1, с. 3-17, doi: 10.7868/S032105961601003X.
5. Антипов А.Н., Гагаринова О.В., Фёдоров В.Н. Ландшафтная гидрология: теория, методы, реализация // География и природ. ресурсы. — 2007. — № 3. — С. 56–67.
6. Антохина Е.Н. Водный режим рек Европейской территории России и его изучение на основе модели формирования стока: дисс... канд. геогр. наук. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2012. 219 с.
7. Асарин А.Е., Жиркевич А.Н. О необходимости разработки методики расчета вероятного максимального паводка для инженерно-гидрологических расчетов в России. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2012. № 4, с. 53–64.
8. Атлас Иркутской области. Растительность / Номоконов Л.И. – Иркутск: Изд-во Ин-та географии СО РАН. 1962.
9. Атлас природных и техногенных опасностей и рисков чрезвычайных ситуаций / Ред. С. К. Шойгу. – Москва: Дизайн. Информация. Картография, 2007. – 322 с.
10. Базельюк А.А., Лурье П.М., 2014. Катастрофические паводки и наводнения на юге России: Причины возникновения и оценка последствий. Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления. Сборник трудов Третьей конференции, Москва, 2014, с. 44-60.
11. Барабанов, В.С., Ефимов, В.В., Шокуров, М.В., 2003. Об использовании мезомасштабной модели для расчета полей приводного ветра и осадков над Черным морем. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря 2(7), 177-189.
12. Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М., 2013. Краткосрочное прогнозирование стока рек Черноморского побережья Кавказа. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, № 349, с. 122-141.

13. Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М., 2013. Прогноз максимального стока рек Черноморского побережья Кавказа. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, № 6, с. 4-16.
14. Белякова П.А., Гарцман Б.И., 2017. О перспективах прогнозирования паводков на реках западного Кавказа с использованием воднобалансовой модели FCM. Экологические последствия чрезвычайных ситуаций: актуальные проблемы и пути их решения. Материалы XXII Международной научно-практической конференции по проблемам защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, с. 53-57.
15. Болгов, М.В., Коробкина, Е.А., 2013. Реконструкция дождевого паводка на реке Адагум на основе математических моделей формирования стока. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление 3, 87-102.
16. Болгов М. В., Бояринцев Е. Л., Филимонова М. К. Моделирование паводочного стока при выпадении сильных дождей в зоне распространения многолетнемерзлых пород // ВХР. 2018. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-pavodochnogo-stoka-pri-vypadenii-silnyh-dozhdey-v-zone-rasprostraneniya-mnogoletnemerzlyh-porod>
17. Болгов М. В., Арефьева Е. В. Оценка экстремальных гидрологических характеристик в условиях неопределенности климатических изменений // Технологии гражданской безопасности. – 2021. – Т. 18. – № 1(67). – С. 54-59. – DOI 10.54234/CST.19968493.2021.18.1.67.10.54.
18. Болгов М. В., Коробкина Е. А., Осипова Н. В., Филиппова И. А. Об оценках максимального стока реки Ия во время экстремального паводка 2019 года // Метеорология и гидрология. – 2020. – № 11. – С. 53-63. – EDN DSJBDX.
19. Болгов М. В., Трубецкова М. Д., Филимонова М. К., Харламов М. А. Оценка возможного максимального расхода воды реки Зеи в створе Зейской ГЭС // География и природные ресурсы. – 2020. – № 4(163). – С. 162-169. – DOI 10.21782/GIPR0206-1619-2020-4 (162-169)
20. Борщ С.В., Симонов Ю.А., Христофоров А.В. Система прогнозирования паводков и раннего оповещения о наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа и бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра РФ. Спец. вып. 356, 2015. 247 с.
21. Борщ С.В., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Мотовилов Ю.Г., Симонов Ю.А. Долгосрочный ансамблевый прогноз весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище на основе гидрологической модели: результаты проверочных и оперативных испытаний // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации, № 366, с. 68-86

22. Булыгина О.Н., Веселов В.М., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива срочных данных об основных метеорологических параметрах на станциях России. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620549, URL: <http://meteo.ru/data/163-basic-parameters#описание-массива-данных> (дата обращения: 06.04.2019).
23. Бураков Д.А., Каропова Е.Д., Шайдуров В.В. Математическое моделирование стока: теоретические основы, современное состояние, перспективы // Вестник Крас. ГУ. 2006. № 4. С. 3–19
24. Быков, А.В., Калинин, Н.А., Шихов, А.Н., 2017. Прогноз опасных и неблагоприятных явлений погоды на среднем Урале с применением мезомасштабной модели WRF. Современные проблемы географии и геологии к 100-летию открытия естественного отделения в Томском государственном университете: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 223–226
25. Василенко Н. Г. Гидрология рек зоны БАМ: экспедиционные исследования // Санкт-Петербург. Нестор-История. 2013. 672 с.
26. Васильев И.С., Торговкин Я.И. Пространственное распределение осадков в Якутии // Метеорология и гидрология. 2002. № 6. С. 23–32.
27. Виноградов Ю.Б., 1988. Математическое моделирование процессов формирования стока (опыт критического анализа). Гидрометеиздат, Ленинград.
28. Виноградов Ю.Б., Виноградова Т.А. Математическое моделирование в гидрологии. – М.: Академия, 2010. 298 с.
29. Виноградов Ю.Б., Семенова О.М., Виноградова Т.А. Гидрологическое моделирование: метод расчета динамики тепловой энергии в почвенном профиле (Часть 1) // Криосфера Земли. 2015. т. XIX, № 1. С. 11-21.
30. Виноградов А.Ю., Ржавцев А.А., Зубова О.В., Обязов В.А., Фурсов К.А., Хвалев С.В., Кадацкая М.М., Парфенова М.А., Виноградов И.А. Анализ пропускной способности трубных переходов на дорогах низших категорий // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 232. С. 152–168. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.232.152-168
31. Воробьев, Ю. Л., Акимов, В. А., Соколов, Ю. И., 2003. Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы, ООО «ДЭКС-ПРЕСС», Москва.
32. Ганюшкин Д.А., Чистяков К.В., Москаленко И.Г., 2011. Современное оледенение северо-запада внутренней Азии и его динамика. Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7, Геология, география, № 2, с. 94-110.

33. Гарцман, И. Н. Системные аспекты моделирования в гидрологии // Проблемы анализа гидрометеорологических систем- Л.: Гидрометеиздат, 1977. С. 3-84. - (Тр. ДВНИГМИ; вып. 63).
34. Гарцман Б.И., Шамов В.В. Натурные исследования стокоформирования в Дальневосточном регионе на основе современных средств наблюдений // Водные ресурсы. 2015. № 6. С. 589–599.
35. Гарцман Г.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 222 с.
36. Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток / Ред. Э.Д. Ершов. – М.: Недра, 1989. 515 с.
37. Георгиади А.Г., Кашутина Е.А. Долговременные изменения стока крупнейших сибирских рек // Изв. РАН. Сер. Геогр. 2016, № 5. С. 70–81.
38. Георгиевский, В.Ю., Ткаченко Ю.Ю., 2012. Катастрофический паводок в бассейне р.Адагум 6-7 июля 2012 г. и его причины. Отчет ФБГУ «Государственный гидрологический институт»
39. Гельфан А. Н. Сравнение результатов применения двух методов расчета промерзания почвы // Метеорология и гидрология, 1989. № 2. С. 98–104.
40. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири // Санкт-Петербург. ВВМ. 2009. 536 с.
41. Глушков В.Г. Географо-гидрологический метод. Изв. ГГИ, 1933.
42. Глушков В.Г. Вопросы теории и методы гидрологических исследований. – М.:Гидрометеиздат, 1961. – 70 с.
43. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1. Вып. 16. Бассейны рек Лены (среднее и нижнее течение), Хатанги, Анабара, Оленька, Яны, Индигирки (1981-2007) // Якутское управление гидрометеорологической службы, г.Якутск
44. Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1. Вып. 17. Бассейны рек Колымы и рек Магаданской области (1981-2007) // Колымское управление гидрометеорологической службы, г.Магадан
45. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1. Вып. 17. Бассейны рек Колымы и рек Магаданской области. 1976 – 1980 гг. // Колымское управление гидрометеорологической службы – Л.: Гидрометеиздат, 1985
46. Государственный водный кадастр. Многолетние данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1. Выпуск 16. Бассейны рек Лены (среднее и нижнее течение),

Хатанги, Анабара, Оленька, Яны, Индигирки. 1976 – 1980 гг. // Якутское управление гидрометеорологической службы – Л.: Гидрометеоздат, 1987

47. Граве Н.А. Предварительный отчет по исследованиям теплового и влажностного режимов почв и горных пород и теплообмена между ними за 1958 год на площадке Сунтар-Хаята. – Якутск: Изд-во Северо-Вост. отд. Ин-та мерзлотоведения АН СССР, 1959. 30 с.

48. Граве Н.А., Гаврилова М.К., Гравис Г.Ф., Катасонов Е.М., Клюкин Н.К., Корейша Г.Ф., Корнилов Б.А., Чистотинов Л.В. Промерзание земной поверхности и оледенение хребта Сунтар-Хаята (Восточная Якутия). – М.: Наука, 1964. 141 с.

49. Граве Н.А., Корейша М.М. Промежуточный научный отчет о работе Высокогорной гляциологической и геокриологической станции Сунтар-Хаята (по программе 3 МГГ) за 1957 г. – Якутск: Изд-во Северо-Вост. отд. Ин-та мерзлотоведения АН СССР, 1957. 40 с.

50. Губарева Т. С., Гарцман Б. И., Шамов В. В. и др. Компоненты стока малых водосборов Сихотэ-Алиня: обобщение результатов полевых измерений и трассерного моделирования // Известия Российской академии наук. Серия географическая. – 2019. – № 6. – С. 126-140. – DOI 10.31857/S2587-556620196126-140.

51. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Параметризация тепло- и влагообмена на поверхности суши при сопряжении гидрологических и климатических моделей // Водные ресурсы, 1998, т.25, №4. - С. 421 – 431.

52. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование процессов тепловлагообмена суши с атмосферой в локальном масштабе для территорий с многолетней мерзлотой // Почвоведение. 2004. № 9. С. 1077– 1092

53. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я. Моделирование стока на малых водосборах в зоне многолетней мерзлоты на основе модели SWAP // Водные ресурсы. 2006. Т. 33. № 2. С. 133-145.

54. Гусев Е.М., Насонова О.Н., Джоган Л.Я., Ковалев Е.Э. Моделирование стока р. Северной Двины с использованием модели взаимодействия поверхности суши с атмосферой SWAP и глобальных баз данных // Вод. ресурсы. 2011. Т. 38. № 4. С. 439– 453.

55. Доклад об особенностях климата на территории РФ, URL: http://climatechange.igce.ru/index.php?option=com_docman&Itemid=73&gid=27&lang=ru (дата обращения: 01.02.2018).

56. Долгов С.В., Коронкевич Н.И. Гидрологическая ярусность равнинной территории // Известия Российской академии наук. Серия географическая, издательство Наука, № 1. С. 7-25

57. Дрыгина Т.Ф. (ред.), 1967. Справочник агрогидрологических свойств почв Северного Кавказа, Волгоградской и Астраханской областей. Гидрометеорологическое издательство, Ленинград.

