

аФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
«ЮЖНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

На правах рукописи

Игорь Викторович Шевердяев

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

Специальность 25.00.36 – Геоэкология

Диссертация на соискание учёной степени кандидата географических наук

Научный руководитель:
доктор географических наук,
Сергей Владимирович Бердников

Санкт-Петербург – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ НА РЕКАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА	10
1.1. Условия формирования поверхностного стока на Северо-Западном Кавказе	10
1.1.1. Географическое положение.....	10
1.1.2. Климат	12
1.1.3. Геология и рельеф	16
1.1.4. Растительность и почвенный покров	20
1.1.4. Гидрология.....	25
1.2. Дождевые паводки на реках Северо-Западного Кавказа и их исследования...	32
1.3. Структура и динамика природно-антропогенных ландшафтов в 2000-2015 гг.	35
1.4. Паводковая опасность водосборов рек Северо-Западного Кавказа.....	43
2. ФОРМИРОВАНИЕ И ПРОХОЖДЕНИЕ ПАВОДКА 6-7 ИЮЛЯ 2012 ГОДА НА РЕКЕ АДАГУМ	49
2.1. Исследования паводка 2012 г. в работах основных научных школ России.....	49
2.2. Результаты экспедиций ЮНЦ РАН в зоне паводка 6-7 июля 2012 года.....	52
2.3. Выбор и настройка гидрологических моделей для реконструкции паводка ...	64
2.4. Результаты реконструкции формирования паводка	85
2.5. Оценка влияния мостов на прохождение паводка	89
2.5.1. Настройка гидрологической модели прохождения паводка	90
2.5.2. Роль мостов и пойменного мусора в прохождении паводков	92
3. СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ОПАСНОСТИ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ	107
3.1. Мероприятия в мире	107
3.2. Оценка эффективности преобразования русла в окрестностях реки Адагум	109
3.3. Картографирование зон опасности.....	125
3.4. Возможности краткосрочного прогнозирования	139
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	145
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	148

ВВЕДЕНИЕ

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 [1]. 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 [2]. 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 [3], Института географии РАН [4] МГУ [5], ЮНЦ РАН [6], 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 [7], 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 добегания 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, Небут и Агой, а также на реке Иль на северном макросклоне. Наиболее опасные паводки при выпадении одинаковых осадков на реках Анапка, Мезыбь, 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 (2018 г.).

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 158 страницы, включая 65 рисунков, 15 таблиц, в списке литературы 110 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. Клеценкову, 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.

1. ПРИРОДНЫЕ И АНТРОПОГЕННЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ НА РЕКАХ СЕВЕРО-ЗАПАДНОГО КАВКАЗА

1.1. Условия формирования поверхностного стока на Северо-Западном Кавказе

1.1.1. Географическое положение

Кавказ – горная страна, северная граница которой проходит по Кумо-Манычской впадине, Азовскому морю и Керченскому проливу, южная – по южным государственным границам закавказских стран бывшего СССР (Грузии, Армении и Азербайджана). С запада и востока она омывается морями – Чёрным и Каспийским соответственно. В пределах этого региона выделяется система Большого или Северного Кавказа, которая представляет собой ряд горных хребтов, преимущественно параллельных друг другу. Географическое положение между 40° с.ш. и 45° с.ш. и 37° в.д. и 50° в.д., значительная протяжённость – более 1000 км – и природные особенности обуславливают разделение системы на ряд регионов. Выделяются Западный Кавказ (к западу от г. Эльбрус), Центральный (к западу от г. Казбек) и Восточный. В пределах Западного Кавказа к западу от г. Фишт выделяется низкогорный Северо-Западный Кавказ. Эта часть горной страны ограничивается с севера Азово-Кубанской низменностью, с юга и запада – Чёрным морем. В гидрологическом отношении Северо-Западный Кавказ состоит из водосборов левых притоков Кубани на северном макросклоне и рек черноморского побережья на южном склоне. Северо-Западный Кавказ составляют водосборы впадающих ниже Краснодарского водохранилища левых притоков Кубани на севере и северо-востоке и водосборы Северного Причерноморья (к западу от водосбора р. Туапсе) на юге и юго-западе.

