

на правах рукописи

Шевердяев Игорь Викторович

**ФОРМИРОВАНИЕ И РАЗВИТИЕ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ
НА РЕКАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА
НА ПРИМЕРЕ РЕКИ АДАГУМ**

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной
степени кандидата географических
наук

Санкт-Петербург – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Федеральном исследовательском центре Южном научном центре Российской академии наук» (ЮНЦ РАН)

Научный руководитель: **Сергей Владимирович Бердников**, доктор географических наук.

Официальные оппоненты: **Болгов Михаил Васильевич**, доктор технических наук, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией моделирования поверхностных вод Института водных проблем РАН, Москва.
Епринцев Сергей Александрович, кандидат географических наук, доцент кафедры геоэкологии и мониторинга окружающей среды Воронежского Государственного Университета, г. Воронеж.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение «**Российский информационно-аналитический и научно-исследовательский водохозяйственный центр**», Ростов-на-Дону

Защита диссертации состоится «___» _____ 2018 года в _____ на заседании Диссертационного совета Д 212.197.03 по адресу: г. Санкт-Петербург, пр. Металлистов дом 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «___» _____ 2018 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.197.03
доктор технических наук



Истомин Е.П.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

В начале XXI века участились опасные природные явления на территории России. В связи с климатическими колебаниями погода становится неустойчивой. В конце XX века распространилась гипотеза о глобальном потеплении климата (Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production: Priority Products and Materials, UNEP, Hertwich, E., van der Voet, E. and others, 2010). В рамках неё утверждается, что таяние ледников в полярных и приполярных областях, сокращение площадей горного оледенения приводит к увеличению совокупного объёма воды, участвующего в её круговороте. Это подразумевает увеличение количества и интенсивности осадков в разных регионах мира, учащение случаев нехарактерных природных явлений для разных уголков планеты. В последние пятнадцать лет в России к традиционным весенним половодьям, приносящим практически ежегодно большой ущерб человеческой деятельности, добавились учащённые опасные дождевые паводки, особенно на территории Северо-Западного Кавказа.

Треть опасных природных явлений (ОПЯ) в России за постсоветские годы составили наводнения, их совокупный ущерб превысил 4 млрд. долларов, пострадало более 2 млн. человек, погибло 755 человек (EM-DAT. The International Disaster Database. Center for Research on the Epidemiology of Disasters, www.emdat.be). На Северо-Западном Кавказе с 2000 по 2014 гг. произошло 7 наводнений и погибло 476 человек, почти полмиллиона пострадавших и более полутора миллиардов долларов ущерба. Наибольший по масштабу, последствиям и общественной огласке паводок произошёл в июле 2012 года в бассейне рр. Адагум, Цемес, Абин, Яшамба, Адегой. В эпицентре стихии оказался Адагум. Кроме этого практически ежегодно опасные паводки наблюдаются на реках черноморского побережья или на левых притоках Кубани. Паводок 2012 года отличался не только масштабами материального ущерба, но и повышенным вниманием научного сообщества. Он стал одним из самых хорошо изученных паводков в регионе: был выпущен отчёт Росгидромета [Катастрофический паводок в бассейне р.Адагум 6-7 июля 2012 г. и его причины, В.Ю.Георгиевский, Ю.Ю.Ткаченко], в котором рассматривалось развитие паводка, были выпущены монографии и статьи специалистами Института водных проблем РАН [Предотвращение катастрофических паводков и обеспечение безопасности Крымского района Краснодарского края/Под ред. В.И. Данилова-Данильяна и М.В. Болгова, 2013, Болгов М.В., Коробкина Е.А. Реконструкция дождевого паводка на реке Адагум на основе математических моделей формирования стока. 2013. № 3. С. 87–102], Института географии РАН [Котляков В.М. и др. Наводнение 6–7 июля 2012 года в городе Крымске // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 6. С. 80–88.] МГУ [Численное гидродинамическое моделирование наводнения в г. Крымске 6-7 июля 2012 г. / Н. И. Алексеевский и др.// Гидротехническое

строительство. - 2014. - № 3. - С. 29-35], ЮНЦ РАН [Матишов Г.Г., Клещенков А.В. Кубанский паводковый кризис. Климат, геоморфология, прогноз. Крымск, июль 2012 г. Ростов-н/Д.: Изд. ЮНЦ РАН, 2012. 128 с.], что вкупе с созданием автоматической системы мониторинга паводковой ситуации Краснодарского края (АС МПСКК), которая состоит из сети фиксирующих значения уровня с дискретностью 10 минут автоматических уровнемеров на реках Западного Кавказа, и с развитием гидрологического моделирования стало основой для данного исследования.

Исследование особенностей формирования опасных паводков на реках Северо-Западного Кавказа, в том числе антропогенной деятельности, необходимо для выработки решений по управлению рисками ОПЯ, определения возможностей их оперативного прогнозирования. Актуальность данной работы обусловлена острой необходимостью управления паводковыми рисками региона. Опасные паводки в работе рассматриваются как источник геоэкологической опасности, т.е. угрозы ухудшения условий человеческой деятельности.

Объект исследования: речные системы Северо-Западного Кавказа.

Предмет исследования: особенности формирования и развития дождевых паводков на реках Северо-Западного Кавказа

Цель исследования: оценка факторов формирования и прохождения опасных паводков на реках Северо-Западного Кавказа.

Для достижения цели были выделены следующие задачи:

1. Провести анализ природных и антропогенных условий формирования и прохождения дождевых паводков на реках Северо-Западного Кавказа, сравнить водосборы региона по степени паводковой опасности.

2. Рассмотреть процессы формирования и прохождения паводков на реках региона на примере паводка 6-7 июля 2012 года на реке Адагум, с помощью гидрологического моделирования оценить влияние застройки поймы на опасность паводка.

3. Оценить эффективность проводимых противопаводковых мер в регионе.

Материалы и методы исследований, особенности подхода

1. Официальный отчёт Росгидромета, в котором показаны оперативные данные о развитии паводка, в частности почасовые зафиксированные осадки на метеостанциях Крымск и Новороссийск 6-7 июля 2012 года, ход уровня в Крымске до затопления поста, динамика наполнения Неберджаевского водохранилища и зафиксированные на водосборе уровни высоких вод.

2. Собственные полевые исследования, проведённые в составе экспедиций ЮНЦ РАН (15-16 июля 2012 г. и с 27 июля по 3 августа 2012 г.) в районе катастрофического паводка 6-7 июля 2012 года для выявления следов стихии, геоморфологических условий на водосборе на территории Крымского района, Новороссийска, Геленджика и Абинского района. Были

зафиксированы отметки максимальных уровней в различных частях водосбора, максимальная ширина затопления долины, построены поперечные профили речных долин. Кроме того, была проведена экспедиция в бассейн р. Адагум для уточнения параметров используемых в работе гидрологических моделей, а также поперечных профилей долины в местах установки автоматических уровнемеров. Эти материалы вместе с отчётом Росгидромета легли в основу реконструкции развития паводка.

3. Результаты исследований коллег из МГУ, ИГ, ИВП, представленные в опубликованных научных работах – оценки факторов развития паводка, причин большого ущерба, гипотеза о роли замусоренности русла и мостовых проёмов.

4. Литературные данные о распределении различных свойств водосборов, которые были использованы для адаптации зарубежных гидрологических моделей для водосборов рек Северо-Западного Кавказа.

5. Документы госзакупки по преобразованию русла реки Адагум в окрестностях Крымска, которые были разработаны Кубаньводпроектом по результатам НИР ИВП. Использовались для включения в гидрологическую модель окрестностей Крымска детальной цифровой модели местности (ЦММ) долины реки Адагум в вариантах естественного и преобразованного состояния.

6. Наблюдения уровнемеров АС МПСКК использовались для калибровки параметров гидрологической модели водосбора реки Адагум.

Использовались методы:

1. Картографический метод.

2. Генетический метод построения гидрографов.

3. Метод реконструкций. Использовался в сочетании с ГИС для восстановления хронологии развития паводка по данным полевых исследований, свидетельствам очевидцев, данным Росгидромета и др.

4. Во время экспедиций проводилась съёмка поперечных профилей, отметок УВВ и др.

5. Геоинформационные методы (ГИС), которые позволили собрать, систематизировать и обработать результаты полевых исследований, визуализировать и оценить результаты моделирования.

6. Моделирование прохождения паводков. Использовались гидрологические модели семейства НЕС, адаптированные в ходе работы к условиям водосбора р. Адагум. Модель НЕС-HMS использовалась для имитации формирования паводков по бассейновому принципу: с помощью неё рассчитывалась динамика расходов на различных участках водосбора. Модель НЕС-RAS использовалась для имитации прохождения паводков в окрестностях г. Крымска.

Соответствие диссертации паспорту специальности: Тема диссертационной работы соответствует паспорту специальности 25.00.36 – «Геоэкология»:

– п.1.13. Динамика, механизм, факторы и закономерности развития опасных природных и техноприродных процессов, прогноз их развития, оценка опасности и риска, управление риском, превентивные мероприятия по снижению последствий катастрофических процессов, инженерная защита территорий, зданий и сооружений.

– п.1.14. Моделирование геоэкологических процессов.

– п.1.17. Геоэкологическая оценка территорий. Современные методы геоэкологического картирования, информационные системы в геоэкологии. Разработка научных основ государственной экологической экспертизы и контроля.

Научная новизна исследования:

1. Предложено ранжирование водосборов Северо-Западного Кавказа по степени паводковой опасности на основе их физико-географических свойств. Ранее паводковая опасность оценивалась на основе анализов ряда наблюдаемых паводков. Построены гистограммы площадей водосборов по их времени добега для крупнейших рек региона.

2. Дана оценка вкладу антропогенных изменений ландшафтов на процессы формирования паводков на реках Северо-Западного Кавказа. Оценка дана на основе динамики площадей ландшафтов, для которых характерно различное влияние на формирование поверхностного стока.

3. Предложена реконструкция паводка 2012 года в Крымске с учётом влияния пропускной способности мостовых проёмов на прохождение паводков. Особенностью реконструкции является её основание на результатах полевых наблюдений, результатах гидрологического моделирования и др.

4. Предложена оценка эффективности противопаводковых мероприятий в Крымске (преобразования русла и долины реки Адагум) и их применимости на основе расчётов с использованием гидрологических моделей.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Анализ паводковой опасности водосборов региона показал, что наиболее скоротечные паводки могут формироваться на водосборах рек южного макросклона региона от реки Сукко на западе до реки Джанхот на востоке и на реках Ту, Небуг и Агой, а также на реке Иль на северном макросклоне. Наиболее опасные паводки при выпадении одинаковых осадков на реках Анапка, Мезыбрь, Пшада, Вулан и Адагум.

2. Антропогенное влияние на формирование паводка на реках региона незначительно вследствие преобладания естественных ландшафтов на большей части водосборов. Опасность прохождения паводка усиливается мостовыми переходами, застройкой и замусориванием поймы.