58. Единый государственный реестр почвенных ресурсов России, URL: <http://atlas.mcx.ru/materials/egrpr/content/3sem.html> (дата обращения: 06.04.2018)
59. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Т. 8, вып. 0-7: Бассейны морей Лаптевых, Восточно-Сибирского до р.Колымы. 1980 г. – Якутск: Изд-во Якут. гидромет. упр., 1983. 346 с.
60. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 1. Выпуск 13. Бассейн Ангары 1981–2000 гг.
61. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 7 Выпуск 0,1,5-8 Карское море (Восточная часть) 1952-2012
62. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. Том 7. Выпуск 2–4. Карское море (Восточная часть) 1952–1980 гг.
63. Жижин В.И., Железняк М.Н., Пуляев Н.А. Криогенные процессы в формировании морфологии горного рельефа хребта Сунтар-Хаята // Вестн. Северо-Вост. федер. ун-та им. М.К. Аммосова. 2012. Т. 9, № 3. С.73–79
64. Жмаева Г. П., Кучмент Л. С. Определение показателей потерь стока для долгосрочных прогнозов весеннего стока // Метеорология и гидрология. 1979. № 2. С. 73–79
65. Иваньо Я.М. Экстремальные природные явления: методология, моделирование и прогнозирование. — Иркутск: Изд-во ИрГСХА, 2007. 267 с.
66. Иваньо Я.М., Старкова Н.В. Функциональные возможности информационной системы оценки изменчивости экстремальных природных явлени // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5, №10. С.82 – 87.
67. Информационная система по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России, 2019. URL: <http://gis.vodinfo.ru/> (дата обращения: 13.05.2019).
68. Информационное агентство России, 2015. Наводнения в Краснодарском крае с 2010 года: хронология, URL: <http://tass.ru/info/2071994> (дата обращения: 23.07.2018).
69. Информационное агентство России. URL: <http://tass.ru/info/2071994> (дата обращения: 06.04.2018).
70. Информационное агентство России. URL: <http://tass.ru/info/2071994> (дата обращения: 25.07.2018)
71. Каманин Л. Г., Лиханов Б. Н., 1964. Природные условия и естественные ресурсы СССР. Средняя Сибирь. АН СССР, Институт географии, Наука,. 480 с.
72. Карта почв Российской Федерации (бывш. РСФСР). Масштаб: 1:2500000. Главный редактор: В.М. Фридланд. 1988
73. Кичигина Н.В., 2018. Опасность наводнений на реках Байкальского региона. География и природные ресурсы, № 2, с. 41-51. doi:10.21782/GiPR0206-1619-2018-2(41-51).

74. Клименко Д. Е. Оценка предельных максимумов дождевых осадков физическими методами на основе спутниковых и радиолокационных данных наблюдений (на примере Среднего Урала) // Водные ресурсы. – 2020. – Т. 47. – № 4. – С. 443-452. – DOI 10.31857/S0321059620040069.
75. Клименко, Д. Е. Остахова А.Л. Моделирование потерь дождевых осадков в кронах хвойных древостоев // Лесоведение. – 2020. – № 4. – С. 335-345. – DOI 10.31857/S0024114820040063.
76. Клименко Д. Е., Черепанова Е. С., Кузьминых А. Ю. Оценка параметров распределений экстремальных ливней при учете нескольких событий в году // Водные ресурсы. – 2019. – Т. 46. – № 4. – С. 438-446. – DOI 10.31857/S0321-0596464438-446.
77. Колтерманн П.К., Добролюбов С.А., Алексеевский Н.И., 2012. Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей, под ред. К.П. Колтерманна. Триумф, Москва.
78. Копысов С.Г. Ландшафтная гидрология геосистем лесного пояса Центрального Алтая. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Томск. 2005.
79. Корейша М.М. Материалы гляциологических исследований. Сунтар-Хаята. Международный геофизический год 1957–1958–1959. – М.: Изд-во Ин-та мерзлотоведения АН СССР, 1963. 105 с.
80. Корейша М.М. Промежуточный отчет о работах экспедиции «Сунтар-Хаята» за 1957. – Якутск: Изд-во Академия наук СССР, 1957. 22 с.
81. Коронкевич, Н. И. Комплексная дифференциация водного баланса территории // Гидрологические исследования ландшафтов. Новосибирск: Наука, 1986. - С. 815.
82. Курбатская С.С., Курбатская С.Г., Миронычева-Токарева Н.П., Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С., 2018. Биологическая продуктивность тундрово-степных экосистем северного макросклона горного массива Монгун-Тайга. Экосистемы Центральной Азии: исследования, сохранение, рациональное использование, Материалы XIV Убсунурского Международного симпозиума, Улангом, Монголия, 2018, с. 99-102.
83. Кучмент Л.С., Е.Н. Борщевский Идентификация нелинейных гидрологических систем., Метеорология и гидрология N 1, 1971.
84. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов А.И. Модель формирования стока на водосборах зоны многолетней мерзлоты (на примере верхней Колымы). // Водные ресурсы. 2000. Том 27, №4. С. 435–444

85. Кучмент, Л.С. Система физико-математических моделей гидрологических процессов и опыт ее применения к задачам формирования стока / Л.С. Кучмент, В.Н. Демидов, Ю.Г. Мотовилов, В.Ю. Смахтин // Водные ресурсы. – 1986. – Т.13. № 5. – С. 24–36.
86. Кучмент, Л.С. Применение физико-математических моделей формирования стока для оценки степени опасности катастрофических наводнений / Л.С. Кучмент, А.Н. Гельфан, В.Н. Демидов, Ю.Г. Мотовилов, Н.А. Назаров, В.Ю. Смахтин // Метеорология и гидрология. – 1994. – №4. – С. 93–100.
87. Ландшафтная карта СССР, 1980. Ответственный редактор: И.С. Гудилин. Масштаб 1:2500000 (в 1 см. 25 км.). Министерство геологии СССР. К карте прилагается легенда
88. Лебедева Л.С., Семенова О.М., Виноградова Т.А. (2015) Расчет глубины сезонно-талого слоя в условиях различных ландшафтов Колымской водно-балансовой станции в задаче гидрологического моделирования // Криосфера Земли. 2015, т. XIX, № 2. С. 35–44
89. Лебедева Л.С., Макарьева О.М., Виноградова Т.А. Особенности формирования водного баланса горных водосборов северо-востока России (на примере Колымской водно-балансовой станции) // Метеорология и гидрология. 2017. №4. С. 90-101. <https://elibrary.ru/item.asp?id=28965999>
90. Лебедева Л.С. Формирование речного стока в зоне многолетней мерзлоты Восточной Сибири: дис....канд. геогр. наук. – Москва: Из-во Института географии РАН, 2018. 125 с.
91. Лупаков С. Ю., Бугаец А. Н., Шамов В. В. Применение различных структур модели HBV для исследования процессов формирования стока на примере экспериментальных водосборов // Водные ресурсы. – 2021. – Т. 48. – № 4. – С. 417-426. – DOI 10.31857/S032105962104012X.
92. Лыткин В.М. Динамика ледников и каменных глетчеров хребта Сунтар-Хаята в позднем голоцене: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. – Якутск: Изд-во Ин-та мерзлотоведения СО РАН, 2016. 156 с.
93. 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. № 6-7. С. 50-63
94. 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. 2018б, №61 (1). С 101-118

95. Макарьева О.М., Виноградова Т.А., Нестерова Н.В., Виноградов А.Ю., Бельдиман И.Н., Колупаева А.Д., 2018в. Моделирование катастрофических паводков в бассейне р. Туапсе // Геориск, 2018в. Том XII, № 3. С. 78–89. URL: http://geomark.ru/journals_list/zhurnal-georisk-tom-xii-n-3-2018/
96. Макарьева О.М., Нестерова Н.В., Г.П. Ямпольский, Е.Ю. Кудымова, А.А. Осташов, А.Д. Колупаева. Оценка максимальных расходов воды различной обеспеченности неизученной горной реки Хемчик (Республика Тыва) на основе методов математического моделирования // Инженерные изыскания. 2019а. № 2. С. 36-51 URL: <https://www.engineeringsurvey.ru/jour/article/view/566>
97. Макарьева, О., Нестерова, Н., Виноградова, Т., Бельдиман, И., & Колупаева, А. Расчет характеристик катастрофических паводков неизученной реки Цемес (г. Новороссийск, Черноморское побережье России) на основе гидрологической модели «Гидрограф» // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2019б. 64(1). С. 24-43. URL: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2019.102>
98. 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. 2019в. № 1. С 178–186.
99. Макарьева О.М., Шихов А.Н., Осташов А.А., Нестерова Н.В. Наледи бассейна р. Индигирка по современным снимкам Landsat и историческим данным с 2019 г. // Лёд и Снег. 2019г. 59(2). С. 201-212. URL: <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-388>
100. Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока на малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водно-балансовой станции) // Криосфера Земли. 2020. № 1. С. 43-56. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(43-56)
101. 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
102. 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)
103. Материалы наблюдений опорных станций комплексной воднобалансовой и агрометеорологической сети, почвенноиспарительных и снегоиспарительных пунктов. 1970-1985 гг. Новосибирск.
104. Метеорологический ежемесячник. I-XIII, 1964 – 1983, 13. Гидрометеиздат. Ростов-на-Дону.

105. Метеорологический ежемесячник. Выпуск 24. Якутское управление гидрометеорологической службы, 1966 – 2017 гг.

106. Метеорологический ежемесячник. Выпуск 33. Колымское управление гидрометеорологической службы, 1970 – 2015 гг.

107. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. Нижний Новгород: Вектор-ТиС. 2007. 134 с.

108. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. СПб.: ААНИИ. 2008. 66 с.

109. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Нестор-История. 2009. 193 с.

110. Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История. 2010. 162 с.

111. Мотовилов Ю.Г. Моделирование формирования стока в речных бассейнах при изменении пространственных масштабов: 1. Алгоритмы генерализации и осреднения // Водные ресурсы. 2016. № 3, С. 243-253. 2. Результаты испытаний // Водные ресурсы. 2016. № 5, С. 476-491.

112. Мотовилов Ю.Г. Моделирование полей речного стока (на примере бассейна Лены) // Метеорология и гидрология, 2017, № 2, С. 78-88.

113. Мотовилов Ю.Г., Балыбердин В.В., Гарцман Б.И., Гельфан А.Н., Морейдо В.М., Соколов О.В. Краткосрочный прогноз притока воды в Бурейское водохранилище на основе модели ЕСОМАГ с использованием метеорологических прогнозов // Водное хозяйство России. 2017. № 1. С. 78–102.

114. Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н. (2018) Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов. М., Изд. Российской академии наук. 300с.

115. Мотовилов Ю.Г. Система физико-математических моделей формирования речного стока и ее применение в задачах гидрологических расчетов и прогнозов: диссертация ... доктора Географических наук: 25.00.27 / Мотовилов Юрий Георгиевич; [Место защиты: ФГБУН Институт водных проблем Российской академии наук], 2019.- 333 с.

116. Мотовилов, Ю.Г. Моделирование снежного покрова и снеготаяния // Моделирование гидрологического цикла речных водосборов / Ю.Г. Мотовилов; под общ. ред.

Л.С. Кучмента, Е.Л. Музылева. – М.: Изд-во Национального геофизического комитета РАН, 1993 – С. 9–37.

117. Мотовилов Ю. Г., Гельфан А. Н., Полянин В. О. Катастрофические паводки в бассейне Ангары в 2019 ГОДУ: моделирование условий формирования и водного режима рек // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2021. Т. 85. № 2. С. 302-316. – DOI 10.31857/S2587556621020102.

118. 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. С. 18-36. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32741406>

119. Официальный портал Республики Тыва, 2014. «В Туве ликвидируются последствия сильного наводнения и паводка, случившихся летом», URL: http://gov.tuva.ru/press_center/news/activity/11161/ (дата обращения: 05.02.2019).

120. Официальный сайт ИА «Тува-Онлайн», 2014. «В Туве общий ущерб от паводка составил более 767 миллионов рублей», URL: <https://www.tuvaonline.ru/2014/06/16/v-tuve-obschiy-uscherb-ot-pavodka-sostavil-bolee-767-millionov-rublej.html> (дата обращения: 05.02.2019).

121. Официальный сайт издательского дома Коммерсантъ, URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4019553> (дата обращения: 22.07.2019).