Факторы, влияющие на силу и возможность дождевого паводка, можно разделить на две группы: динамические и статические. Первая группа объединяет множество динамических процессов, среди них выделяются: распределение и интенсивность осадков, степень увлажнения почвы, движение воздушных масс,

состояние растительности, наличие снежного покрова и пр. Факторы речного бассейна объединяют статичные характеристики: строение и влагоёмкость почв, водоудерживающие свойства растительности, способность почв впитывать выпадающие осадки, характер гидрографической сети, форма бассейна, уклоны русел и склонов, застройка бассейна, гидротехнические сооружения и пр.

Развитие дождевого паводка с точки зрения процессов формирования речного стока имеет особенности (рисунок 1.1). Высокая интенсивность осадков, превышающая скорость инфильтрации в почву, приводит к образованию поверхностного стока. Повышенную роль играют интенсивность выпадающих осадков, процессы дорусловой (склоновой) и русловой трансформации стока. Подземный сток, задержание воды растительностью и земной поверхностью, впитывание влаги в почву оказывает незначительное влияние на развитие паводка, ввиду их несопоставимо малого объема при выпадении паводкообразующих осадков.

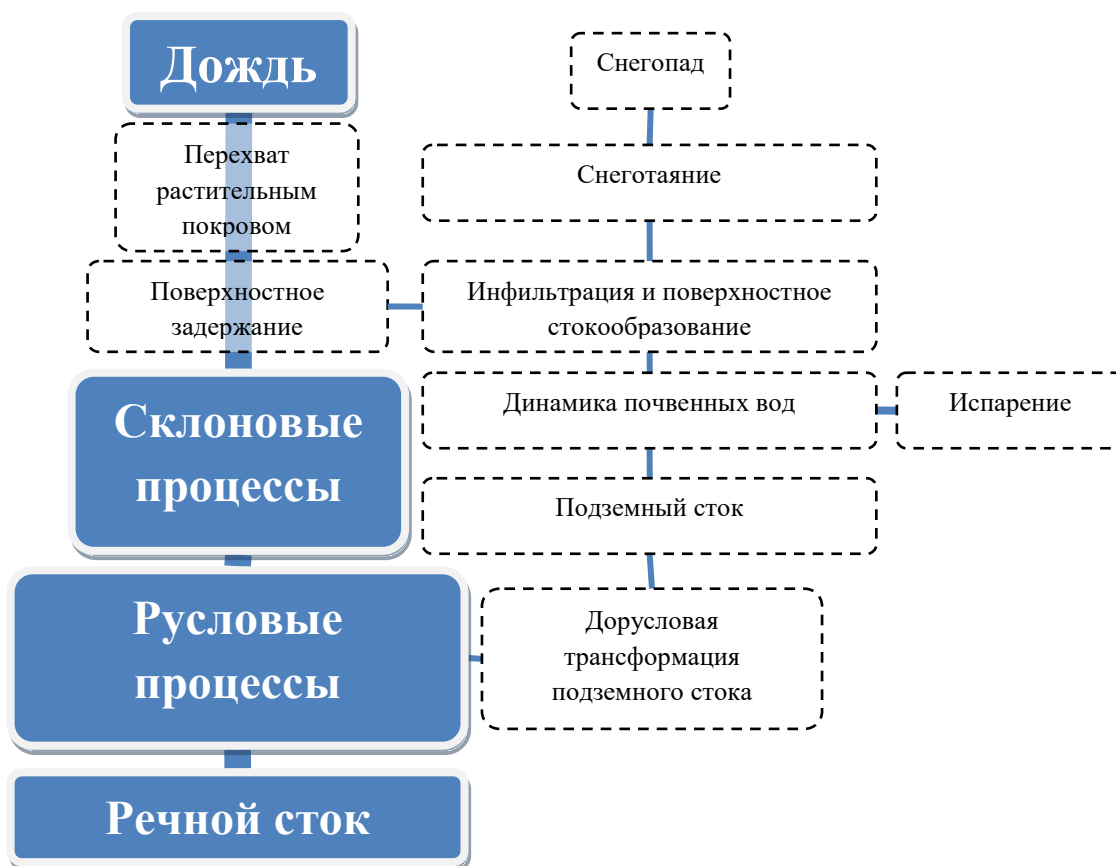


Рисунок 1.1. Элементы формирования поверхностного стока на замкнутом водосборе при дождевом паводке по [8].

Дождевой паводок – это результат взаимодействия интенсивных осадков с поверхностью речного бассейна. Интенсивность осадков, превышающая скорость их впитывания подстилающей поверхностью, приводит к быстрому формированию слоя поверхностного стока, который даже при мощности в 1 мм приводит к разгрузке в замыкающем створе водосбора площадью в 10 км², при условии отсутствия или незначительности потерь по пути, 10 тыс. м³ воды. Сочетание свойств речного бассейна и метеоусловий формируют характер гидрографа в замыкающем створе. Он показывает, как этот объём воды разгрузится. Одни и те же по интенсивности и пространственному распределению осадки над различными речными водосборами могут привести как к небольшому протяжённому увеличению уровня и расходов и продолжительной разгрузке выпавших осадков, так и к молниеносным разрушительным паводкам.

Среди природных особенностей региона, определяющих риск формирования и прохождения паводков, выделяются особенности климата, геологии и рельефа, растительного и почвенного покрова, гидрографическое строение водосборов. В данной главе рассматриваются выделенные природные особенности региона, проводится сравнение водорегулирующих свойств водосборов и рассматриваются причины и обстоятельства паводка на реках Северо-Западного Кавказа 6–7 июля 2012 года на основе собственных экспедиционных и общедоступных данных.