3. Масштабы зоны затопления в июле 2012 года определялись морфологией русла и долины реки Адагум. Замусоренность мостовых проёмов оказывала влияние на динамику, а не на площадь затопления.

Эффективность трансформации русла, проводимая в долине реки Адагум в целях минимизации риска затопления, определяется степенью замусоренности мостовых проёмов. Это обуславливает необходимость регулярной очистки трансформированного русла и реконструкции существующих мостов с учётом их влияния на прохождение паводков.

4. Развитие системы оперативного прогнозирования дождевых паводков в регионе затруднено вследствие отсутствия оперативного источника метеорологических данных высокой детальности, недостаточного изучения водопроницаемых и водозадерживающих свойств почв и растительности в регионе.

Практическая значимость работы: Результаты диссертационного исследования могут использоваться при планировании развития системы мониторинга паводковых ситуаций на реках Северо-Западного Кавказа, при установлении критических расходов и уровней воды, при строительстве гидротехнических сооружений на р. Адагум, при оценке их влияния на гидрологический режим р. Адагум и его притоков.

Апробация результатов исследования: Результаты исследований по теме диссертации докладывались на ежегодных конференциях «Экология. Экономика. Информатика» (пос. Дюрсо 2013-2015 гг.), на IX и X Ежегодной научной конференции студентов, аспирантов базовых кафедр и молодых учёных Южного научного центра РАН (2013, 2014, 2017 гг.), на научных семинарах Южного научного центра РАН и Института аридных зон ЮНЦ РАН (2013-2018 гг.), на III Виноградовских чтениях (2018г.).

Публикации. По теме диссертации автором опубликованы 4 статьи в журналах из перечня ВАК. Кроме того опубликованы 2 статьи близкие по тематике, одна из которых опубликована в журнале индексируемом Scopus. Опубликовано 6 тезисов в материалах научных конференций.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и содержит 152 страницы, включая 63 рисунка, 13 таблиц, в списке литературы 108 наименований.

Благодарности

Автор выражает глубокую признательность академику РАН Г.Г. Матишову за предоставленную возможность участвовать в комплексных экспедициях ЮНЦ РАН в районе катастрофического паводка 6-7 июля 2012 года и всемерную поддержку в развитии выбранной темы диссертации. Также автор благодарит своего научного руководителя д.г.н. С.В. Бердникова за помощь в постановке цели и задач исследования, критику работы и терпение. Автор признателен коллегам, А.В. Клещенкову, К.С. Сушко, К.С. Григоренко, Ф.Ф. Гонсалесу, И.А. Третьяковой, В.В. Кулыгину, Н.А. Яицкой, А.А. Магаевой и др., за помощь в сборе и обработке материалов, получении и анализа результатов, за полезные советы и здоровую критику.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи, основные положения, выносимые на защиту, определены объект и предмет исследования, охарактеризованы научная новизна и практическая значимость работы. Работа разделена на три части, каждой из которых соответствует отдельная глава.

В **первой главе** рассматриваются природные и антропогенные условия формирования и прохождения дождевых паводков на реках Северо-Западного Кавказа. Из них выделены географическое положение, особенности климата, геологии и рельефа, растительности и почвенного покрова и гидрологии в качестве ведущих факторов паводкообразования на водосборах рек региона. Описано влияние каждого из выделенных факторов на формирование и прохождение паводков.

Климатический фактор в формировании опасных паводков на реках региона заключается в характере атмосферной циркуляции, в положении на границах умеренного и субтропического климатов, которые могут приводить к выпадению интенсивных осадков в регионе. Соседство гор с обширным водоёмом (Чёрным морем) способствует выпадению интенсивных осадков при прохождении влажных воздушных масс через горные хребты. Физико-географические свойства бассейнов рек здесь – особенности орографии, растительного и почвенного покрова, геометрия бассейнов, – определяют особенности формирования и прохождения паводков на реках. Для климата региона характерно малое количество осадков летом и увеличенное зимой при частом выпадении ливневых осадков, в том числе и в летний период.

Мофроструктура определяет геологию и орографию территории. В пределах Северо-Западного Кавказа выделяются 4 морфоструктурных района: Таманский, Абинско-Хадыженский, Собербашско-Гунайский и Новороссийский. Первые три относятся к северному макросклону. Таманский район сложен неоген-четвертичными глинами, песками, ракушечниками, известняками. Его основу составляют антиклинальные гряды. Абинско-Хадыженский район характеризуется рельефом низкогорных куэст, развивающихся на палеогеновых и неогеновых породах северокавказской моноклинали. Северный структурный склон куэст сложен известняками и песчаниками, крутой южный – мелами. Собербашско-Гунайский район представлен среднегорными антиклинальными хребтами и синклинальными мульдами (корытообразными прогибами). Они сложены нижнемеловыми песчаниками, глинами, известняками. Мульды имеют общий наклон к северу, к их ядрам приурочены долины рек, крылья слагают моноклинали хребты. Максимальные вершины здесь не превышают 1000 м. Морфоструктуры осложнены здесь сдвигами, которые часто соответствуют пересечению речных долин хребтов. Для западной части района характерны меловые породы, для восточной и центральной части –

юрские породы. Новороссийский район занимает зону южного макросклона и частично осевую зону, сложен верхнемеловыми породами Новороссийско-Лазаревского флишевого синклинория. В рельефе доминируют складчато-надвиговые морфоструктуры 3-го порядка – Коцехурский, Маркхотский хребты, – разделёнными протяжёнными антиклинальными впадинами. Сложное геологическое строение территории, выраженное в орографии, составляет условия для формирования речных бассейнов. Различия в строении морфоструктурных районов выражаются в ряде преобладающих форм речных бассейнов. Слагающие породы определяют в сочетании с крутизной уклонов, растительным покровом и режимом выпадения осадков опасность оползневых и эрозионных процессов.

Растительный покров при формировании паводка играет роль водоудерживающей ёмкости, которая накапливает воду, а также задерживает её перед поступлением на поверхность почвы. При прохождении паводков растительность является фактором, увеличивающим шероховатость поверхности, а значит уменьшающим скорость водных потоков (как руслового, так и склонового) и увеличивающим уровни. Растительный покров региона представлен в предгорной части степями, а в горной части – дубовыми и буковыми лесами. Нижняя граница леса здесь варьирует около 100 м. Лесная растительность региона представлена в основном дубовыми лесами, которые к востоку с повышением рельефа сменяются буковыми лесами. Дубовый лес обладает хорошей водоудерживающей способностью по сравнению с лугами и степями, однако уступает буковому лесу.

В формировании паводков почвенный покров, как и растительность, играет роль водоудерживающей ёмкости, наполняющейся параллельно, но немного позже. Структура и гранулометрический состав определяют водно-физические свойства почв – водопроницаемость, водоудерживающую способность. Они представлены бурыми лесными в центральной части горной системы, к ней с севера примыкают тёмно-серые и серые лесные и с юга дерново-карбонатные почвы. Между Анапой и Геленджиком развиты коричневые почвы. На равнинной территории формируются лугово-чернозёмные почвы. В долинах рек представлены аллювиальные луговые почвы. Среди почв региона серые лесные почвы обладают малой водопроницаемостью и подвержены водной эрозии. Также водной эрозии подвержены коричневые почвы. Бурые лесные почвы обладают промывным режимом и хорошим вертикальным дренажем. Высокая фильтрационная способность верхних горизонтов бурых лесных почв способствует хорошему поглощению осадков и переводу их во внутрпочвенный боковой сток. Высокой водоудерживающей способностью также обладают дерново-карбонатные почвы.

На территории региона речные бассейны под влиянием орографии и расположения хребтов принимают различные формы. Для северного

макросклона характерны речные бассейны вытянутой формы с малым количеством крупных боковых притоков, которые при выходе на равнинные участки могут сливаться между собой. В горной части северного макросклона слияние крупных притоков характерны для бассейнов Адагума, Абина и в наибольшей степени для Шебша и Псекупса на востоке. Речные бассейны южного макросклона можно разделить на две большие группы – реки между Анапой и Геленджиком и речные бассейны восточнее Геленджика. Первую из них представляют малые по площади не разветвлённые бассейны, для которых характерно быстрое формирование и прохождение паводков. Они могут затрагивать сразу несколько речных бассейнов. Вторая группа представлена разветвлёнными речными бассейнами, на которых ввиду большей площади могут формироваться опасные паводки при интенсивных осадках, затрагивающих большую часть водосбора.

Антропогенное влияние на природные ландшафты, изменяющее их паводкообразующие свойства, заключается в изменении растительного покрова (распашка полей, сведение лесов), распространении малопроницаемых поверхностей (различные асфальтовые и бетонные покрытия). Распашка и сведение лесов снижают водоудерживающую способность территории, а распространение малопроницаемых поверхностей приводит к быстрому формированию поверхностного стока практически от любого по интенсивности дождя. Для оценки антропогенного влияния на формирования паводка на водосборах крупнейших рек Северо-Западного Кавказа были посчитаны площади, которые подвергаются изменениям растительного и почвенного покрова. Среди них были выделены площади населённых пунктов, дорожного и железнодорожного полотна, садов, пашни. Их распределение по водосборам региона представлено на рисунке 1 и в таблице 1.

Наибольшая доля изменённых ландшафтов (пашни, лесопосадки, населённые пункты, дороги) достигает здесь трети площади для урбанизированных водосборов Цемеса и Яшамбы, наименьшая на водосборе Небуга. Наибольшее влияние антропогенного фактора оказывается на северо-западные водосборы. Это практически равнинные водосборы Анапки и Гостагайки, удобные в транспортном, геоморфологическом, почвенном отношении для развития населённых пунктов и хозяйства (огородничества, садоводства, виноградарства и др.). Также это водосборы, находящиеся под прямым влиянием Новороссийска как крупного промышленного и транспортного узла и центра урбанизации региона. На территории большинства водосборов антропогенные ландшафты составляют до 5% территории, поэтому их влияние на формирование паводка сильно ограничено и не является существенным.