122. Официальный сайт информационно-аналитического издания «Тайга.инфо - Главные новости Сибири», URL: <https://taiga.info/147658> (дата обращения: 18.07.2019).

123. Официальный сайт метеослужбы Германии (DWD) URL: <http://ftp-outgoing2.dwd.de/gds/ICON/grib/europe/> (дата обращения: 22.07.2019).

124. Официальный сайт Российского агентства международной информации «РИА Новости», URL: <https://ria.ru/20190721/1556733218.html> (дата обращения: 22.07.2019).

125. Официальный сайт Российского агентства международной информации «РИА Новости», URL: <https://tass.ru/sibir-news/6640452> (дата обращения: 23.07.2019).

126. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации, т. 1 и т. 2. — Росгидромет, М., 2008. URL: <http://climate2008.igce.ru>

127. Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М., 2012. Реки Черноморского побережья Кавказа: гидрография и режим стока. Донской издательский дом, Ростов-на-Дону.

128. Пряхина Г.В., Зелепукина Е.С., Журавлев С.А., Амбурцева Н.И., Чистяков К.В., 2014. Ландшафтно-гидрологическая структура водосбора реки Амыл и ее учет при моделировании формирования речного стока. География и природные ресурсы, № 4, с. 131–137.

129. Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 16. Выпуск 2. Ангаро-Енисейский район. Ангара. Гидрометеиздат. Ленинград. 1972.

130. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 17. Лено-Инди́гирский район. – Л.: Гидрометеиздат, 1972. 651 с.
131. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 19. Северо-Восток. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. 282 с.
132. Ресурсы поверхностных вод. Основные гидрологические характеристики. Том 17. Лено-Инди́гирский район. До 1963 г. Якутское управление гидрометеорологической службы. – Л.: Гидрометеиздат, 1967
133. Ресурсы поверхностных вод. Основные гидрологические характеристики. Том 17. Лено-Инди́гирский район. 1963 - 1970 гг. Якутское управление гидрометеорологической службы. – Л.: Гидрометеиздат, 1975
134. Ресурсы поверхностных вод. Основные гидрологические характеристики. Том 17. Лено-Инди́гирский район. 1971 – 1975 гг.. Якутское управление гидрометеорологической службы. – Л.: Гидрометеиздат, 1979
135. Ресурсы поверхностных вод. Основные гидрологические характеристики. Том 19. Северо-Восток. До 1963 г. Колымское управление гидрометеорологической службы. – Л.: Гидрометеиздат, 1966
136. Ресурсы поверхностных вод. Основные гидрологические характеристики. Том 19. Северо-Восток. 1963 - 1970 гг. Колымское управление гидрометеорологической службы. – Л.: Гидрометеиздат, 1974
137. Ресурсы поверхностных вод. Основные гидрологические характеристики. Том 19. Северо-Восток. 1971 - 1975 гг. Колымское управление гидрометеорологической службы. – Л.: Гидрометеиздат, 1978
138. Рождественский, А.В., Лобанова, А.Г., 2010. Приложения к пособию по определению расчетных гидрологических характеристик, ФБГУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург
139. Ростов И.Д., Дмитриева Е.В., Воронцов А.А. Тенденции климатических изменений термических условий прибрежных районов Охотского моря за последние десятилетия. Известия ТИНРО. 2017;191:176-195. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2017-191-176-195>
140. Руководство воднобалансовым станциям. – Ленинград: Гидрометеиздат. 1973. 306 с.
141. Руководство стоковым станциям. – Ленинград: Гидрометеиздат. 1954. 287 с.
142. Руководство по гидрологической практике. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения // Всемирная метеорологическая организация. ВМО-168. 1994, 1997. 843 с

143. Руководство по гидрологической практике // Всемирная Метеорологическая организация, 2009
144. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018619084 «Комплексная программа распределенной гидрологической модели “Гидрограф”», правообладатель О.М. Макарьева, дата регистрации 30.07.2018
145. Ситнов, А. Н., Агеев, С. О. (2021). Математическая модель и алгоритмизация процесса решения задачи внутрисуточного регулирования сброса воды через Нижегородский низконапорный гидроузел. Научные проблемы водного транспорта, (66), 153-164. <https://doi.org/10.37890/jwt.vi66.153>
146. СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. М.: Стройиздат. 1983. 97 с.
147. Соколов Б. Л. Наледи и речной сток / Б. Л. Соколов. - Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. 190 с
148. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России. 2004. 73 с.
149. Справочник по климату СССР. 1966. Выпуск 3. Гидрометеиздат. Ленинград
150. Справочник по климату СССР. Вып. 24. Якутское управление гидрометеорологической службы. – Л.: Гидрометеиздат, 1968
151. Справочник по климату СССР. Вып. 33. Колымское управление гидрометеорологической службы. – Л.: Гидрометеиздат, 1966
152. Ткаченко Ю.Ю., Волосухин В.А., 2013. Прогнозирование параметров паводков на реках Краснодарского края. Гидротехника, № 4, с. 16-20.
153. Фролов А.В. ГИС Амур – система мониторинга, прогнозирования и раннего оповещения о наводнениях // Метеорология и гидрология. 2016, №3. С. 5–21.
154. Фролова Н.Л., Магрицкий Д.В., Киреева М.Б., Агафонова С.А., Повалишникова Е.С. Антропогенные и климатически обусловленные изменения стока воды и ледовых явлений рек Российской Арктики // Вопросы географии. 2018. № 145. С. 233-251.
155. Христофоров А.В., Юмина Н.М., Белякова П.А., 2015. Прогноз паводкового стока рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки. Вестник Московского университета. Серия 5: География, № 3, с. 50-57.
156. Шевердяев И.В. Формирование и развитие дождевых паводков на реках Северо-Западного Кавказа на примере реки Адагум / автореферат на соискание учёной степени к.г.н., Санкт-Петербург, 2018, 31 с.
157. Шевнина Е. В. Долгосрочная оценка статистических характеристик максимального слоя на территории российской Арктики: диссертация ... доктора технических наук: 25.00.27 /

Шевнина Елена Валентиновна; [Место защиты: Российский государственный гидрометеорологический университет]. Санкт-Петербург, 2015. 358 с.

158. Шепелев В.В. Надмерзлотные воды криолитозоны. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. – 169 с.

159. Шнышарков А.Л., Колтерманн П.К., Селиверстов Ю.Г., Сократов С.А., Перов В.Ф., 2013. Селевой риск на Черноморском побережье Кавказа. Геориск, № 4, с. 20-25.

160. Шокуров, М.В., 2012. Численное моделирование катастрофических погодных явлений в Черноморском регионе. Сб. научн. тр. Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа 2 (26), 301 – 320

161. Abbott M. B., Bathurst J. C., Cunge J. A., O'Connell P. E., Rasmussen J. An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, (SHE): 2. Structure of a physically-based, distributed modelling system. J. Hydrol., 1986b, vol. 87, pp. 61-77.

162. Addor N., Jaun S., Fundel F. & Zappa M. An operational hydrological ensemble prediction system for the city of Zurich (Switzerland): Skill, case studies and scenarios // Hydrology and Earth System Sciences. 2011. Vol. 15. P. 2327–2347.

163. Arnold J. G., Srinivasan R., Muttiah R. S. and Williams J. R. Large area hydrologic modeling and assessment: Part 1. Model development. J. Am. Water Resour. Assoc., 1998, vol. 34. pp. 73-89.

164. Bergström, S., 1992: The HBV model – its structure and applications. SMHI Reports RH, No. 4, Norrkping, Sweden.

165. Befani A. N. Basic principles of the theory of processes of surface and underground runoff // Hydrological Sciences Journal. 1961. 6:3. P. 18-31, DOI: 10.1080/02626666109493225

166. Belyakova, P. A., Gartsman, B. I. (2018). Possibilities of Flood Forecasting in the West Caucasian Rivers Based on FCM Model. Water Resources, 45(S1), 50–58. doi:10.1134/s0097807818050317

167. Beylich M., Haberlandt U., Reinstorf F. Daily vs. hourly simulation for estimating future flood peaks in mesoscale catchments. *Hydrology Research* 1 August 2021; 52 (4): 821–833. doi: <https://doi.org/10.2166/nh.2021.152>

168. Bring A., Fedorova I., Dibike Y., Hinzman L., Mård J., Mernild S. H., Prowse T., Semenova O., Stuefer S. L., Woo M.-K.: Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects, and research challenges // J. Geophys. Res.-Biogeo. 2016. 121. P. 621–649. <https://doi.org/10.1002/2015JG003131>

169. Bicknell BR, Imhoff JC, Kittle JL Jr, Donigian AS Jr, Johanson RC (1995) Hydrological simulation program—FORTRAN. User's Manual for Release 11

170. Borah DK, Bera M(2003) Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases. *Trans ASAE* 46(6):1553–1556
171. Boithias L, Sauvage S, Lenica A, Roux H, Abbaspour KC, Larnier K, Dartus D, Sánchez-Pérez JM. Simulating Flash Floods at Hourly Time-Step Using the SWAT Model. *Water*. 2017; 9(12):929. <https://doi.org/10.3390/w9120929>
172. Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T. (2011). Distributed Rainfall–Runoff Modelling for Flood Frequency Estimation and Flood Forecasting. *Hydrological Processes*. 25. 2801-2813. 10.1002/hyp.8042.
173. Carleton T.A., Hsiang S.M. Social and economic impacts of climate. *Science*. 2016 Sep 9;353(6304):aad9837. doi: 10.1126/science.aad9837. PMID: 27609899.
174. Chalov S. R., Millionshchikova T. D., Moreido V.M. Multi-model approach to quantify future sediment and pollutant loads and ecosystem change in Selenga River system // *Water Resour.*, 2018. Vol. 45. Suppl. 2. P. S22–S34.
175. Cherkauer K. A. and Lettenmaier D. P. Hydrologic effects of frozen soils in the upper Mississippi River basin // *J. Geophys. Res.*, 1999,104(D16). P. 19,599-19,610.
176. Chernokulsky A., F. Kozlov, O. Zolina, O. Bulygina, I. Mokhov and V.Semenov Observed changes in convective and stratiform precipitation in Northern Eurasia over the last five decades // *Environ. Res. Lett.* 2019, P. 14 045001, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aafb82>
177. Dall’Amico, M., Endrizzi, S., Gruber, S., Rigon, R., 2011. A robust and energyconserving model of freezing variably-saturated soil. *Cryosphere* 5 (2), 469–484. <https://doi.org/10.5194/tc-5-469-2011>.
178. Dyurgerov M. B., Carter C. L. Observational evidence of increases in freshwater inflow to the Arctic Ocean // *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 2004, 36 (1). P. 117–122, doi:10.1657 – 1523-0430(2004)036.
179. Essaid H. I., Hill B. R. Watershed-scale modeling of streamflow change in incised montane meadows // *Water Resources Research*. 2014, 50, doi:10.1002/2013WR014420.
180. Fang X., Pomeroy J. Diagnosis of future changes in hydrology for a Canadian Rockies headwater basin // *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 24, P. 2731-2754. Doi: 10.5194/hess-24-2731-2020.
181. Fang X., Pomeroy J. W., Ellis C. R., MacDonald M. K., DeBeer C. M., and Brown T. Multi-variable evaluation of hydrological model predictions for a headwater basin in the Canadian Rocky Mountains // *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2013, 17, P. 1635-1659, <https://doi.org/10.5194/hess-17-1635-2013>
182. Fraser R., Deschamps A., Kokelj S. Nested Watershed Mapping as a Reporting Framework for the NWT Cumulative Impact Monitoring Program (NWT-CIMP) 2015 Report for the

NWT Cumulative Impact Monitoring Program (Project: A Multi- scale Assessment of Cumulative Impacts in the Northern Mackenzie Basin), 2019

183. Flannigan, Mike & Krawchuk, Meg & Wotton, Mike & Johnston, Lynn. (2009). Implications of changing climate for global Wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*. 18. 483-507. [10.1071/WF08187](https://doi.org/10.1071/WF08187).