1.1.2. Климат

Северо-Западный Кавказ представляет собой низкогорную оконечность Кавказских гор, вытянутую вдоль побережья Чёрного моря. Эта территориальная особенность определяет характер циркуляции атмосферы, температурный режим, режим увлажнения, ветровой режим.

Бассейны рек Северо-Западного Кавказа находятся на границе умеренного и субтропического климатических поясов и получают довольно большое количество солнечного тепла. Земная поверхность летом хорошо прогревается, зимой остывает несильно. Радиационный баланс редко принимает отрицательные значения. В горной части региона на радиационный баланс влияет угол наклона склонов и их экспозиция относительно солнечных лучей. Продолжительность солнечного сияния

в год колеблется от 1800 ч в горной местности до 2500 ч на черноморском побережье. Наибольшие значения она принимает в июле и августе.

На Северо-Западном Кавказе прямая солнечная радиация достигает максимума на черноморском побережье – до 3000 МДж/м² и уменьшается с высотой. Имея в виду то, что высота горных хребтов возрастает с северо-запада на юго-восток, можно заключить, что распределение прямой солнечной радиации имеет схожую закономерность. Как правило, с высотой суммарная солнечная радиация возрастает за счёт увеличения рассеянной радиации, превышающего снижение прямой. Радиационный баланс на большей части Северо-Западного Кавказа в течение года положительный, однако может снижаться ниже нуля в декабре и январе.

Кавказские горы играют роль орографического механического барьера для прохождения воздушных масс различного характера и происхождения. Их расположение приводит к образованию здесь границы между умеренным и субтропическим климатом. Однако Северо-Западный Кавказ отличается низкогорьем, которое не может препятствовать ходу воздушных масс. Особый характер атмосферной циркуляции на Северо-Западном Кавказе придаёт расположение Чёрного моря, которое может быть источником влаги для проходящих и местных циклонов. Также на атмосферную циркуляцию большое влияние оказывают воздушные массы, движущиеся с севера и северо-востока, со стороны Русской равнины. В летний период погода определяется в основном влиянием средиземноморского антициклона. Иногда вторгается сухой континентальный воздух с Русской равнины. Летом это приводит к пониженному выпадению осадков, однако эта закономерность может изредка нарушаться из-за ливней, обусловленных влиянием Чёрного моря. Холодный период характеризуется прохождением черноморских и средиземноморских циклонов, приносящих большое количество осадков. Иногда с северо-востока оказывается влияние сибирского антициклона, приносящего морозную погоду без осадков и приводящего к проявлению боры.