Таблица 1. Основные характеристики антропогенного влияния на гидрологические свойства водосборов

№	Название	площадь леса, км ² , (в %)	Изменения леса 2000-2014 гг.				Площади, км ² (в %)			
			сокр., км ²	рост, км ²	разница , км ²	2000- 2014 гг., %	дороги	водосб ора	нас. пунк тов	садов и др.
1	Гостагайка	58.8 (25.2)	0.23	0.08	-0.15	-0.6%	3.4(1.5)	232.8	3.1	21.0 (9.0)
2	Анапка	85.6 (21.1)	0.12	0.07	-0.05	-0.2%	10.0(2.5)	403.9	10.4	76.5 (18.9)
3	Сукко	62.3 (76.6)	0.63	0.00	-0.63	-0.8%	1.4(1.7)	81.1	0.4	3.6 (4.4)
4	Дюрсо	36.4 (66.9)	0.11	0.04	-0.07	-0.1%	1.0(1.8)	54.3	0.2	4.0 (7.4)
5	Озерейка	26.9 (52.1)	0.67	0.04	-0.63	-1.2%	1.7(3.3)	51.5	0.6	5.5 (10.7)
6	Цемес	29.6 (34.0)	0.17	0.04	-0.13	-0.4%	6.1(7.0)	86.8	10.9	10.4 (12.0)
7	Дооб	8.1 (39.3)	0.82	0.01	-0.81	-2.1%	1.0(4.9)	20.6	0.7	5.4 (26.2)
8	Яшамба	21.4 (47.8)	0.56	0.03	-0.53	-1.1%	1.5(3.3)	44.7	0.2	10.2 (22.8)
9	Мезыбь	159.9 (82.4)	0.20	0.08	-0.12	-0.1%	5.2(2.7)	193.7	1.0	7.1 (3.7)
10	Джанхот	43.9 (88.2)	0.31	0.01	-0.30	-0.3%	0.7(1.4)	49.8	0.1	0.6 (1.2)
11	Пшада	332.3 (92.0)	0.25	0.06	-0.19	-0.2%	6.6(1.8)	360.5	1.8	12.4 (3.4)
12	Вулан	243.0 (91.1)	0.39	0.14	-0.25	-0.3%	3.4 (1.3)	266.3	1.3	12.3 (4.6)
13	Джубга	84.5 (88.9)	1.88	0.07	-1.81	-2.0%	1.8 (1.9)	94.9	1.9	2.5 (2.6)
14	Шапсухо	269.2 (92.7)	0.87	0.11	-0.76	-0.8%	3.5 (1.2)	289.8	1.2	10.0 (3.4)
15	Нечепсухо	203.6 (92.4)	0.33	0.06	-0.27	-0.3%	2.6 (1.2)	220.0	1.2	5.1 (2.3)
16	Ту	56.2 (94.6)	0.16	0.02	-0.14	-0.1%	0.7 (1.2)	59.3	1.2	0.8 (1.3)
17	Небуг	69.8 (95.5)	0.35	0.02	-0.33	-0.3%	1.3 (1.8)	73.0	1.8	0 (0)
18	Агой	82.3 (91.9)	0.38	0.03	-0.35	-0.4%	1.6 (1.8)	89.3	1.8	1.0 (1.1)
19	Псебепс	103.1 (71.3)	0.12	0.08	-0.04	-0.1%	1.6 (1.1)	144.4	1.1	8.0 (5.5)
20	Кудако	43.9 (51.8)	0.22	0.05	-0.17	-0.0%	1.0 (1.2)	84.6	1.2	5.5 (6.5)
21	Адагум	225.1 (70.1)	0.60	0.07	-0.53	-0.8%	7.5 (2.3)	320.6	2.3	16.1 (5.0)
22	Псыж	57.7 (66.6)	0.69	0.16	-0.53	-0.8%	1.1 (1.3)	86.6	1.3	1.1 (1.3)
23	Шибик	47.7 (79.2)	1.13	0.10	-1.03	-1.3%	0.6 (1.0)	60.1	1.0	1.0 (1.7)
24	Абин	389.1 (91.0)	0.17	0.13	-0.04	-0.0%	7.6 (1.8)	426.7	1.8	6.8 (1.6)
25	Ахтырь	90.9 (77.8)	0.06	0.14	0.08	0.1%	2.2 (1.9)	116.7	1.9	6.1 (5.2)
26	Хабль	121.5 (85.6)	0.06	0.09	0.03	0.0%	2.9 (2.0)	141.7	2.0	1.8 (1.3)
27	Иль	87.5 (74.1)	0.42	0.21	-0.21	-0.3%	3.9 (3.3)	117.8	3.3	0.9 (0.8)
28	Убинка	169.6 (70.1)	0.27	0.38	0.11	0.2%	6.6 (2.7)	241.4	2.7	5.1 (2.1)
29	Афипс	297.7 (87.5)	0.45	0.30	-0.15	-0.2%	6.5 (1.9)	339.7	1.9	12.6 (3.7)
30	Шебш	526.1 (93.6)	0.33	0.27	-0.06	-0.1%	9.1 (1.6)	561.2	1.6	32.4 (5.8)
31	Супс	70.8 (73.5)	0.85	0.35	-0.50	-0.7%	1.8 (1.9)	96.2	1.9	0.7 (0.7)
32	Псекупс	984.6 (88.1)	0.54	0.41	-0.13	-0.1%	18.3(1.6)	1116.3	1.6	31.4 (2.8)

Крупнейшие населённые пункты региона сконцентрированы на черноморском побережье (Анапа–Новороссийск–Геленджик–Туапсе) и при выходе рек на Прикубанскую низменность на севере (Варениковская–Крымск–Абинск–Северская–Адыгейск). Поэтому целесообразно сравнить физико-географические свойства водосборов через расчёт гидрографов гипотетического паводка, вызванного одинаковыми осадками, для замыкающих створов рек на выделенных линиях. Было выделено 32

крупнейших водосбора региона (18 водосборов южного макросклона и 14 водосборов северного), для замыкающих створов которых были генетическим методом построены гидрографы осадков, фиксированных 6-июля 2012 года на метеостанции Крымск. Были намеренно использованы одинаковые осадки, чтобы сравнить паводковую опасность при одинаковых метеорологических условиях.

Построение гидрографа на основе выпадающих осадков ограничивалось следующими упрощениями:

- 1) осадки равномерны и одинаковы на всей территории водосборов;
- 2) эффективные осадки составляли 80% от выпавших осадков на протяжении всего расчётного времени;
- 3) осадки моментально формируют поверхностный сток;
- 4) скорости добегания воды принимались постоянными;
- 5) не учитывалось влияние на прохождение паводков существующих водохранилищ.

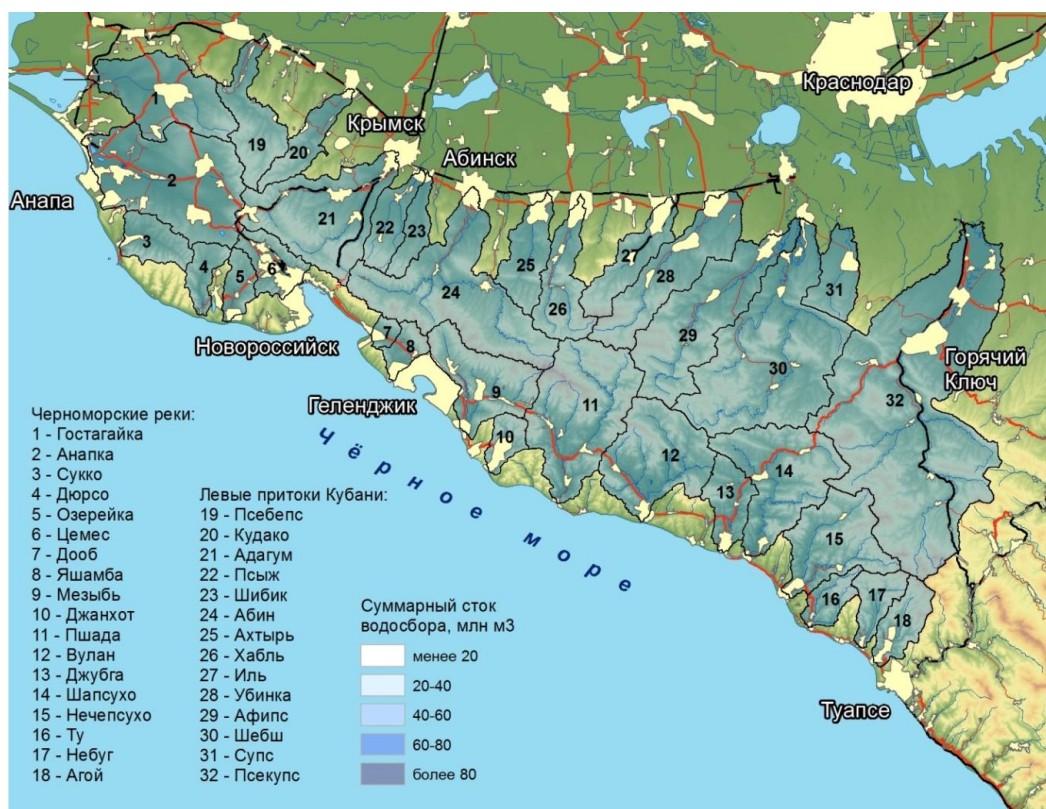


Рисунок 1. Объекты антропогенного воздействия на водосборах.

Для проведения расчётов использовалась цифровая модель местности на основе съёмки SRTM с разрешением 1 угловая секунда (около 30 м). Скорости добегания для каждой ячейки ЦММ рассчитывались по формуле [СП 33-101-2003, Белоногова Н.А. и др. О времени добегания...]:

$$v = a_{cp} Q_{1\%}^{0.25} i_{cp}^{0.33}$$

$$a = 0.15 \left(\frac{1}{20n} \right)^{0.75}$$

$$Q_{1\%} = q'_{1\%} \varphi H_{1\%} \delta A$$

$$q'_{1\%} = \frac{q_{1\%}}{\varphi H_{1\%}}$$

$$q_{1\%} = \frac{B}{\sqrt{A}}$$

$$Q_{1\%} = B \delta \sqrt{A}$$

$$\delta = 1 / (1 + C_0 A_{оз})$$

где n – коэффициент шероховатости по шкале Срибного, который зависит от типа растительности, $Q_{1\%}$ – максимальный расход, i_{cp} – средневзвешенный уклон, ‰.

δ – коэффициент, учитывающий снижение максимальных расходов воды в залесенных бассейнах.

B – географический параметр, для данного региона принимается за 60 (воскресенский).

C_0 – коэффициент, принимаемый для лесной зоны 0,2.

$A_{оз}$ – коэффициент озёрности водосбора.

Таким образом, для расчёта скорости для каждой ячейки ЦММ региона использовались растры распределения n (характеризующий шероховатость поверхности), $A_{оз}$ (озёрность водосбора ячейки), i_{cp} (средневзвешенный уклон ячейки), A (площадь водосбора ячейки).

По скоростям добегаания и цифровым моделям местности (ЦММ) были рассчитаны гистограммы распределения площадей на водосборе по времени добегаания с них стока до замыкающего створа (рисунок 2). На основе гистограмм были рассчитаны гидрографы для замыкающих створов выделенных водосборов. Опасность паводков определяется характеристиками затопления (площадями, глубиной, скоростью потока, продолжительностью затопления), которые приводят к ущербу на водосборе, и временем наступления паводка, которое накладывает ограничения на эвакуационные меры во время паводка. Поэтому среди характеристик гидрографов в качестве показательных выделены величины максимального расхода на замыкающем створе, время между наступлением максимумов осадков и расхода и соотношение этих параметров. Основные различия гидрографов основных рек представлены на рисунке 3 и в таблице 2.