184. Georgakakos K.P. On the design of national real-time warning systems with capability for site-specific flash flood forecasts // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* – 1986. – Vol. 67. – P. 1233–1239.

185. Georgakakos K.P., Graham N.E, Modrick T.M., Murphy M.J., Shamir E., Spencer C.R. & Sperflage J.A. Evaluation of real-time hydrometeorological ensemble prediction on hydrologic scales in Northern California // *Journal of Hydrology*. 2014. Vol. 519. P. 2978–3000.

186. Georgievsky M. Water resources of the Russian rivers and their changes // *Proc. IAHS*, 2016, 374, P. 75–77, <https://doi.org/10.5194/piahs-374-75-2016>

187. Haberlandt, U. and Radtke, I.: Hydrological model calibration for derived flood frequency analysis using stochastic rainfall and probability distributions of peak flows, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18, 353–365, <https://doi.org/10.5194/hess-18-353-2014>, 2014.

188. Harlan R. L. Analysis of coupled heat-fluid transport in partially frozen soil. *Water Resour. Res.* 1972, vol. 9, pp. 1314-1323.

189. IPCC, 2014: Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.

190. Ishida, Kei, Kiyama, Masato & Ercan, Ali & Amagasaki, Motoki & Tu, Tongbi & Ueda, Makoto. (2021). Multi-Time-Scale Input Approaches for Hourly-Scale Rainfall-Runoff Modeling based on Recurrent Neural Networks.

191. Janowicz, J. R., Hedstrom, N., Pomeroy, J., Granger, R., & Carey, S. Wolf Creek Research basin water balance studies. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports*, 2004, 290, P. 195-204.

192. Jeong, J., Kannan, N., Arnold, J. *et al.* Development and Integration of Sub-hourly Rainfall-Runoff Modeling Capability Within a Watershed Model. *Water Resour Manage* 24, 4505–4527 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9670-4>

193. Jongman B, Hochrainer-Stigler S, Feyen L, Aerts JCJH, Mechler R, Botzen WJW, Bouwer LM, Pflug G, Rojas R, Ward PJ (2014) Increasing stress on disaster risk finance due to large floods. *Nat Clim Chang* 4:264–268. doi:10.1038/NCLIMATE2124
194. Kane D.L., L.D. Hinzman, McNamara, Z. Zhang, C.S. Benson An Overview of a Nested Watershed Study in Arctic Alaska: Paper presented at the 12th Northern Res. Basins/Workshop (Reykjavik, Iceland – Aug.23rd -27th 1999) // *Hydrology Research*, 2000, 31 (4-5), P. 245–266.
195. Kendall M. G. Rank Correlation Methods. – Griffin, London. 1975.
196. Kour R., Patel N., Krishna A. P. Climate and hydrological models to assess the impact of climate change on hydrological regime: a review // *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9(9). doi:10.1007/s12517-016-2561-0.
197. Krogh S., Pomeroy J., Marsh P. Diagnosis of the hydrology of a small Arctic basin at the tundra-taiga transition using a physically based hydrological model // *Journal of Hydrology*, 2017, 550, P. 685-703, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.05.042.
198. Klemeš V. Operational testing of hydrological simulation models, *Hydrolog. Sci. J.*, 1986, vol. 31, pp. 13-24.
199. Kunstmann H., & Stadler C. High resolution distributed atmospheric-hydrological modelling for Alpine catchments // *Journal of Hydrology*. 2005. Vol. 314. P. 105–124.
200. Lebedeva L., Semenova (Makarieva) O., Vinogradova T. (2014) Simulation of Active Layer Dynamics, Upper Kolyma, Russia, using the Hydrograph Hydrological Model // *Permafrost and Periglac. Process.* 25 (4): 270–280 DOI: 10.1002/ppp.1821
201. Li C., Yu F., Liu J., Ni C. Quantitative research of factor contributions on streamflow change using hydrological modeling // *Proceedings of the 2nd International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering (RSETE 2012)*, 2012, P. 2035-2054.
202. Liang X., Lettenmaier D. P., Wood E. F., and Burges S. J. A Simple hydrologically Based Model of Land Surface Water and Energy Fluxes for GSMs, *J. Geophys. Res.*, 1994, vol. 99, no. D7, pp. 15 415-14 428.
203. Llauca H, Lavado-Casimiro W, León K, Jimenez J, Traverso K, Rau P. Assessing Near Real-Time Satellite Precipitation Products for Flood Simulations at Sub-Daily Scales in a Sparsely Gauged Watershed in Peruvian Andes. *Remote Sensing*. 2021; 13(4):826. <https://doi.org/10.3390/rs13040826>
204. Madsen H., Lawrence D., Lang M., Martinkova M., Kjeldsen T.R. A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment // *NERC. Centre for Ecology and Hydrology*, 2013, 180 p. (ESSEM COST Action ES0901).

205. Maghsood, Fatemeh Fadia & Moradi, Hamidreza & Bavani, Ali Reza & Panahi, Mostafa & Berndtsson, R. & Hashemi, Hossein. (2019). Climate Change Impact on Flood Frequency and Source Area in Northern Iran under CMIP5 Scenarios. *Water*. 11. 22. 10.3390/w11020273.
206. Magner J., A. Scott Geochemical and Isotopic Tracing of Water in Nested Southern Minnesota Corn-Belt Watersheds // *Water science and technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research*. 2002, 45, P. 37-42. 10.2166/wst.2002.0199
207. Magritsky D. V., Mikhailov V. N., Korotaev V. N., Babich D. B. Changes in hydrological regime and morphology of river deltas in the Russian Arctic // *Proceedings of HP1, IAHSIAPSO-IASPEI Assembly, Gothenburg, Sweden, July 2013, IAHS Publ.*, 2013, 358, P. 67–79
208. Majhi I., Yang D. Cold Region Hydrology in a Changing Climate // *IAHS Publ.* 2011, 346, P. 39–43
209. Makarieva O., Nesterova N., Lebedeva L., Sushansky S. Water-balance and hydrology research in a mountainous permafrost watershed in upland streams of the Kolyma River, Russia: a database from the Kolyma Water-Balance Station, 1948–1997 // *Earth System Science Data*. 2018, Vol. 10, № 2. P. 689-710.
210. Makarieva O., Shikhov A., Nesterova N., Ostashov A. Historical and recent aufeis in the Indigirka River basin (Russia) // *Earth Syst. Sci. Data*, 2019a, 11, P. 409-420, <https://doi.org/10.5194/essd-11-409-2019>
211. 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*, 2019b, 13, P. 1635-1659, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1635-2019>
212. Makarieva, O.; Nesterova, N.; Haghighi, A.T.; Ostashov, A.; Zemlyanskova, A. Challenges of Hydrological Engineering Design in Degrading Permafrost Environment of Russia // *Energies* 2022, 15, 2649. <https://doi.org/10.3390/en15072649>
213. Mann H. B. Nonparametric tests against trend // *Econometrica*, 1945, 13, P. 245–259
214. Marsh C. B., Pomeroy J. W., Spiteri R. J., Wheeler H. S. A finite volume blowing snow model for use with variable resolution meshes // *Water Resour. Res.*, 2020, 55, e24400, <https://doi.org/10.1029/2019WR025307>
215. Malik, L. K., Koronkevich, N. I., Zaitseva, I. S. & Barabanova, E. A. (2000) Development of dams in the Russian Federation and NIS countries. A WCD briefing paper prepared as an input to the World Commission on Dams, Cape Town, www.dams.org.
216. McDonnell J. J., Woods R. A.: On the need for catchment classification, *J. Hydrol.*, 2004, vol. 299, no. 2-3.

217. McDonnell J. J., Sivapalan M., Vache K., Dunn S., Grant G., Haggerty R., Hinz C., Hooper R., Kirchner J., Roderick M. L., Selker J., Weiler M. Moving beyond heterogeneity and process complexity: A new vision for watershed hydrology, *Water Resour. Res.*, 2007, vol. 43, no. 7, W07301, doi:10.1029/2006WR005467.
218. McNamara J.P., Kane D.L., Hinzman L.D. Analysis of streamflow hydrology in the Kuparuk River Basin, Arctic Alaska: a nested watershed approach // *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, 1998, vol. 206, no. 1-2, P. 39-57
219. Meredith, E.P., Semenov, V.A., Maraun, D., Park, W., Chernokulsky A.V., 2015. Crucial role of Black Sea warming in amplifying the 2012 Krymsk precipitation extreme. *Nature Geoscience* 8, 615-620, doi: 10.1038/NGEO2483.
220. Minderlein S., Menzel L., 2014. Evapotranspiration and energy balance dynamics of a semi-arid mountainous steppe and shrubland site in Northern Mongolia. *Environmental Earth Sciences*, 73(2), 593–609. doi:10.1007/s12665-014-3335-1
221. Moine, N. Le Bassin Versant De Surface Vu Par le Souterrain: Une voie D'amélioration Des Performances Et Du Réalisme Des Modèles Pluie-Débit? Ph.D. Thesis, Université Pierre et Marie, Paris, France, November 2008.
222. Motovilov Y. G. A model of snow cover formation and snowmelt processes. *IAHS Publ.*, 1986, vol. 155, pp. 47-57.
223. Motovilov, Yu.G. Modelling the effects of agrotechnical measures on spring runoff and water erosion / Yu.G. Motovilov // *Large Scale Effects of Seasonal Snow Cover. – Proc. of the Vancouver Symp., August, 1987, IAHS Publ. – 1987. – Vol. 166. – P. 241-251.*
224. Mukherjee, A., Bhanja, S.N. & Wada, Y. Groundwater depletion causing reduction of baseflow triggering Ganges river summer drying. *Sci Rep* 8, 12049 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-30246-7>
225. Nash J.E., Sutcliffe J.V. River flow forecasting through conceptual models: 1 A discussion of principles // *J. Hydrol.* 1970. V. 10. № 3. P. 282–290
226. Nester T., Komma J. & Blöschl G. Real time flood forecasting in the Upper Danube basin // *Journal of Hydrology and Hydromechanics.* 2016. Vol. 64(4), P. 404–414.
227. Nesterova, N., Makarieva, O., & Post, D. A. (2021). 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*, 35(7), e14278. <https://doi.org/10.1002/hyp.14278>
228. 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. 2019b. 381 012068
doi:10.1088/1755-1315/381/1/012068

229. Norwegian Water Resources and Energy Directorate, NVE, URL: <https://www.nve.no/english/>, дата обращения: 05.06.2018

230. Parajka J., Merz R., Bloschl G.: A comparison of regionalisation methods for catchment model parameters, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2005, vol. 9, pp. 157-171, doi:10.5194/hess-9-157-2005.

231. Pettitt A.N. A non-parametric approach to the change point problem // *Applied Statistics*, 1979, 28(2), P.126–135

232. Pomeroy J.W., Gray D.M., Brown T. et al. The cold regions hydrological model: a platform for basing process representation and model structure on physical evidence // *Hydrol. Process.*, 2007, vol. 21, P. 2650–2667

233. Raup B.H., Racoviteanu A., Khalsa S.J.S., Helm C., Armstrong R., Arnaud Y., 2007. The GLIMS geospatial glacier database: a new 31 tool for studying glacier change // *Global and Planetary Change*, Vol. 56, No. 1–2, pp. 101–110, <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.018>.

234. Refsggaard J. C., Storm B. MIKE SHE (Chapter 23). In: *Computer models of watershed hydrology*, V.P. Singh (Ed.), Water Resources Publ., Littleton, Colorado, USA, 1995.

235. Refsggaard J. *Hydrological Modeling and River Basin Management*. Phd thesis, Geological Survey of Denmark and Greenland, 2007, 90.