Циркуляция атмосферы, сложная орография региона, сочетание моря и суши формируют ветровой режим региона. Общий перенос воздушных масс здесь происходит с запада на восток, однако расположение хребтов, сочетание моря и суши приводят к развитию специфических ветров. В предгорных и равнинных территориях от Анапы до Туапсе преобладают ветры преимущественно северные (38% в Анапе, 50% на Маркхотском перевале, 58% в Джубге). В связи с активным действием воздушных масс, которые преодолевают низкогорье Северо-Западного Кавказа с севера на юг или наоборот, здесь наблюдаются характерные направления ветров и значительные их скорости. Так, средняя годовая скорость ветра в Новороссийске достигает 4,6 м/с, в Джубге – 5,1 м/с, в Анапе – 6,0 м/с, на Маркхотском перевале – 9,3 м/с [9]. Повышенные скорости ветра наблюдаются в горной части региона. В течение года в связи с усилением атмосферной циркуляции в зимние месяцы наблюдаются повышенные средние скорости ветра – на Маркхотском перевале они превышают 11 м/с с декабря по март.

Ветры со скоростью больше 30 м/с называют ураганами. Они обладают разрушительной силой – ветер со скоростью 30 м/с оказывает давление на перпендикулярную площадь 56 кг/м², 40 м/с – 98 кг/м² [10]. Число дней с ветром более 15 м/с в регионе различно, максимальное число (132) наблюдается на Маркхотском перевале. В течение года они распределяются согласно средней скорости ветра.

Здесь широко развиты местные ветры, обусловленные орографией и влиянием гор и моря – бризы, бора. Бризы развиваются при устойчивой антициклонической погоде и распространены по всему черноморскому побережью. Дневной бриз дует со стороны холодного моря на нагретое побережье, ночной – в обратную сторону. В основном они развиваются на Северо-Западном Кавказе летом. Также для региона характерны горно-долинные ветры. Преимущественно в холодное время года в регионе развиваются бора. Она формируется, когда над континентом устанавливается область высокого давления, а над морем – низкого. Тогда при переваливании горных хребтов воздух остужается и сильным потоком резко спускаются к морю. Наиболее ярко бора проявляется в районе Новороссийска. Здесь

море в непосредственной близости соседствует с горным хребтом высотой 450–650 м. При этом скорость ветра в Новороссийске достигает 35–40 м/с, на перевале – до 60 м/с. В зимнее время бора часто сопровождается снегопадами и резким падением температуры до -20°C , что приводит к замерзанию бухты, обледенению судов и сооружений. В открытом море бора проявляется не дальше 10 км от берега [11].

Распределение температуры в регионе имеет особенности в горной и равнинной части. На равнине к северу от Кавказских гор различия практически отсутствуют, на черноморском побережье температура растёт при движении на юго-восток. Горная часть отличается немного более низкими температурами. Причём эти закономерности верны как для летних, так и для зимних температур. Годовая температура колеблется от 9 до 13°C . На участках выше 200 м наблюдается переход температуры воздуха через 0°C .

Относительная влажность воздуха характеризует степень насыщенности воздуха водяным паром и изменяется на территории Северо-Западного Кавказа значительно в связи с тем, что на неё влияет высота над уровнем моря, экспозиция склонов, режим ветра и пр. Относительная влажность характеризуется годовым и суточным ходом, обратным ходу температуры воздуха. В холодный период относительная влажность сравнительно высокая – более 80%. Летом она снижается менее 70%.