Отношение максимального расхода к общему стоку за паводок показывает, насколько резкий формируется пик расходов при выпадении одинаковых равномерных осадков на крупнейших водосборах региона. По этому показателю на южном макросклоне выделяются малые водосборы – от Сукко до Джанхота и три восточных водосбора – Ту, Неуг и Агой. Эти же водосборы обладают максимальной опасностью паводков с точки зрения времени для эвакуационных мер.

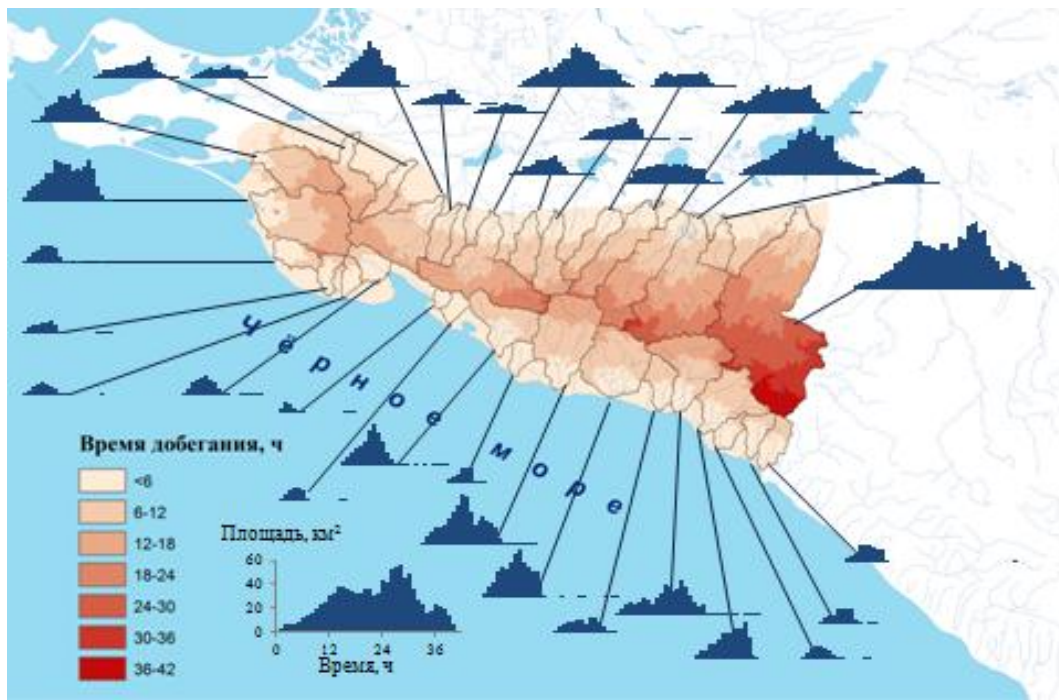


Рисунок 2. Распределение площадей на водосборах по времени добегания

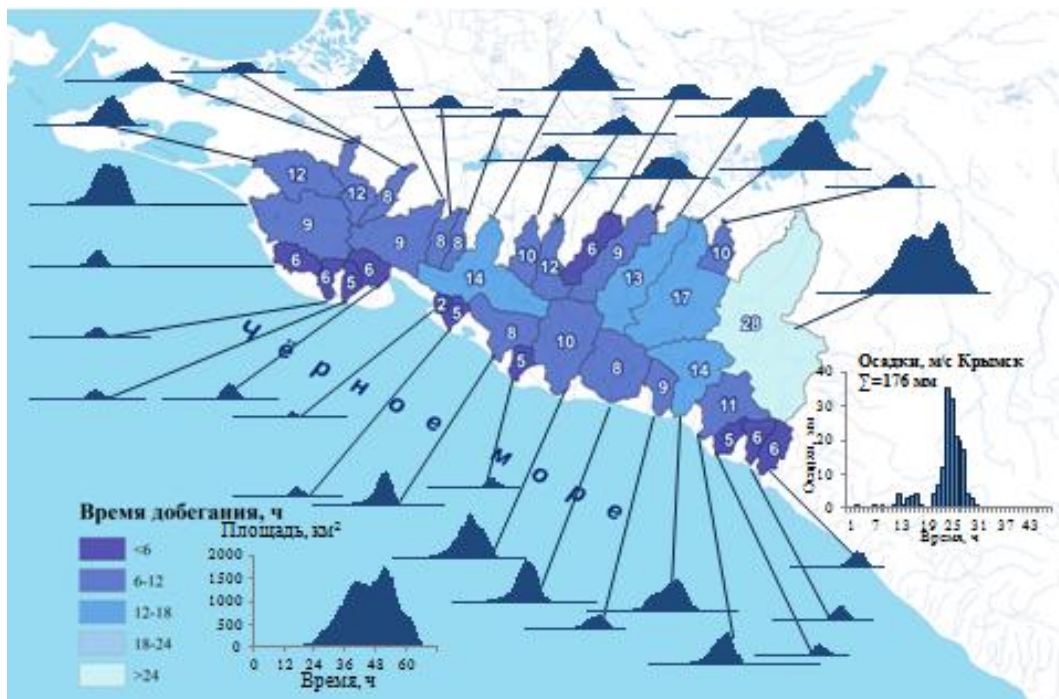


Рисунок 3. Рассчитанные гидрографы паводков.

Таблица 2. Основные характеристики рассчитанного паводочного стока выделенных водосборов.

№	Название	Макс. расход, м ³ /с	Сток за паводок, млн. м ³	Площадь водосбора, км ²	макс. расход/ время	Макс. расход / сток за паводок, м ³ /с на 1 млн. м ³	Время между максимумами осадков и стока, ч
Южный макросклон Кавказа							
1	Гостагайка	744	32.36	230	62.0	23.0	12
2	Анапка	1010	56.73	404	112.2	17.8	9
3	Сукко	398	11.91	85	66.4	33.4	6
4	Дюрсо	253	7.57	54	42.2	33.5	6
5	Озерейка	243	6.92	49	48.6	35.1	5
6	Цемес	399	11.95	85	66.5	33.4	6
7	Дооб	136	3.22	23	68.1	42.3	2
8	Яшамба	239	6.01	43	47.9	39.8	5
9	Мезыбь	828	27.34	195	103.5	30.3	8
10	Джанхот	278	7.01	50	55.5	39.6	5
11	Пшада	1098	50.68	361	109.8	21.7	10
12	Вулан	1043	42.09	300	130.4	24.8	8
13	Джубга	343	13.31	95	38.1	25.8	9
14	Шапсухо	773	40.81	291	55.2	18.9	14
15	Нечепсухо	785	31.03	221	71.3	25.3	11
16	Ту	279	8.07	58	55.8	34.6	5
17	Небуг	340	10.16	72	56.7	33.5	6
18	Агой	391	12.53	89	65.2	31.2	6
Северный макросклон Кавказа							
19	Псебепс	448	20.45	146	37.3	21.9	12
20	Кудако	275	12.00	85	34.3	22.9	8
21	Адагум	997	44.32	316	110.7	22.5	9
22	Псыж	331	12.17	87	41.3	27.2	8
23	Шибик	218	8.78	63	27.3	24.9	8
24	Абин	1042	60.55	431	74.5	17.2	14
25	Ахтырь	423	15.95	114	42.3	26.5	10
26	Хабль	480	21.24	151	40.0	22.6	12
27	Иль	354	18.83	134	59.0	18.8	6
28	Убинка	548	33.83	241	60.9	16.2	9
29	Афипс	728	49.48	352	56.0	14.7	13
30	Шебш	1220	80.49	573	71.8	15.2	17
31	Супс	367	12.38	88	36.7	29.7	10
32	Псекупс	1760	155.58	1108	62.9	11.3	28

На северном макросклоне основные водосборы имеют большую площадь, что приводит к увеличению времени между наступлением максимумов осадков и стока. Для западных водосборов от Псебепса до

Хабля наблюдается пониженное время наступления пика паводка и повышенное по сравнению с восточными водосборами отношение максимума расхода к общему стоку. Из этого ряда выбивается Абин, который имеет специфическую форму и большую площадь водосбора. Для восточных водосборов характерна большая площадь и вытянутая форма, что увеличивает время наступления пика паводка и приводит к более равномерному распределению стока во времени. Отношение максимального расхода к общему стоку на северных водосборах в целом ниже, чем для южных.

По отношению максимального расхода к времени между максимумами осадков и стока выделяются водосборы Анапки, Мезыби, Пшады и Вулана на южном макросклоне и Адагум на северном. По этому показателю черноморские реки обладают большей паводковой опасностью, чем левые притоки Кубани.

Во **второй** главе рассматриваются процессы формирования и прохождения паводков на реках региона на примере паводка 6-7 июля 2012 года на реке Адагум. Данный паводок стал одним из самых резонансных для российского общества и в то же время одним из самых изученных. В зоне паводка, охватившего кроме водосбора Адагума также водосборы Абина, Цемеса, Яшамбы, Адербы и более мелких рек региона, проводились исследования специалистов Росгидромета [Катастрофический паводок в бассейне р.Адагум 6-7 июля 2012 г. и его причины, В.Ю.Георгиевский, Ю.Ю.Ткаченко], ЮНЦ РАН [Матишов Г.Г., Клещенков А.В. Кубанский паводковый кризис. Климат, геоморфология, прогноз. Крымск, июль 2012 г. Ростов-н/Д.: Изд. ЮНЦ РАН, 2012. 128 с.], ИВП [Предотвращение катастрофических паводков и обеспечение безопасности Крымского района Краснодарского края/Под ред. В.И. Данилова-Данильяна и М.В. Болгова, 2013], МГУ [Численное гидродинамическое моделирование наводнения в г. Крымске 6-7 июля 2012 г. / Н. И. Алексеевский и др.// Гидротехническое строительство. - 2014. - № 3. - С. 29-35] и др. Среди причин большого количества жертв и материального ущерба кроме природных также выделялись замусоренность и застройка поймы, влияние мостов на формирование зоны затопления. Проводилась реконструкция паводка, рассматривалась роль мостовых проёмов и Неберджаевского водохранилища. В данной главе представлены результаты экспедиционных исследований ЮНЦ РАН, в которых принимал участие автор, на их основе проводится реконструкция паводка с помощью гидрологического моделирования, а также рассматривается роль замусоренности мостовых проёмов в формировании зоны затопления в Крымске.

На водосборе реки Адагум проводилось 2 экспедиции ЮНЦ РАН: в июле 2012 года фиксировались следы прохождения паводка, уровни высоких вод, измерялись максимальные глубины и ширина потока на различных участках; в июле 2014 года были построены поперечные

профили речных долин в местах установки автоматических уровнемеров АС МПСКК, которые позволили в дальнейшем построить кривые расход-уровень в данных точках для их последующего использования при настройке гидрологической модели. Экспедиционные наблюдения показали, что наиболее интенсивно на единицу площади формировался объём паводковой воды на правых притоках Баканки, что может быть связано с особенностями распределения выпадения осадков, которые не были зафиксированы на метеостанциях Крымск и Новороссийск.