236. Rogger, Magdalena & Kohl, Bernhard & Pirkl, Herbert & Viglione, Alberto & Komma, J. & Kirnbauer, Robert & Merz, Ralf & Blöschl, Günter. (2012). Runoff models and flood frequency statistics for design flood estimation in Austria - Do they tell a consistent story?. *Journal of Hydrology*. 456-457. 30-43. 10.1016/j.jhydrol.2012.05.068.

237. Schramm I., Boike J., Bolton W. R., Hinzman L. D. Application of TopoFlow, a spatially distributed hydrological model, to the Imnavait Creek watershed, Alaska // *J. Geophys. Res.*, 2007, 112, G04S46, doi:10.1029/2006JG000326

238. Semenova (Makarieva) O., Lebedeva L. Vinogradov Yu. Simulation of subsurface heat and water dynamics, and runoff generation in mountainous permafrost conditions, in the Upper Kolyma River basin, Russia // *Hydrogeology Journal*, 2013, 21(1), P. 107-119 DOI:10.1007/s10040-012-0936-1.

239. Semenova (Makarieva) O., Lebedeva L., Volkova N., Korenev I., Forkel M., Eberle J., Urban M. (2015) Detecting immediate wildfire impact on runoff in a poorly-gauged mountainous permafrost basin. *Hydrological Sciences Journal*. Vol 60, Issue 7-8, 1225-1241 <http://dx.doi.org/10.1080/02626667.2014.959960>

240. Semenova O., Lebedeva L., Vinogradov Yu., 2013. Simulation of subsurface heat and water dynamics, and runoff generation in mountainous permafrost conditions, in the Upper Kolyma

River basin, Russia. *Hydrogeology Journal*, Vol. 21, No. 1, pp. 107–119, <https://doi:10.1007/s10040-012-0936-1>.

241. 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 modeling // *Proc. IAHS*. 2015. 371, P. 157-162, doi: 10.5194/piahs-371-157-2015

242. Sen P. K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau // *J. Am. Statist. Assoc.*, 1968, 63, P. 1379–1389

243. Shiklomanov A. I., Lammers R. B., Lettenmaier D. P., Polischuk Yu. M., Savichev O. G., Smith L. C., and Chernokulsky A. V. Hydrological changes: historic analysis, contemporary status, and future projections, in *Environmental Changes in Siberia: Regional Changes and Their Global Consequences* – Ed. by P. Ya. Groisman and G. Gutman, Berlin, Springer, 2013, Chap. 4, P. 111–154

244. Suzuki K. Estimation of Snowmelt Infiltration into Frozen Ground and Snowmelt Runoff in the Mogot Experimental Watershed in East Siberia // *International Journal of Geosciences*, 2013, Vol. 4 No. 10, P. 1346-1354. doi: 10.4236/ijg.2013.4101310.4236/ijg.2013.410131.

245. Straub T.D., Melching Ch.S., and Kocher K.E. Equations for Estimating Clark Unit-

246. Hydrograph Parameters for Small Rural Watersheds in Illinois. *Water-Resources Investigations Report 00–4184*. Urbana, Illinois, 2000. 30 p.

247. Tananaev N. I., Makarieva O. M., Lebedeva L. S. Trends in annual and extreme flows in the Lena River basin, Northern Eurasia // *Geophysical Research Letters*, 2016, 43, 20136, doi:10.1002/2016GL070796.

248. Tolstykh M.A., Volodin E.M., Kostykin S.V., Fadeev R.Y., Shashkin V.V., Bogoslovskii N.N., Vilfand R.M., Kiktev D.B., Krasjuk T.V., Mizyak V.G., Shlyayeva A.V., Geleyn J.-F., Ezau I.N., Yurova A.Y. Development of the multiscale version of the SL-AV global atmosphere model // *Russian Meteorology and Hydrology*. 2015. Vol. 40(6). P. 374–382.

249. Tornros T., Menzel L. Heading for knowledge in a data scarce river basin: Kharaa, Mongolia. In: Herrman A, Schumann S (eds) *Status and perspectives of hydrology in Small Basins (Proceedings of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March- 2 April 2009)* // *IAHS*, 2010, 336, P. 270–275

250. Verbunt M., Zappa M., Gurtz J. & Kaufmann P. Verification of a coupled hydrometeorological modelling approach for alpine tributaries in the Rhine basin // *Journal of Hydrology*. 2006. Vol. 324. P. 224–238.

251. Vinogradov Yu.B., Semenova O.M., Vinogradova T.A.. An approach to the scaling problem in hydrological modelling: the deterministic modelling hydrological system // *Hydrological Processes*. – 2011. – № 25. – C. 1055–1073.

252. Viviroli, Daniel & Zappa, Massimiliano & Schwanbeck, Jan & Gurtz, J. & Weingartner, Rolf. (2009). Continuous simulation for flood estimation in ungauged mesoscale catchments of Switzerland – Part I: Modelling framework and calibration results. *Journal of Hydrology*. 377. 191-207. 10.1016/j.jhydrol.2009.08.023.
253. Willner, Sven & Levermann, Anders & Zhao, Fang & Frieler, Katja. (2018). Adaptation required to preserve future high-end river flood risk at present levels. *Science Advances*. 4. eaao1914. 10.1126/sciadv.aao1914.
254. Xiang, Z., Demir, I. (2020). Distributed long-term hourly streamflow predictions using deep learning – A case study for State of Iowa. *Environmental Modelling & Software*. 131. 104761. 10.1016/j.envsoft.2020.104761.
255. Zängl G., Reinert D., Ripodas P., and Baldauf, M. The ICON (ICOsahedral Non-hydrostatic) modelling framework of DWD and MPI-M: Description of the non-hydrostatic dynamical core // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2015, Vol. 141 (687), pp. 563-579.
256. Zhang Y., Chiew F.: Relative merits of different methods for runoff predictions in ungauged catchments, *Water Resour. Res.*, 2009, vol. 45, no. 7, W07412, doi:10.1029/2008WR007504.
257. Zhang Y., Suzuki K., Kadota T., Ohata T. Sublimation from Snow Surface in Southern Mountain Taiga of Eastern Siberia // *Journal of Geophysical Research*, 2004, Vol. 109, Article ID: D21103. doi: 10.1029/2003JD003779
258. Zhao Q., Liu Z., Ye B., Qin Y., Wei Z. & Fang S. A snowmelt runoff forecasting model coupling WRF and DHSVM // *Hydrology and Earth Systems sciences*. 2009. Vol. 13. P. 925–940.

ПРИЛОЖЕНИЕ

В Таблице 1 представлен общий список обозначений, используемых в Приложении. Символы $_R$, $_S$, $_I$, $_J$ или их сочетание обозначают отношение переменной к репрезентативной точке (РТ), стокоформирующему комплексу (СФК), расчетному слою почвы (РСП) или ярусу подземных вод (ЯПП) соответственно. Переменные состояния расчетных слоев почвы, снежного покрова начинаются с символа S , слой воды в различных емкостях обозначается символом H , символ P – параметры модели (обычно распределены по СФК, РСП, РТ и ЯПП), символ A – характеристики РТ, MM – входные метеорологические элементы, модифицированные в блоках алгоритма «Интерполяционная модель погоды» и «Метеорология», K – константы, UK – условные константы.

Таблица 1 Общий список обозначений

Блок	Обозначение	Переменная	Единица
Почва-1	A0_S	Близкое залегание грунтовых вод СФК (1 - да, 0 - нет)	б/р
Испарение	A1	Угол наклона РТ	градус
Испарение	DDT	Интервал РИВ после дробления	с
Испарение	DDT_1	Подытинтервал испаряемости	с
Испарение	DS25	Вклад РСП в изменение уровня грунтовых вод	м
Испарение	DX_I	Толщина РСП	м
Испарение	H13_I	Слой испарения из РСП	м
Почва-1	H14_I	Слой замерзшей «жидкой» воды в РСП	м
Почва-1	H15_I	Слой растаявшего льда в РСП	м
Почва-2	H17_2_I	Слой притока воды в РСП	м
Почва-1	H17_I	Слой притока воды в РСП	м
Почва-1	H18_I	Слой оттока воды из РСП	м
Почва-2	H19_1_I	Слой стокообразования в РСП (помежуточное значение)	м
Почва-1	H19_I	Слой стокообразования в РСП	м
Почва-2	H20_I	Слой расчетной компенсации РСП	м
Почва-1	H21_I	Слой расчетной компенсации при заполнении пористости РСП льдом	м
Почва-1	H22	Слой притока воды в подземные воды	м

Почва-2	H24	Общий слой почвенного стокообразования	м
Испарение	H25	Общий слой испарения из слоя почвы	м
Почва-2	H8	Слой поверхностного стокообразования	м
Поверхность	H8_1	Слой поверхностного стокообразования (предварительное значение)	м
Испарение	IK1_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	м
Испарение	IK10_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	1/с
Испарение	IK11_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	м
Испарение	IK12_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	б/р
Испарение	IK13_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	1/с
Испарение	IK14_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	м
Испарение	IK15_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	б/р
Испарение	IK16_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	1/с
Испарение	IK17_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	м
Испарение	IK18_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	б/р
Испарение	IK2_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	м/с
Испарение	IK3_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	1/м
Испарение	IK4_I	Капиллярное поднятие при отсутствии испарения	м
Испарение	IK5_I	Доля вклада в общее испарение РСП, находящегося в зоне капиллярной каймы (промежуточное значение)	б/р

Испарение	IK6_I	Доля вклада в общее испарение РСП (окончательное значение)	б/р
Испарение	IK7_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	1/с
Испарение	IK8_I	локальный идентификатор блока "Испарение и капиллярная компенсация"	м
Испарение	INT12	Интенсивность испаряемости	м/с
Испарение	K1	Плотность воды: 1000 кг/м ³	кг/м ³
Испарение	K2	Плотность льда: 920 кг/м ³	кг/м ³
Почва-1	K3	Удельная массовая теплоемкость воды: 4190 Дж/(кг*град)	Дж/(кг*град)
Почва-1	K4	Удельная массовая теплоемкость льда: 2090 Дж/(кг*град)	Дж/(кг*град)
Почва-1	K5	Коэффициент теплопроводности воды: 0.58 Вт/(м*град)	Вт/(м*град)
Почва-1	K6	Коэффициент теплопроводности льда: 2.22 Вт/(м*град)	Вт/(м*град)
Почва-1	K7	Удельная массовая теплота плавления льда: 3.34*10 ⁵ Дж/кг	Дж/кг
Испарение	KK23_I	Корректирующий коэффициент к параметру пористости	б/р
Почва-1	KK24_I	Корректирующий коэффициент к параметру максимальной водоудерживающей способности РСП	б/р
Почва-1	KK25_I	Корректирующий коэффициент к параметру коэффициента фильтрации РСП	б/р
Почва-2	KK27	Корректирующий коэффициент к гидравлическому параметру почвенных стоковых элементов	б/р
Почва-1	KL9	Ключ стратегии (глубокое или близкое залегание уровня грунтовых вод)	б/р
Почва-1	MI	Максимальный номер РСП	б/р

Испарение	MM2	Эффективный дефицит влажности воздуха при расчете испаряемости с поверхности почвы	мб
Почва-1	P24_I	Плотность вещества РСП	кг/м ³
Испарение	P25_I	Пористость (за вычетом связанной воды)	б/р
Испарение	P26_I	Максимальная водоудерживающая способность (за вычетом связанной воды)	м
Почва-1	P27_I	Коэффициент фильтрации на нижней границе нижнего РСП	м/с
Почва-1	P28_I	Удельная массовая теплоемкость вещества	Дж/(кг*град)
Испарение	P31_I	Вклад в общее испарение	б/р
Почва-2	P32_S	Гидравлический параметр системы почвенных стоковых элементов	м ³ /с
Испарение	P44	Высота капиллярного поднятия	м
Испарение	P45	Показатель степени в выражении капиллярной влагоемкости	б/р
Почва-1	PA1	Количество тепловой энергии в РСП	Дж
Почва-1	PA2_I	Максимальная водоудерживающая способность, или капиллярная, или полная влагоемкость (в зависимости от положения РСП в насыщенной зоне, зоне капиллярного поднятия и в зоне, выше капиллярного поднятия)	м
Почва-1	PA3	Локальный идентификатор блока "Почва-1"	м
Почва-1	PA3_I	Локальный идентификатор блока "Почва-1"	м
Почва-1	PA4	Локальный идентификатор блока "Почва-1"	номер РСП (от 1 до MI)
Почва-2	PB1_I	Слой свободной воды в РСП	м
Почва-2	PB2_I	Поровое пространство РСП за вычетом максимальной водоудерживающей способности или капиллярной влагоемкости	б/р

Почва-2	PB3_I	Предельный слой истечения воды из РСП при его постоянном полном затоплении в течение всего расчетного интервала времени	м
Почва-2	PB4_I	Локальный идентификатор блока "Почва-2"	м
Почва-2	PB5_I	Слой свободной воды в РСП в конце расчетного интервала времени	м
Испарение	PP9	Коэффициент испаряемости с поверхности почвенно-растительного покрова	м/(гПа с)
Испарение	S17_I	Слой "жидкой" воды в РСП	м
Испарение	S18_I	Слой "твердой" воды в РСП	м
Почва-1	S19_I	Температура РСП	град С
Испарение	S25	Глубина залегания уровня грунтовых вод	м
Испарение	S25_0	Глубина залегания уровня грунтовых вод (начальное условие)	м
Снежный покров	SP	Признак наличия снежного покрова	б/р
Почва-1	SS11_I	Количество тепловой энергии, необходимое для плавления всего льда в РСП	Дж
Почва-1	SS12_I	Количество тепловой энергии, необходимое для замерзания всей воды в РСП	Дж
Испарение	SS13_1_I	Количество тепловой энергии в РСП (предварительное значение)	Дж
Испарение	SS13_I	Количество тепловой энергии в РСП	Дж
Почва-1	SS14_I	Объемная льдистость РСП	б/р
Испарение	SS15_I	Максимальная водоудерживающая способность РСП при наличии льда	м
Испарение	SS16_I	Коэффициент фильтрации РСП при наличии льда	м/с
Почва-1	SS31	Глубина промерзания почвы	м
Почва-1	SS32	Глубина протаивания почвы	м
Испарение	SS33_I	Слой капиллярной влагоемкости талого РСП	м

Испарение	SS34_I	Слой капиллярной влагоемкости РСП при наличии в нем льда	м
Почва-1	T11_I	Количество тепловой энергии, поступившей в снежный покров за РИВ или его подынтервал	Дж
Почва-1	T12_I	Количество тепловой энергии, поступившей в I+1-й РСП вместе с притоком воды	Дж
Почва-1	T13_I	Количество тепловой энергии, потерянное РСП вместе с оттоком воды	Дж
Почва-2	UK14	Гидравлическая постоянная системы почвенных стоковых элементов	1/м ³
Испарение	X_I	Глубина расположения РСП (расстояние от поверхности до середины РСП)	м

Таблица 2 Блок алгоритма «Испарение и капиллярная компенсация»

Вход: S13_I_0, S15_I_0, S17_I_0, S18_I_0, S19_I_0, S25_0

Выход: S17_1_I, S25_1, SS13_1_I, H25, LPF1_I

№	Управление
1	I = 1 номер РСП (расчетного слоя почвы)
2	I = I + 1 движение от верхнего РСП к нижнему
	Условия
1	X_I[i] > S25_0 глубина расположения РСП ниже глубины уровня почвенных вод (насыщенная зона)
2	i > 0 и X_I[i-1] > S25_0 предыдущий (верхний) РСП также в насыщенной зоне
3	X_I[i] > (S25_0 - P44_S[s]) выше уровня грунтовых вод в зоне капиллярной каймы
4	Нет снежного покрова SP = 0
5	S17_I_0[i] ≤ SS15_I_0[i]
6	S17_2_I ≤ SS15_I_0[i]
7	S17_3_I > SS34_I_0
8	S17_2_I > SS34_I_0
9	I = MI
	Операции
1	1.1. интенсивность испаряемости INT12 = PP9_S * MM2 / cos(A1_R) 1.2. общий слой испарения из слоя почвы H25 = 0 1.3. глубина залегания уровня грунтовых вод (первое промежуточное значение) S25_1 = S25_0
	РСП в насыщенной зоне
2	2.1. слой испарения из РСП H13_I = 0 2.2. слой жидкой воды в РСП, находящегося в насыщенной зоне (промежуточное значение) S17_1_I[i] = P25_I_S[s][i] * DX_I_S[s][i] - S18_I_0[i] * K1 / K2
3	3.1. доля вклада в общее испарение РСП, находящегося в насыщенной зоне IK6_I[i] = 1 3.2. доля вклада в общее испарение РСП, находящегося в насыщенной зоне IK6_I[i] -= IK6_I[j] 3.3. слой испарения из РСП, находящегося в насыщенной зоне

	$H13_I = IK6_I[i] * INT12 * DDT$ <p>3.4 слой жидкой воды в РСП, находящегося в насыщенной зоне (промежуточное значение) $S17_1_I[i] = P25_I_S[s][i] * DX_I_S[s][i] - S18_I_0[i] * K1/K2 - H13_I$</p>
4	признак расположения РСП в насыщенной зоне $LPF1_I[i] = 3$
РСП выше уровня почвенных или грунтовых вод в зоне капиллярной каймы	
5	<p>5.1 слой капиллярной влагоемкости талого РСП (начальное значение)</p> $SS33_I_0[i] = \text{pow}(((1 - (S25_0 - X_I[i]) / P44_S[s]) * \text{pow}(P25_I_S[s][i] * DX_I_S[s][i], P45_S[s]) + \text{pow}(P26_I_S[s][i], P45_S[s]) * (S25_0 - X_I[i]) / P44_S[s]), 1 / P45_S[s])$ <p>5.2 слой капиллярной влагоемкости РСП при наличии в нем льда (начальное значение) $SS34_I_0 = SS33_I_0[i] * SS15_I_0[i] / P26_I_S[s][i]$</p> <p>5.3 сохранение для блока «Поверхность» (если РСП=1) если (i=0) $SS34_I_0 = SS34_I_0$</p> <p>5.4 если $(S17_I_0[i] > SS34_I_0)$ $IK1_I = SS34_I_0$ если нет $IK1_I = S17_I_0[i]$</p> <p>5.5 $IK2_I = SS16_I[i] * (P44_S[s] - S25_0 + X_I[i]) / (S25_0 - X_I[i])$</p> <p>5.6 $IK3_I = 1 / (SS34_I_0)$</p> <p>5.7 признак расположения РСП в зоне капиллярной каймы $LPF1_I[i] = 2$</p>
6	<p>6.1 $IK10_I = IK2_I * IK3_I + IK6_I[i] * INT12 / (SS15_I_0[i])$</p> <p>6.2 $IK11_I = IK2_I / IK10_I$</p> <p>6.3 $IK12_I = \exp(-IK10_I * DDT)$</p> <p>6.4 $S17_2_I = IK10_I * (1 - IK12_I) + IK1_I * IK12_I$</p>
7	<p>8.1 $IK6_I[i] = P31_I_S[s][i]$</p> <p>8.2 $S17_1_I[i] = S17_2_I$</p> <p>8.3 слой испарения из РСП</p> $H13_I = 0.5 * IK6_I[i] * INT12 * DDT * (S17_1_I[i] + IK1_I) / (SS15_I_0[i])$
8	<p>8.1 подынтервал испарения</p> $DDT_2 = (1 / (IK10_I)) * \log((IK11_I - IK1_I) / (IK11_I - SS15_I_0[i]))$ <p>8.2 доля вклада в общее испарение РСП, находящегося в зоне капиллярной каймы (промежуточное значение)</p>

	$IK5_I = \max(\text{float}(0), S17_2_I - SS15_I_0[i]) * (1 - IK6_I[i]) / (KK23 * P25_I_S[s][i]) * DX_I_S[s][i] - S18_I_0[i] * K1/K2 - SS15_I_0[i]) + IK6_I[i]$ <p>8.3 $IK6_I[i]=1$</p> <p>8.4 если ($i>0$) for (int j=i-1; j>=0; j--) $IK6_I[i] -= IK6_I[j]$</p> <p>8.5 $IK6_I[i] = \min (IK5_I, IK6_I[i])$</p> <p>8.6 $IK16_I = IK2_I * IK3_I$</p> <p>8.7 $IK17_I = (IK2_I - IK6_I[i] * INT12) / IK16_I$</p> <p>8.8 $IK18_I = \exp (-IK16_I * (DDT - DDT_2))$</p> <p>8.9 $S17_3_I = IK17_I * (1 - IK18_I) + SS15_I_0[i] * IK18_I$</p>
9	слой жидкой воды в РСП (предварительное значение) $S17_1_I[i] = SS34_I_0$
10	слой жидкой воды в РСП (предварительное значение) $S17_1_I[i] = S17_3_I$
11	11.1 слой испарения из РСП $H13_I = INT12 * IK6_I[i] * (DDT - DDT_2 + 0.5 * (S17_1_I[i] + IK1_I) * DDT_2 / SS15_I_0[i])$
12	<p>12.1 $IK6_I[i] = P31_I_S[s][i]$</p> <p>12.2 доля вклада в общее испарение РСП, находящегося в зоне капиллярной каймы (промежуточное значение)</p> $IK5_I = \max((\text{float})0, IK1_I - SS15_I_0[i]) * (1 - IK6_I[i]) / (KK23 * P25_I_S[s][i]) * DX_I_S[s][i] - S18_I_0[i] * K1/K2 - SS15_I_0[i]) + IK6_I[i]$ <p>12.3 то же (окончательное значение) $IK6_I[i]=1$</p> <p>12.4 если ($i>0$) for (int j=i-1; j>=0; j--) $IK6_I[i] -= IK6_I[j]$</p> <p>12.5 $IK6_I[i] = \min (IK5_I, IK6_I[i])$</p> <p>12.6 $IK7_I = IK2_I * IK3_I$</p> <p>12.7 $IK8_I = (IK2_I - IK6_I[i] * INT12) / (IK7_I)$</p> <p>12.9 $IK9_I = \exp(-IK7_I * DDT)$</p> <p>12.10 $S17_2_I = IK8_I * (1 - IK9_I) + IK1_I * IK9_I$</p>
13	<p>13.1 подынтервал испаряемости $DDT_1 = (1 / (IK7_I)) * \log((IK8_I - IK1_I) / (IK8_I - SS15_I_0[i]))$</p> <p>13.2 $IK13_I = IK2_I * IK3_I + P31_I_S[s][i] * INT12 / (SS15_I_0[i])$</p> <p>13.3 $IK14_I = IK2_I * IK13_I$</p> <p>13.4 $IK15_I = \exp (-IK13_I * (DDT - DDT_1))$</p>