Прохождение паводка является более чувствительным к антропогенному влиянию, чем формирование. Для оценки его роли на водосборы региона было проведено гидрологическое моделирование прохождения паводка 6-7 июля 2012 года в Крымске при различных антропогенных условиях. В общественной и научной дискуссии после паводка среди факторов, усиливших ущерб при прохождении паводка, выделялись:

- роль Неберджаевского водохранилища;
- роль мостов;
- роль пойменного мусора.

Для определения значения выделенных факторов в ущербе от формирования и прохождения паводка на водосборе реки Адагум была проведена реконструкция паводка 6-7 июля 2012 года. Для этого были использованы гидрологические модели HEC-HMS (для формирования паводка и роли Неберджаевского вдхр.) и HEC-RAS (для прохождения паводка в окрестностях Крымска и роли пойменного мусора и мостов в городе), которые были связаны между собой: результаты модели HEC-HMS использовались в качестве входных данных для модели HEC-RAS.

Для модели формирования паводка водосбор реки Адагум был разделён на суббассейны, параметры которых характеризуют формирование поверхностного стока при выпадении осадков. Суббассейны выделялись по основным водотокам и точкам установки автоматических уровнемеров АС МПСКК, по наблюдениям которых были впоследствии установлены параметры ряда суббассейнов. Среди параметров модели выделяются:

1. Первоначальное содержание влаги в почве, задаётся в долях объёма.
2. Остаточное содержание влаги в почве – количество воды, остающееся в почве после прекращения дренажа.
3. Насыщенное содержание воды в почве, обычно соответствует пористости почв.
4. Восходящее давление в почве на фронте смачивания.
5. Пористость почв; определяется как доля объёма пор от общего.
6. Влагопроводность почв.
7. Доля непроницаемых поверхностей.

8. Динамика температуры почвы; влияет на плотность, вязкость воды.

Калибровка параметров суббассейнов проводилась на основе ряда наблюдений уровнемеров АС МПСКК в 2015 г. во время формирования скачков уровня более чем на 1 м на уровнемере АГК-126.

Модель прохождения паводков включает в себя двумерную расчётную сетку, охватывающую застроенную часть Крымска и его окрестности, при этом некоторым рёбрам ячеек заданы условия имитирующие геометрию существующих капитальных мостов. Также в модели используется цифровая модель местности, построенная по результатам топографической съёмки русла масштаба 1:500, и пространственное распределение коэффициента шероховатости согласно растительному покрову и дорожному покрытию. На рисунке 4 представлены гидрологический граф модели формирования паводка и расчётная сетка модели прохождения паводка.

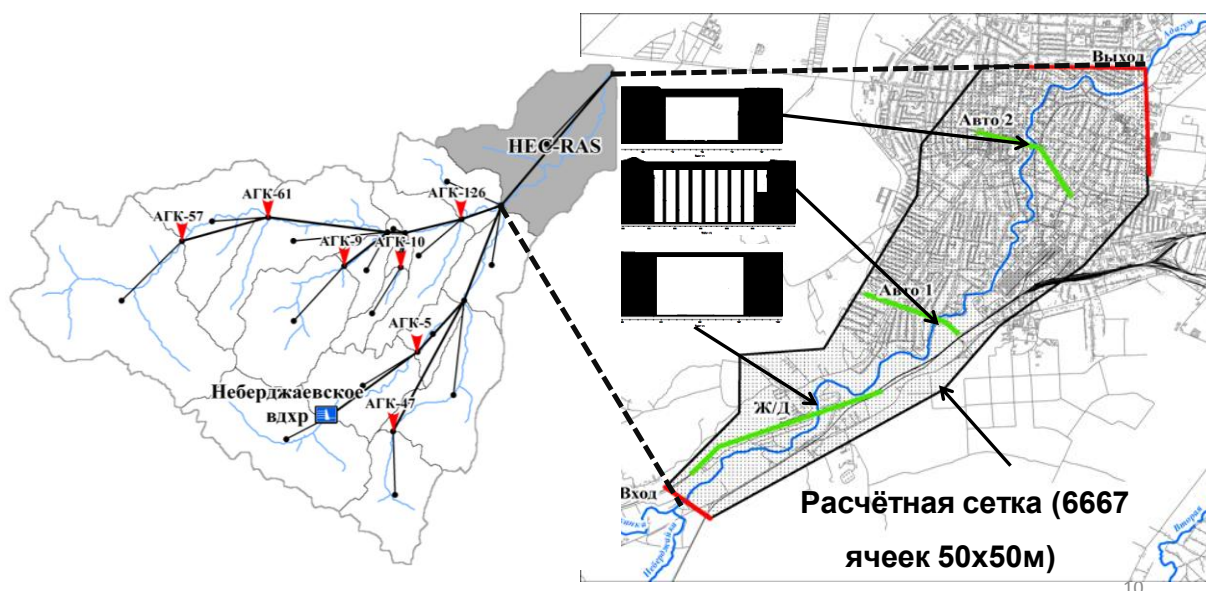


Рисунок 4. Гидрологический граф модели формирования паводков р. Адагум (слева) и расчётная сетка модели прохождения паводков в окрестностях Крымска (справа).

В качестве входных данных для реконструкции паводка использовался почасовой ход осадков на метеостанциях Крымск и Новороссийск для выделенных водосборов в гидрологической модели формирования паводка (HEC-HMS). Рассчитанная динамика расходов в точке истока реки Адагум (слияние Баканки и Неберджая) 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 (глубин, времени затопления, горизонтальных скоростей) в Крымске и окрестностях.

Сравнение результатов с экспедиционными наблюдениями (рисунок 5 и таблица 3) показало, что равномерное распределение осадков, использованное при модельной реконструкции, не позволяет отразить существующее распределение источников паводковой воды по частям водосбора, однако для всего бассейна максимальный расход и его динамика вписывается в результаты наблюдений. Согласно результатам Росгидромета максимальный удельный сток приходился на водосборы правых притоков Баканки. По результатам моделирования значительно больший паводковый сток формировался в верховьях Баканки, т.к. распределение осадков использовалось равномерное.

По результатам реконструкции паводка (рисунок 6) Неберджаевское водохранилище сыграло сглаживающую роль в формировании паводка на своём водосборе – привело к снижению максимума стока на $65 \text{ м}^3/\text{с}$ (на 30 %) и к его смещению на 3 часа с 6:00 7 июля на 9:00 7 июля. За 6-7 июля приток объёма составил $8,7 \text{ млн м}^3$ воды, сток за то же время – $5,1 \text{ млн м}^3$.

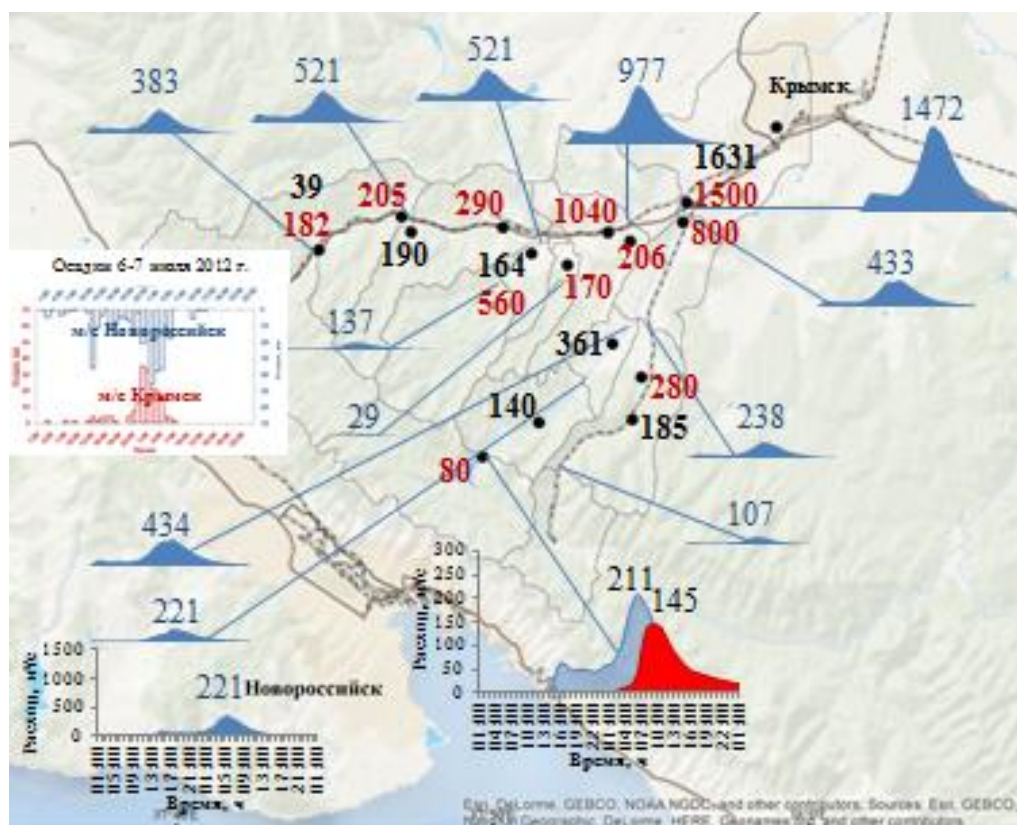


Рисунок 5. Результаты реконструкции паводка, сравнение максимальных расходов с полученными в ходе экспедиционных исследований ЮНЦ, Росгидромета, Института водных проблем.

Таблица 3. Максимальные расходы в различных частях водосбора по результатам исследований Росгидромета, ЮНЦ, ИВП, собственной реконструкции паводка, м³/с.

ЮНЦ	РГМ	Мод.	ИВП
39	182	383	200
190	205	521	275
-	290	521	425
164	560	137	129
-	1040	977	700
-	170	29	105
-	800	433	475
361	-	434	-
140	80	145	-
185	280	238	-
1631	1500	1472	1350

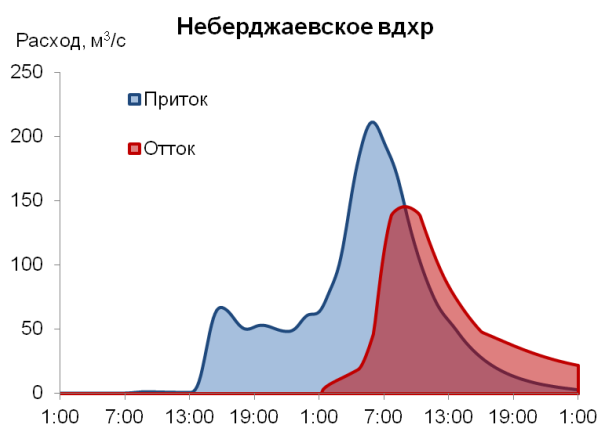


Рисунок 6. Приток и отток воды в Неберджаевском водохранилище по реконструкции паводка 6-7 июля 2012 г.