	<p>13.5 $S17_1_I[i] = IK14_I*(1-IK15_I) + SS15_I_0[i]*IK15_I$</p> <p>13.6 слой испарения из РСП</p> <p>$H13_I = INT12*(IK6_I[i]*DDT_1 + 0.5*P31_I_S[s][i]*(S17_1_I[i]+IK1_I)*(DDT- DDT_1)/SS15_I_0[i])$</p>
14	<p>14.1 подынтервал испаряемости</p> <p>$DDT_1 = (1/(IK7_I+1e-6)) * \log((IK8_I-IK1_I)/(IK8_I-SS15_I_0[i]))$</p> <p>14.2 $IK13_I = IK2_I*IK3_I+P31_I_S[s][i] * INT12/(SS15_I_0[i])$</p> <p>14.3 $IK14_I = IK2_I*IK13_I$</p> <p>14.4 $IK15_I = \exp(-IK13_I*(DDT - DDT_1))$</p> <p>14.5 $S17_1_I[i] = IK14_I*(1-IK15_I) + SS15_I_0[i]*IK15_I$</p> <p>14.6 слой испарения из РСП</p> <p>$H13_I = INT12*(IK6_I[i]*DDT_1 + 0.5*P31_I_S[s][i]*(S17_1_I[i]+ IK1_I)*(DDT- DDT_1)/SS15_I_0[i])$</p>
15	$S17_1_I[i] = SS34_I_0$
16	$S17_1_I[i] = S17_2_I$
17	<p>слой испарения из РСП</p> <p>$H13_I = 0.5*IK6_I[i]*INT12*DDT*(S17_1_I[i]+IK1_I)/(SS15_I_0[i])$</p>
18	<p>18.1 капиллярное поднятие при отсутствии испарения</p> <p>$IK4_I = \exp(-IK2_I*IK3_I*DDT)$</p> <p>18.2 слой жидкой воды в РСП (промежуточное значение)</p> <p>$S17_1_I[i] = SS34_I_0*(1-IK4_I) + IK1_I*IK4_I$</p> <p>18.3 слой испарения из РСП $H13_I = 0$</p>
РСП вне зоны капиллярной каймы	
19	<p>19.1 если $(S17_I_0[i]>SS15_I_0[i])$</p> <p>$IK1_I=SS15_I_0[i]$</p> <p>Если нет $IK1_I = S17_I_0[i]$</p> <p>19.2 признак расположения РСП выше капиллярной каймы $LPF1_I[i] = 1$</p>
20	<p>20.1 $IK6_I[i] = P31_I_S[s][i]$</p> <p>20.2 $S17_1_I[i] = S17_I_0[i]*\exp(-IK6_I[i]*INT12*DDT/(SS15_I_0[i]))$</p> <p>20.3 $H13_I = S17_I_0[i] - S17_1_I[i]$</p>

21	21.1 слой жидкой воды в РСП (промежуточное значение) $S17_1_I[i] = S17_I_0[i]$ 21.2 слой испарения из РСП $H13_I = 0$
22	22.1 количество тепловой энергии в РСП (промежуточное значение) $SS13_1_I[i] = SS13_I_0[i] * S17_1_I[i] / S17_I_0[i];$ 22.2 вклад РСП в изменение уровня грунтовых вод $DS25_I = H13_I + S17_1_I[i] - S17_I_0[i]$ 22.3 глубина залегания уровня грунтовых вод (первое промежуточное значение) $S25_1 += DS25_I$
23	слой испарения с почвенного профиля $H25 += H13_I$

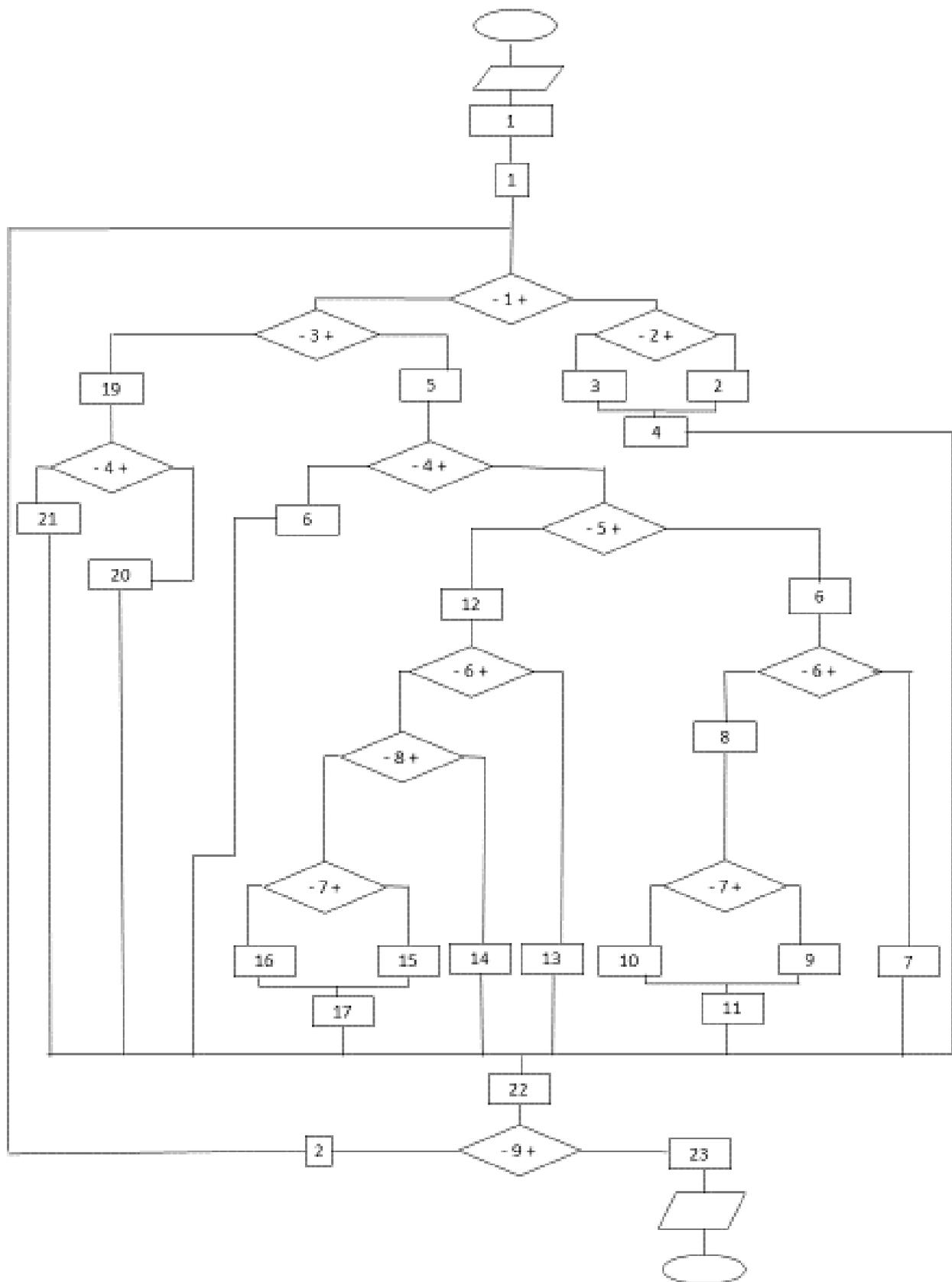


Рисунок 1 Блок-схема алгоритма «Испарение и капиллярная компенсация»

Таблица 3 Блок алгоритма «Почва-1»

Вход: H17_1_III, T12_III, T11_I, S17_1_I, S18_I_0, SS11_1_I, SS12_1_I, SS13_1_I, LPF1_I

Выход: S17_I, S18_I, S19_I, SS14_I, H17_2_I, H18_I, H19_1_I, H21_I, H22, SS13_I, SS31, SS32, PA2_I, PA4

№	Управление
1	I = 1 номер РСП (расчетного слоя почвы)
2	I = I + 1 движение от верхнего РСП к нижнему
	Условия
1	$PA1_1_I \geq 0$
2	$ PA1_1_I \leq SS12_I $
3	$PA1_1_I \leq SS11_1_I[i]$
4	$SS14_1_I > 1$
5	$S17_2_I \leq PA2_I$
6	Не условие $KL9 \ \&\& \ A0_S[s]$
7	Текущий РСП не расположен в зоне насыщения, нижний РСП расположен в зоне насыщения $LPF1_I[i+1]=3$ и $LPF1_I[i] \neq 3$
8	I = MI последний РСП
9	признак расположения РСП в насыщенной зоне $LPF1_I[i] = 3$
10	$H18_I[i] \leq SS16_I[i+1] * DDT$
11	$PA3 = 0$
12	$H18_I[MI] \leq KK25 * P27_I_S[s][MI] * DDT$
	Операции
1	1.1 T12_I = T12_III (переносим из блока «Поверхность») 1.2 H17_2_I [0] = H17_1_III
2	2.1 количество тепловой энергии, необходимое для замерзания воды в РСП $SS12_I = SS12_1_I[i] - K1 * K7 * H17_2_I[i]$ 2.2 количество тепловой энергии в РСП (промежуточное значение) $PA1_1_I = SS13_1_I[i] + T11_I[i] + T12_I;$
3	3.1 количество тепловой энергии в РСП (второе промежуточное значение) $PA1_I = PA1_1_I - SS12_I$ 3.2 слой замерзшей «жидкой» воды в РСП $H14_I[i] = S17_1_I[i] + H17_2_I[i]$

4	<p>4.1 $PA1_I = 0$</p> <p>4.2 $H14_I[i] = PA1_I / (-K1 * K7)$</p>
5	<p>5.1 количество тепловой энергии, потерянное РСП вместе с оттоком воды</p> <p>$T13_I = 0$</p> <p>5.2 слой растаявшего льда в РСП $H15_I[i] = 0$</p> <p>5.3 слой твердой воды в РСП (промежуточное значение)</p> <p>$S18_1_I = S18_I_0[i] + H14_I[i]$</p> <p>5.4 объемная льдистость РСП (промежуточное значение)</p> <p>$SS14_1_I = S18_1_I * K1 / (K2 * KK23 * P25_I_S[s][i] * DX_I_S[s][i])$</p> <p>5.5 объемная льдистость РСП $SS14_I[i] = \min(SS14_1_I, 1)$</p> <p>5.6 максимальная водоудерживающая способность при наличии льда</p> <p>$SS15_I[i] = KK24 * P26_I_S[s][i] * (1 - SS14_I[i])$</p> <p>5.7 максимальная водоудерживающая способность, или капиллярная, или полная влагоемкость (в зависимости от положения РСП в насыщенной зоне, зоне капиллярного поднятия и в зоне, выше капиллярного поднятия)</p> <p>если $(LPF1_I[i] = 1)$ $PA2_I = SS15_I[i]$</p> <p>если $(LPF1_I[i] = 2)$ $PA2_I = SS33_I_0[i] - S18_I[i] * K1 / K2$</p> <p>если $(LPF1_I[i] = 3)$ $PA2_I = KK23 * P25_I_S[s][i] * DX_I_S[s][i] - S18_I[i];$</p>
6	<p>6.1 слой жидкой воды в РСП $S17_I[i] = 0$</p> <p>6.2 слой оттока воды из РСП $H18_I[i] = 0$</p>
7	<p>7.1 слой жидкой воды в РСП (промежуточное значение)</p> <p>$S17_2_I = S17_1_I[i] - H14_I[i] + H17_2_I[i]$</p> <p>7.2 слой жидкой воды в РСП $S17_I[i] = \min(S17_2_I, PA2_I)$</p> <p>7.3 слой оттока воды из РСП $H18_I[i] = S17_2_I - PA2_I$</p>
8	<p>8.1 слой расчетной компенсации при заполнении пористости РСП льдом</p> <p>$H21_I[i] = 0$</p> <p>8.2 слой твердой воды в РСП $S18_I[i] = S18_1_I$</p> <p>8.3 количество тепловой энергии в РСП $SS13_I[i] = PA1_I$</p>