Включение возможности имитировать пропускную способность мостов в модели прохождения паводка в окрестностях Крымска позволило получить динамику затопления в долине реки Адагум при различных сценариях:

1. С открытыми проёмами на протяжении всего расчётного периода (высота свободного проёма железнодорожного моста составляет 8.5 м, автомобильного – 7 м);

2. С закрытыми проёмами с начала расчётного периода (высота свободных проёмов мостов на первый час составляет максимальные значения – как в первом варианте, – со второго часа расчётного периода – 0 м для обоих мостов);

3. Проёмы мостов как в первом сценарии до 21:00 6 июля, затем закрываются наглухо к полуночи, затем прорываются в 3:00 7 июля и свободная высота составляет 8 и 6.5 м соответственно.

В долине р. Адагум на территории, подвергнутой наводнению, были выделены точки, для которых были рассчитана динамика уровня воды 6-7 июля 2012 года по трём сценариям развития паводка (рисунок 7).

На представленных графиках видно, что при сценарии 1 кривая хода уровня во всех русловых точках имела одинаковый характер, при некотором затухании пикового уровня вниз по течению, что объясняется более широким распластыванием потока на надпойменных террасах в пределах города. Затопление большей части городской территории при этом сценарии происходило во время наступления второго пика, первый пик не привёл к масштабному выходу воды из поймы. Таким образом, большая часть города затапливалась в промежутке между 2 и 5 часами ночи 7 июля.

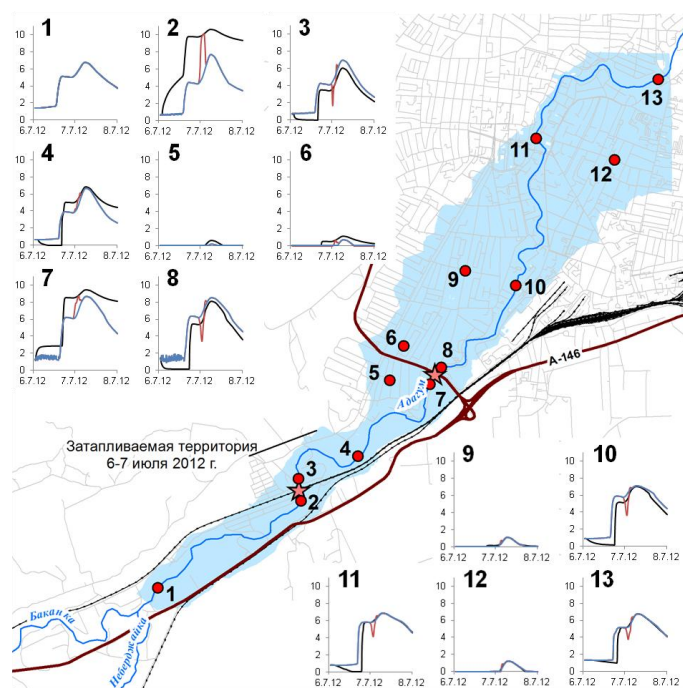


Рисунок 7. Динамика уровня воды, рассчитанная по трём сценариям (синим сценарий 1, чёрным – сценарий 2, красным – сценарий 3) в точках, приуроченных к различным частям зоны затопления.

Динамика уровня при сценарии 2 (при закрытых мостовых проёмах) на различных точках сильно различается. Закупоривание проёма железнодорожного моста привело к резкому подъёму уровня воды перед ним, формированию обширного водохранилища выше по течению. Во второй половине дня водохранилище переполняется и формирует резкий скачок уровня ниже моста, который перед автомобильным мостом по ул. Новороссийской сформировал второе обширное водохранилище. Оно быстро наполнилось и перелилось вниз по течению. На нижележащих русловых точках динамика уровня воды имеет схожий характер с первым сценарием с учётом временного лага начала резкого скачка уровня. При этом на террасных точках около автомобильного моста пиковые уровни существенно (более чем на 0,5 м) выше, чем в первом сценарии. На террасных точках 9 и 12 различия между сценариями минимальны.

Сценарий 3 характеризуется полным закупориванием мостовых проёмов между 21:00 и 24:00 6 июля с последующим прорывом между 2:00 и 3:00 ч 7 июля. Это приводит к тому, что сначала при данном сценарии динамика уровней на всех точках повторяет сценарий 1. При закупоривании происходит резкий скачок вверх уровня на русловых точках перед мостами и резкий скачок вниз сразу за мостами. При вскрытии проёмов динамика возвращается к сценарию 1.

Третья глава рассматриваются способы минимизации ущерба от опасных паводков, в частности оценивается эффективность проводимого преобразования русла реки Адагум, картографируются зоны паводковой опасности и оцениваются возможности краткосрочного прогнозирования.

В целях снижения ущерба от прохождения внезапных паводков (в иностранной литературе «flashflood») предпринимаются различные меры, охватывающие как инженерные, так и неинженерные мероприятия.

Управление рисками ущерба от внезапных паводков должно проводиться комплексно, с привлечением специалистов различных направлений: географов, геологов, специалистов МЧС, инженеров, органов местных и региональных властей и др. В третьей главе рассматриваются первые три пункта, в наибольшей степени, относящиеся к геоэкологии. Это эффективность создаваемых противопаводковых сооружений (канализование русла), картирование рисков опасности внезапных паводков в окрестностях Крымска и предложенная система гидрологического прогнозирования на водосборе.

После прохождения паводка в неотложном порядке проводились работы по расчистке русел рек Адагум, Баканка и Неберджай. Канализация русел рек проводится в целях увеличения их пропускной способности в период прохождения паводков 1% обеспеченности, который был рассчитан специалистами Института водных проблем [ИВП]. На участке русла р. Адагум канализация рассчитана на прохождение паводка расхода $1040 \text{ м}^3/\text{с}$ и состоит из трёх участков – с трапециевидным поперечным сечением выше по течению плотной застройки Крымска (на протяжении 6061 м),

лоток прямоугольного сечения в плотной застройке (на протяжении 4278 м) и трапециевидное русло ниже Крымска (6537 м).

Для определения эффективности принимаемых мер по преобразованию русла были рассчитаны зоны затопления в условиях естественного и канализованного русла при различных режимах пропускной способности мостовых проёмов в условиях паводка 6-7 июля 2012 г. В этих расчётах использовалась динамика расходов, полученная ранее при реконструкции паводка (с максимальным расходом $1472 \text{ м}^3/\text{с}$). Результаты представлены на рисунках 8 и 9. На них видно, что канализование русла минимизирует зона затопления в случае полностью открытых мостовых проёмов, в противном случае зона затопления принимает вид подобный прохождению паводка по естественному руслу. Кроме того, было рассчитано время затопления территории (рисунки 10 и 11) и максимальные скорости водного потока (рисунки 12 и 13) в условиях разной морфологии русла и сценариев открытых и закрытых проёмов мостов. На основании полученных результатов можно сделать вывод, что трансформация русла будет эффективной только при условии открытых проёмов мостов. При закрытых проёмах мостов паводок будет формировать похожую зону затопления, однако динамика будет иной – ось затопления будет проходить не по руслу реки, а по левой части поймы. Кроме того, канализование русла подразумевает значительное уменьшение шероховатости его поверхности, что приведёт к увеличению максимальных скоростей водного потока.

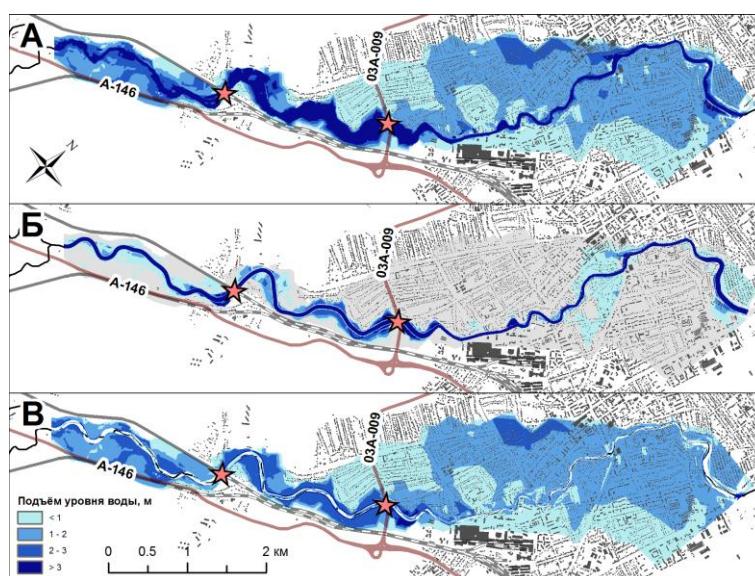


Рисунок 8. Глубины затопления территории в условиях открытых проёмов мостов при естественном (А), канализованном (Б) русле и разница между ними (В).

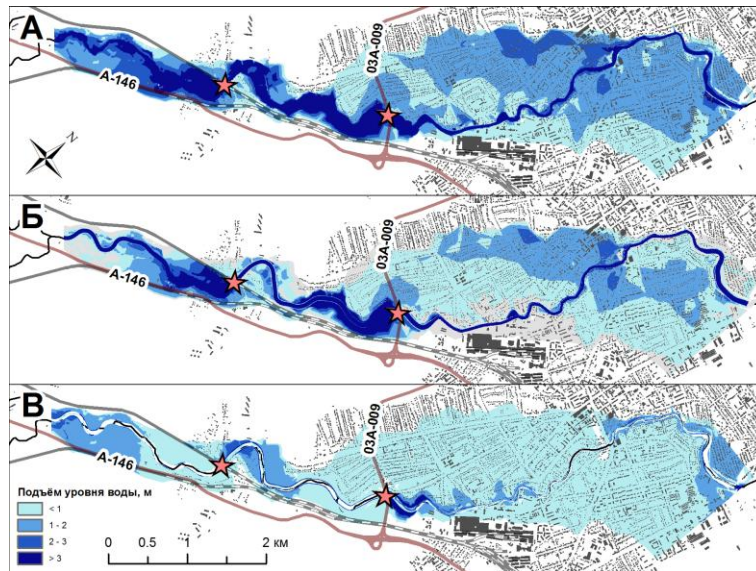


Рисунок 9. Глубины затопления территории в условиях закупоренных проёмов мостов при естественном (А), канализованном (Б) русле и разница между ними (В).