9	<p>9.1 $H21_I[i] = S18_1_I*(SS14_1_I-1)/SS14_1_I;$</p> <p>9.2 $S18_I[i] = S18_1_I - H21_I[i]$</p> <p>9.3 $SS13_I[i] = PA1_I - K1*K7*H21_I[i];$</p>
10	<p>температура РСП</p> <p>$S19_I[i] = SS13_I[i]/((P24_I_S[s][i]*P28_I_S[s][i]*(1 -KK23*P25_I_S[s][i]) * DX_I_S[s][i] + K1*K3*S17_I[i] + K1*K4*S18_I[i])*cos(A1_R[r]))$</p>
11	<p>11.1 количество тепловой энергии в РСП (второе промежуточное значение)</p> <p>$PA1_I = PA1_1_I - SS11_1_I[i]$</p> <p>11.2 слой растаявшего льда в РСП $H15_I[i] = S18_I_0[i]$</p> <p>11.3 слой твердой воды в РСП $S18_I[i] = 0$</p> <p>11.4 объемная льдистость РСП $SS14_I[i] = 0$</p>
12	<p>12.1 $PA1_I = 0$</p> <p>12.2 $H15_I[i] = PA1_1_I/(K1*K7)$</p> <p>12.3 $S18_I[i] = S18_I_0[i] - H15_I[i]$</p> <p>12.4 объемная льдистость РСП</p> <p>$SS14_I[i] = K1*S18_I[i]/(K2*KK23*P25_I_S[s][i] * DX_I_S[s][i])$</p> <p>12.5 максимальная водоудерживающая способность при наличии льда</p> <p>$SS15_I[i] = KK24*P26_I_S[s][i] (1 - SS14_I[i])$</p>
13	<p>13.1 $H21_I[i] = 0$</p> <p>13.2 $H14_I[i] = 0$</p> <p>13.3 $S17_2_I = S17_1_I[i] + H15_I[i] + H17_2_I[i]$</p> <p>13.4 температура РСП $S19_I[i] = PA1_I/((P24_I_S[s][i]*P28_I_S[s][i]*(1 - KK23*P25_I_S[s][i])*DX_I_S[s][i] + K1*K3*S17_2_I + K1*K4*S18_I[i])*cos(A1_R[r]));$</p> <p>13.5 максимальная водоудерживающая способность, или капиллярная, или полная влагоемкость (в зависимости от положения РСП в насыщенной зоне, зоне капиллярного поднятия и в зоне, выше капиллярного поднятия)</p> <p>Если $(LPF1_I[i] = 1)$ $PA2_I = SS15_I[i]$</p> <p>Если $(LPF1_I[i] = 2)$ $PA2_I = SS33_I_0[i] - S18_I[i]*K1/K2$</p> <p>Если $(LPF1_I[i] = 3)$ $PA2_I = KK23*P25_I_S[s][i]*DX_I_S[s][i] - S18_I[i];$</p>

14	<p>14.1 слой жидкой воды в РСП $S17_I[i] = PA2_I$</p> <p>14.2 слой оттока воды из РСП $H18_I[i] = S17_2_I - PA2_I$</p> <p>14.3 количество тепловой энергии, потерянное РСП вместе с оттоком воды $T13_I = K1 * K3 * H18_I[i] * S19_I[i] * \cos(A1_R[r])$</p> <p>14.4 количество тепловой энергии в РСП $SS13_I[i] = PA1_I - T13_I$</p>
15	<p>15.1 $S17_I[i] = S17_2_I$</p> <p>15.2 $H18_I[i] = 0$</p> <p>15.3 $T13_I = 0$</p> <p>15.4 $SS13_I[i] = PA1_I$</p>
16	<p>$PA3_I[i] = H18_I[i]$</p> <p>$PA4 = i$</p>
17	$PA3_I[i] = 0$
18	<p>18.1 слой притока воды в I+1-й РСП (второе промежуточное значение) $H17_2_I[i+1] = SS16_I[i+1] * DDT$</p> <p>18.2 слой стокообразования в РСП (промежуточное значение) $H19_1_I[i] = H18_I[i] - H17_2_I[i+1]$</p> <p>18.3 количество тепловой энергии, поступившей в I+1-й РСП вместе с притоком воды $T12_I = T13_I * H17_2_I[i+1] / H18_I[i]$</p>
19	<p>19.1 $H17_2_I[i+1] = H18_I[i]$</p> <p>19.2 $H19_1_I[i] = 0$</p> <p>19.3 $T12_I = T13_I$</p>
20	<p>20.1 $H17_2_I[i+1] = 0$</p> <p>20.2 $T12_I = 0$</p>
21	<p>21.1 $PA3 = 0$</p> <p>21.2 $PA3 = \sum_1^{MI} PA3_I[i]$</p>
22	<p>Слой притока воды в подземные воды</p> <p>$H22 = PA3$</p>
23	<p>23.1 слой притока в подземные воды $H22 = KK25 * P27_I_S[s][MI_S[s]] * DDT$</p> <p>23.2 слой стокообразования в нижнем РСП (промежуточное значение) $H19_1_I[MI-1] = H18_I[MI-1] - H22$</p>

24	24.1 $H_{22} = H_{18_I}[MI-1]$ 24.2 $H_{19_1_I}[MI-1] = 0$
25	25.1 глубина промерзания почвы SS31 25.2 глубина протаивания почвы SS32

Таблица 4 Блок алгоритма «Почва-2»

Вход: S18_I, H8_1, H17_2_I, H19_1_I, H21_I, SS14_I

Выход: H8, H17_I, H19_I, H24, PB5_I

№	Управление
1	$I = MI$ номер РСП (расчетного слоя почвы)
2	$I = I - 1$ движение от нижнего РСП к верхнему
	Условия
1	$LPF1_I[i] = 3$ РСП расположен в зоне насыщения
2	$PB1_I = 0$ слой свободной воды в РСП
3	$PB1_I < PB4_I$
4	$I = 1$ Верхний РСП
	Операции
1	1.1 $H20_I[MI] = 0$ 1.2 Слой расчетной компенсации при заполнении пористости РСП льдом $H21_I[MI] = 0$
2	Слой свободной воды в РСП $PB1_I = H19_1_I[i] + H20_I[i+1] + H21_I[i+1] + PB5_I_0[i]$
3	3.1 если $LPF1_I[i] = 1$ – $PA2_I = SS15_I[i]$ – поровое пространство за вычетом максимальной водоудерживающей способности или капиллярной влагоемкости $PB2_I[i] = KK23 * P25_I_S[s][i] * DX_I_S[s][i] - PA2_I$ если $LPF1_I[i] = 2$ – $PA2_I = SS33_I_0[i] - S18_I[i] * K1/K2$ – $PB2_I[i] = KK23 * P25_I_S[s][i] * DX_I_S[s][i] - PA2_I$ 3.2 предельный слой истечения воды из РСП при его постоянном полном затоплении в течение всего расчетного интервала времени $PB3_I[i] = KK27 * P32_S[s] * DDT * (\exp(UK14 * PB2_I[i]) - 1)$ $PB4_I = PB2_I[i] + PB3_I[i]$

4	<p>4.1 $H19_I[i] = PB3_I[i]$</p> <p>4.2 $H20_I[i] = PB1_I - PB4_I$</p> <p>4.3 $PB5_I[i] = PB2_I[i]$</p>
5	<p>5.1 $H19_I[i] = PB1_I / (PB2_I[i] / PB3_I[i] + 1)$</p> <p>5.2 $H20_I[i] = 0$</p> <p>5.3 $PB5_I[i] = PB1_I - H19_I[i]$</p>
6	<p>6.1 Слой стокообразования в РСП $H19_I[i] = 0$</p> <p>6.2 Слой расчетной компенсации $H20_I[i] = 0$</p> <p>6.3 Слой свободной воды в конце расчетного интервала времени $PB5_I[i] = 0$</p> <p>6.4 $PB2_I[i] = 0$</p> <p>6.5 $PB3_I[i] = 0$</p>
7	<p>7.1 Слой притока воды в РСП $H17_I[i] = H17_2_I[i]$</p> <p>7.2 $H20_I[i-1] = H20_I[i]$</p>
8	<p>8.1 общий слой почвенного стокообразования $H24=0$</p> <p>8.2 $H24 = \sum_1^{MI} H19_I[i]$</p> <p>8.3 для (I от 1 до MI) $S17_I[i] += PB5_I[i]$</p> <p>8.4 слой поверхностного стокообразования $H8 = H8_1 + H20_I [0] + H21_I [0]$</p> <p>8.5 слой притока воды в РСП-1 $H17_I [0] = H17_2_I [0] - H8 + H8_1$</p>

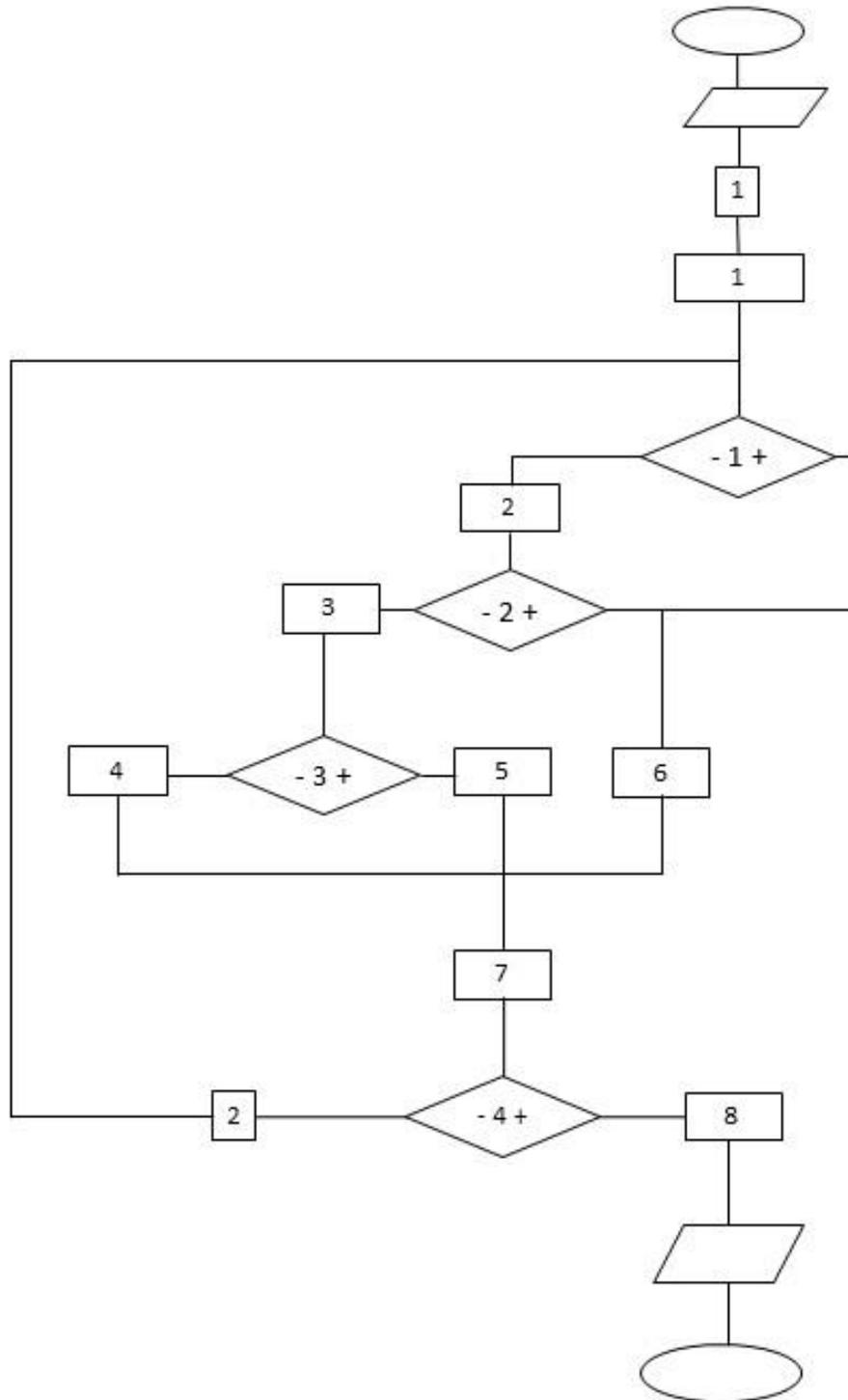


Рисунок 3 Блок-схема алгоритма «Почва-2»