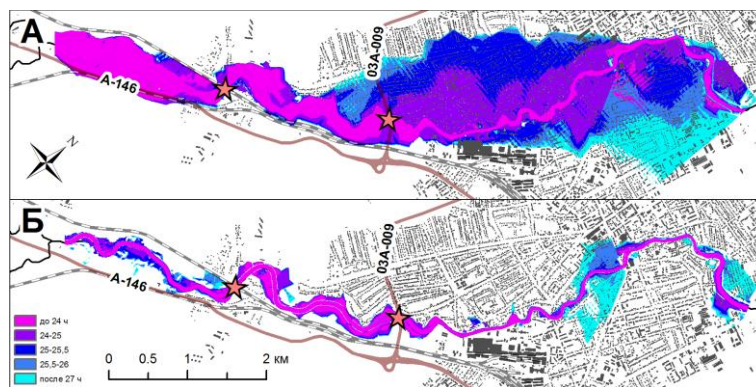


Рисунок 10. Время затопления территории в условиях открытых проёмов мостов при естественном (А) и канализованном (Б) русле.

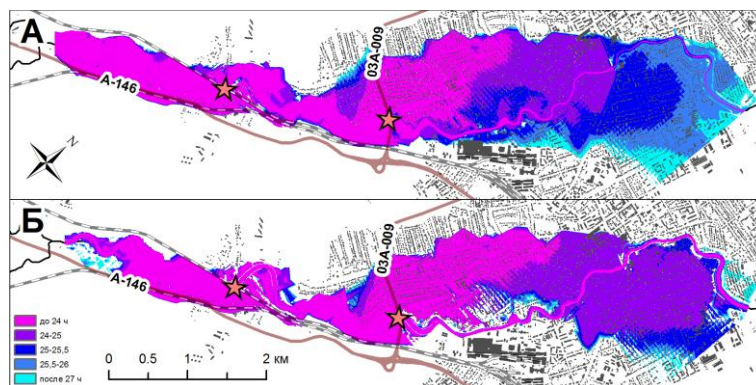


Рисунок 11. Время затопления территории в условиях закупоренных проёмов мостов при естественном (А) и канализованном (Б) русле.

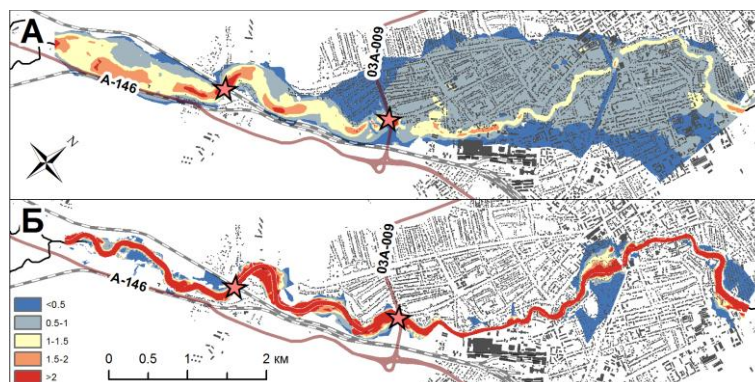


Рисунок 12. Максимальные скорости течения в условиях открытых проёмов мостов при естественном (А) и канализованном (Б) русле.

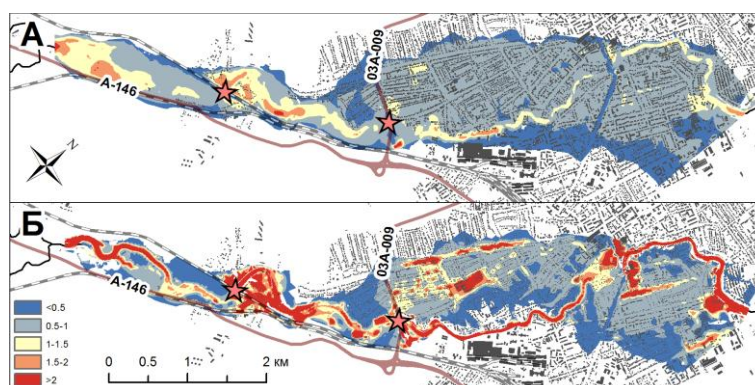


Рисунок 13. Максимальные скорости течения в условиях закупоренных проёмов мостов при естественном (А) и канализованном (Б) русле.

Показанные результаты говорят о том, что канализованное русло реки требует проведение регулярных работ для поддержания шероховатости дна (очистки дна от речных наносов, растительности), что означает дополнительные расходы. В противном случае в условиях накопления мусора (в т.ч. бытового) при прохождении паводка канализованное русло не сыграет противопаводковой роли.

С помощью гидрологической модели прохождения паводка в окрестностях Крымска были рассчитаны сценарии паводков различного масштаба. Расчётные паводки достигают максимальных расходов $500 \text{ м}^3/\text{с}$ (соответствует среднему расходу таких рек как Кубань, Одер или Сена), $1000 \text{ м}^3/\text{с}$ (рр. Висла, Тигр, Уссури), $1500 \text{ м}^3/\text{с}$ (рр. Днепр, По) и $2000 \text{ м}^3/\text{с}$ (рр. Рейн и Анадырь) для естественного и канализованного русла. Согласно [Ресурсы поверхностных вод СССР] расход 1% обеспеченности р.Адагум составлял $640 \text{ м}^3/\text{с}$, в то время, как на современном этапе, по расчётам ИВП он составляет $1040 \text{ м}^3/\text{с}$. В связи с тем, что каждый новый паводок, особенно сильный, может сильно изменить этот параметр, автором были проведены расчёты по конкретным значениям максимальных расходов.

Полученные схемы затопления распределены по трём классам опасности по максимальным глубинам, скоростям и кинетической энергии потока. Также посчитаны общие интегральные классы опасности. Распределение затопленных площадей по сценариям и классам опасности сведены в таблицу 3.

Таблица 3. Площади классов паводковой опасности (в км²) по глубинам затопления, скоростям потока, кинетической энергии и общим значениям.

Опасность по	Классы опасности	500 м ³ /с		1000 м ³ /с		1500 м ³ /с		2000 м ³ /с	
		Ест. русло	Тр. русло	Ест. русло	Тр. русло	Ест. русло	Тр. русло	Ест. русло	Тр. русло
Глубинам	слабое (до 0,8 м)	3,4	0,8	2,9	1,0	1,8	2,7	1,3	2,7
	среднее (0,8-1,2 м)	0,4	0,0	1,8	0,0	1,5	0,3	1,1	1,2
	сильное (более 1,2 м)	1,2	0,6	2,2	0,8	4,2	1,2	5,5	1,5
Скорости	слабое (до 1 м/с)	4,2	0,8	5,5	1,1	5,7	3,2	5,4	4,2
	среднее (1–2 м/с)	0,7	0,1	1,3	0,1	1,6	0,3	2,1	0,4
	сильное (более 2 м/с)	0,1	0,5	0,1	0,6	0,2	0,7	0,4	0,8
Кинетической энергии	слабое (до 10 кгс)	4,2	0,8	5,7	1,1	5,9	3,1	6,0	3,9
	среднее (10–25 кгс)	0,7	0,4	1,1	0,3	1,5	0,6	1,7	0,9
	сильное (более 25 кгс)	0,1	0,2	0,1	0,4	0,1	0,5	0,2	0,6
Общая	слабое	3,2	0,7	2,7	0,9	1,7	2,4	1,2	2,3
	среднее	1,5	0,2	3,3	0,4	4,5	1,0	5,1	2,1
	сильное	0,3	0,5	0,9	0,5	1,3	0,8	1,6	1,0
Общая площадь затопления, км²		5,0	1,4	6,9	1,8	7,5	4,2	7,9	5,4

Предлагается система оперативного прогнозирования паводков на реках Северо-Западного Кавказа, частично реализованная в рамках проекта ФЦП «Разработка компьютерной системы оперативного прогнозирования опасных природных явлений в бассейне, береговой зоне и акватории Азовского моря» в виде компонента программного комплекса «EX-MARE». Структура компонента представлена на рисунке 14. Программный комплекс усваивает метеорологические прогнозы и данные наблюдений автоматической системы мониторинга паводковой ситуации Краснодарского края (АС МПСКК), на основе которых рассчитывается прогноз гидрологической ситуации на водосборе р. Адагум. Исходные данные представляют собой прогнозы динамики осадков в точках бассейна, представленные в формате .csv, ЦММ поверхности бассейна

р.Адагум с различной шероховатостью в формате .tif, уровни воды с АГК АС МПСКК (автоматических гидрологических комплексов). Модельный блок объединяет работу двух гидрологических моделей – HEC-HMS (для имитации формирования паводка на водосборе) и HEC-RAS (для имитации прохождения паводка в окрестностях Крымска). Результаты расчётов модели формирования паводка используются для расчётов модели прохождения паводка в окрестностях Крымска.

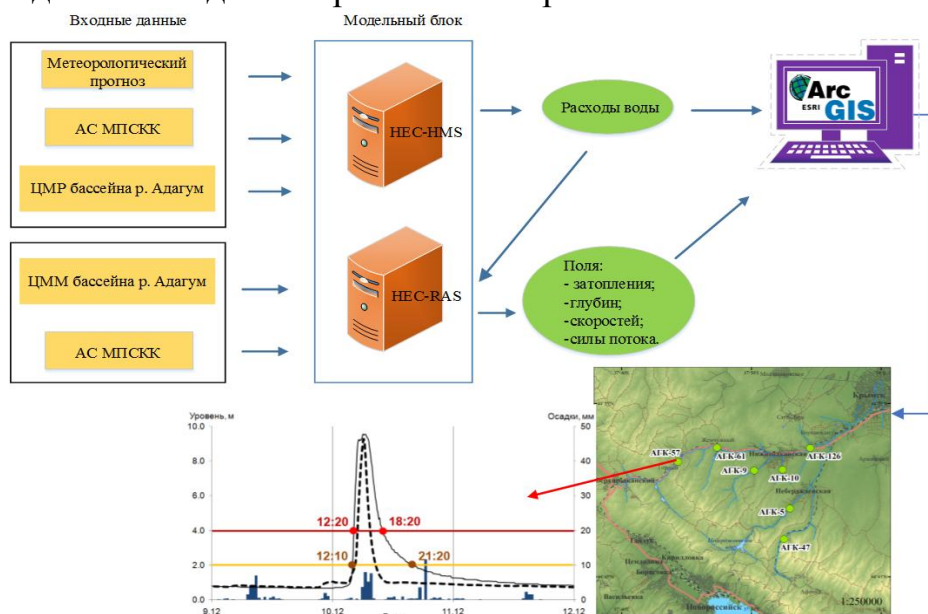


Рисунок 14. ГИС для краткосрочного прогнозирования опасных паводков в бассейне р.Адагум.

Для имитации формирования паводка на водосборе были выделены элементарные бассейны. Они представляют собой водосборы установленных АГК, а также крупных притоков. Элементарные бассейны объединены в гидрологический граф и обладают рядом водорегулирующих параметров:

1. Задержание растительностью – максимальная ёмкость задерживаемой воды (мм), текущий объём воды, задержанный растительностью (%);
2. Накопление на поверхности почвы – максимальная ёмкость задерживаемой воды (мм), текущий объём задержанной воды (%);
3. Потери воды – доля непроницаемых поверхностей (%), скорость впитывания (мм/ч), глубина впитывания (мм), текущее содержание (коэффициент), насыщенное содержание (коэффициент);
4. Трансформация воды при образовании поверхностного стока – время концентрации (ч), накапливаемый коэффициент (ч);
5. Базовый сток – текущий базовый сток с единицы площади ($\text{м}^3/\text{с}/\text{км}^2$), коэффициент спада.
6. Параметры водотоков – длина (м), уклон (м/м), коэффициент маннинга.

7. Параметры площади, подвергаемой затоплению (в HEC-RAS) – шероховатость поверхности (коэффициент).

В результате работы HEC-HMS рассчитывается динамика расходов и уровней в точках установки АГК АС МПСКК, а также в местах слияния крупных водотоков на водосборе. Модель имитации прохождения паводка в окрестностях Крымска охватывает территорию между истоком Адагума (слияние Баканки и Неберджая) и третьим автомобильным мостом (по течению реки) в городе. Результатами её расчётов являются растры распределения глубин и скоростей потока затопления.

Представленный компонент программного комплекса «EX-MARE» обладает рядом возможностей:

- усваивать данные различных метеорологических прогнозов;
- усваивать площадные и точечные данные о выпадающих осадках;
- изменения количества и распределения АГК МПСКК;
- усвоения детальных ЦММ и расширения расчётной площади;
- применения структуры компонента для прочих речных систем региона.

Однако, как показала практика использования компонента, прогнозирование паводковой ситуации сталкивается с рядом пока нерешённых проблем:

1. Качество метеорологических прогнозов (рис. 15)
2. Недостаточная информация о водопроницаемых свойствах и распределении типов почв и растительности.
3. Недостаточное наблюдение полей осадков.
4. Отсутствие системы наблюдения за текущим влагосодержанием почв.

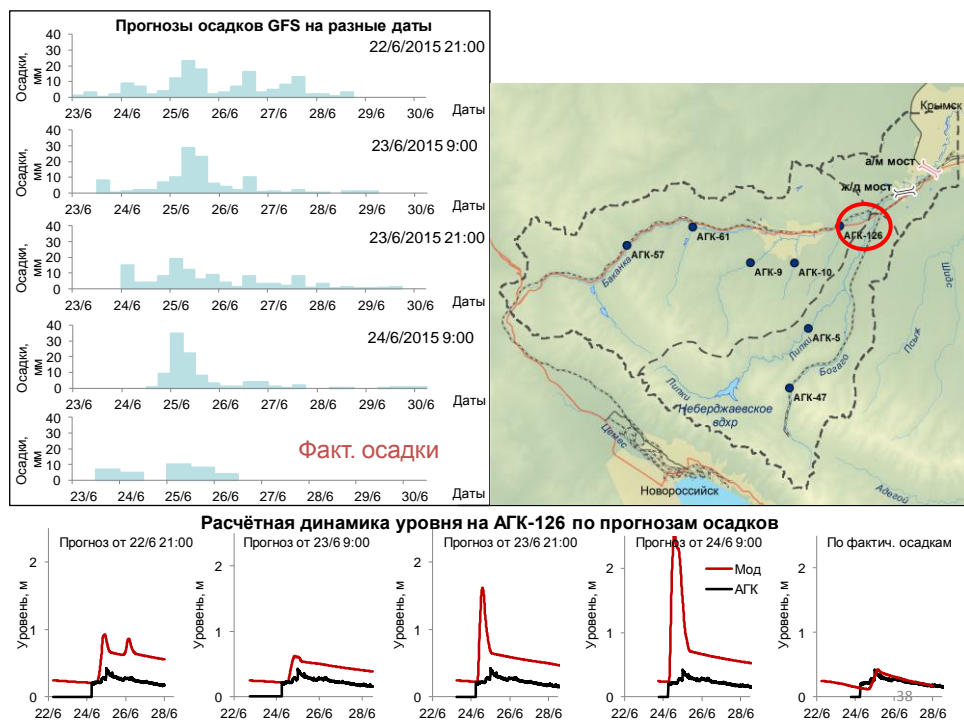


Рисунок 15. Пример зависимости гидрологического прогноза от прогноза осадков

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, среди которых стоит выделить:

1. Природные условия, а именно особенности атмосферной циркуляции, горный рельеф, влияние моря обуславливают паводочный характер речного стока.

2. Территория Северо-Западного Кавказа испытывает незначительное влияние антропогенного фактора на условия формирования паводков. Его источники концентрируются вдоль морского побережья и вдоль транспортных путей.

3. По отношению максимального расхода к времени между максимумами осадков и стока выделяются водосборы Анапки, Мезыби, Пшады и Вулана на южном макросклоне и Адагум на северном. По этому показателю черноморские реки обладают большей паводковой опасностью, чем левые притоки Кубани.

4. Максимальные осадки и водоотдача во время паводка 6-7 июля 2012 г. на Северо-Западном Кавказе происходили в бассейне правых притоков Баканки (водосбор реки Адагум), зафиксированные на метеостанциях осадки не позволяют в должной мере восстановить их пространственный характер.

5. Реконструкция паводка 6-7 июля 2012 г. позволила заключить, что Неберджаевское водохранилище снизило максимум стока со своего водосбора на $65 \text{ м}^3/\text{с}$ (или на 30%), а также привело к его смещению по времени на 3 часа позднее, что несколько сократило общий максимальный расход ниже по течению. Кроме того, оно задержало 3,6 млн. м^3 воды (или около 9% от общего стока в Крымске).

6. Расчёт прохождения паводка 6–7 июля 2012 года в окрестностях Крымска по трём сценариям замусоренности мостовых проёмов показал, что динамика затопления на большей части Крымска (на надпойменной террасе ниже автомобильного моста в створе ул. Новороссийской) не зависит от роли мостов. Гипотетические подпоры, вызванные закупориванием мостовых проёмов, распространяются менее чем на 2 км перед ними.

7. Эффективность трансформации русла, проводимая в долине реки Адагум в целях минимизации риска затопления, определяется степенью замусоренности мостовых проёмов. Это обуславливает необходимость регулярной очистки трансформированного русла и реконструкции существующих мостов с учётом их влияния на прохождение паводков.

8. В условиях трансформации русла реки Адагум в окрестностях Крымска были выделены зоны опасности при прохождении паводков масштабов 500, 1000, 1500 и 2000 $\text{м}^3/\text{с}$ в условиях естественного и канализованного русла. Критериями их выделения стали уровни затопления, скорости течения и кинетическая энергия водных потоков, на

их основе были разработаны интегральные зоны паводковой опасности на территории.

9. На основе используемых гидрологических моделей формирования и прохождения паводков в составе экспериментального образца программного комплекса «EX-MARE» был разработан компонент «Дождевые паводки» для территории водосбора р. Адагум, структура которого предусматривает расширение территории действия на реки Северо-Западного Кавказа. Однако существующие трудности, связанные с качеством метеорологического прогноза, недостаточным наблюдением осадков, свойств и влагосодержанием почв, не позволяют формировать достаточно качественные прогнозы.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По теме диссертации автором опубликованы статьи в журналах, в том числе из перечня ВАК (выделены полужирным шрифтом):

1. **Матишов Г.Г., Клещенков А.В., Шевердяев И.В. Результаты экспедиционных исследований в районе паводка на Западном Кавказе (июль 2012 г.)** // Вестник Южного научного центра РАН. 2012, Т.8, №4, С.101-104

2. **Шевердяев И.В.** Причины катастрофического наводнения в бассейне реки Адагум 6-7 июля 2012 года // IX Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН Тезисы докладов конференции. Редколлегия: Г.Г. Матишов (отв. редактор), Е.В. Вербицкий, В.В. Титов, Н.В. Панасюк, Е.Э. Кириллова. 2013. С. 63-64.

3. **Шевердяев И.В.,** Третьякова И.А., Бердников С.В., Шержуков Е.Л. Моделирование уровня воды в бассейне р.Адагум для оперативного прогнозирования паводков // Экология. Экономика. Информатика Материалы Всероссийской объединенной конференции. 2014. С. 187-190.

4. **Шевердяев И.В.** Катастрофические дождевые паводки на Западном Кавказе // X Ежегодная научная конференция студентов и аспирантов базовых кафедр Южного научного центра РАН Тезисы докладов. Редколлегия: Матишов Г.Г. (ответственный редактор), Д.Г. Матишов, Е.В. Вербицкий, В.В. Титов, Н.В. Панасюк, Е.Э. Кириллова. 2014. С. 38-39.

5. Матишов Г.Г., Бердников С.В., Кулыгин В.В., Чикин А.Л., Архипова О.Е., Яицкая Н.А., Лихтанская Н.В., Дашкевич Л.В., Сорокина В.В., Сапрыгин В.В., Третьякова И.А., **Шевердяев И.В.,** Кушнир В.М., Фомин В.В., Шержуков Е.Л. О проекте «Разработка

компьютерной системы оперативного прогнозирования опасных природных явлений в бассейне, береговой зоне и акватории Азовского моря» // Экология. Экономика. Информатика Материалы Всероссийской объединенной конференции. 2014. С. 56-62.

6. **Матишов Г.Г., Клещенков А.В., Шевердяев И.В. Катастрофический паводок на Западном Кавказе в июле 2012 года: причины и последствия // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология, 2014, №4, с.291-303.**

7. Бердников С.В., Кулыгин В.В., **Шевердяев И.В.**, Третьякова И.А., Яицкая Н.А., Дашкевич Л.В., Чикин А.Л., Архипова О.Е., Лихтанская Н.В., Сорокина В.В., Немцева Л.Д., Магаева А.А., Макаровский Г.В. Программный комплекс «EX-MARE» – система краткосрочного прогнозирования опасных природных явлений в регионе Азовского моря // Экология. Экономика. Информатика Материалы Всероссийской объединенной конференции. 2015. С. 47-59.

8. **Matishov G.G., Kleshchenkov A.V., Sheverdyayev I.V. Disastrous flashflood in the Western Caucasus in July 2012: causes and consequences // Water Resources, 2015, Vol. 42, No. 7, pp. 932–943.**

9. Шевердяев И.В. Зонирование городской территории по паводковой опасности на примере города Крымска // Устойчивое развитие особо охраняемых природных территорий Сборник статей III Всероссийской научно-практической конференции. 2016. С. 265-275.

10. Шевердяев И.В. Влияние трансформации русла реки Адагум на прохождение паводков в окрестностях Крымска // XIII Ежегодная молодёжная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Исследования и разработки передовых научных направлений» Тезисы докладов (г. Ростов-на-Дону, 17–27 апреля 2017 г.). . – Ростов н/Д: Изд-во ЮНЦ РАН, 2017. С. 54-55.

11. **Шевердяев И.В. Инженерные преобразования русла реки Адагум и оценка их влияния на прохождение экстремальных дождевых паводков // Наука Юга России, 2018, Т.14, №1, с. 81-88.**