Распределение в течение года осадков обуславливается особенностями атмосферной циркуляции воздуха в регионе. В связи с этим наибольшее количество осадков выпадает в холодную часть года во время преобладающего действия средиземноморских и черноморских циклонов. Количество годовых осадков растёт при движении в горы и на юго-восток. Наименьшее количество выпадает в августе-сентябре, однако это может нарушаться действием черноморских циклонов. Южный макросклон Кавказского хребта отличается большим количеством осадков, чем северный.

Снежный покров в регионе развивается незначительно, преимущественно в горной части. Процент зим с отсутствием устойчивого снежного покрова здесь

колеблется от 93 на побережье, до 85 в горах. При этом в горах зимой наблюдаются частые метели. Ледниковый покров на Северо-Западном Кавказе отсутствует.

1.1.3. Геология и рельеф

Морфоструктура определяет геологию и орографию территории. В пределах Северо-Западного Кавказа выделяются 4 морфоструктурных района (рисунок 1.2): Таманский, Абинско-Хадыженский, Собербашско-Гунайский и Новороссийский [12]. Первые три относятся к северному макросклону.

Таманский район расположен между впадинами Азовского и Чёрного морей, Кавказскими и Крымским мегаантиклинориями. Преобладают синклинальные впадины, в центре которых формируются аккумулятивные низменности, лиманы или заливы моря. Кроме впадин встречаются брахиантиклинальные холмистые гряды в форме эллипсов, для которых характерны округлые формы и проявления грязевого вулканизма. К востоку от Анапского сдвига в Таманском районе наблюдается периклиналь Новороссийского синклинория. На складчатых структурах сформировалась денудационная пологоволнистая равнина, для которой характерен обращённый рельеф – речные долины соответствуют ядрам антиклиналей, а их водоразделы соответствуют моноклиналим крыльям. Таманский район сложен неоген-четвертичными глинами, песками, ракушечниками, известняками.

Абинско-Хадыженский район характеризуется развитием низкогорных куэст, развивающихся на палеогеновых и неогеновых породах северокавказской моноклинали. Район простирается узкой полосой между реками Абин и Пшеха. Северный пологий структурный склон куэст сложен известняками и песчаниками, крутой южный – породами палеоцена и верхнего мела. Куэсты прорываются реками Афипс, Убинка, Хабль, Ахтырь и др.

Собербашско-Гунайский район представлен среднегорными антиклинальными хребтами и синклинальными мульдами (корытообразными прогибами). Они сложены нижнемеловыми песчаниками, глинами, известняками. Здесь преобладают узкие гребневидные антиклинальные хребты и куэсты, разделённые крупными синклинальными впадинами, названными В.М. Муратовым

наложенными мульдами [13]. Мухлы имеют общий наклон к северу, к их ядрам приурочены долины рек, крылья слагают моноклиальные 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.



Рисунок 1.2. Морфоструктурные районы и разрывные элементы морфоструктур Северо-Западного Кавказа СЗК [14].

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, выражающееся в орографии, определяет условия формирования речных бассейнов. Различия в строении морфоструктурных районов выражаются в различных преобладающих формах речных бассейнов.

Слагающие породы определяют в сочетании с крутизной уклонов, растительным покровом и режимом выпадения осадков опасность оползневых и эрозионных процессов.

В орографическом отношении исследуемый регион представляет собой на большей части ряд параллельных друг другу хребтов различной высоты (рисунок 1.3). Среди них выделяются Главный хребет, Южный и Северный Боковой хребты, и к северу от них Передовой, Скалистый, Пастбищный и Лесистый хребты. Они протягиваются параллельно побережью с северо-запада на юго-восток. Отчётливей всего в современной орографии выделяются Главный и южный Боковой хребты.



Рисунок 1.3. Орография региона.

Главный хребет протягивается от истоков р. Гостагайка, главными его вершинами являются Макитра (324 м), Еременкова (635 м), Тхаб (905 м) и Лысая (1425 м) [15]. Гора Фишт также относится к Главному Кавказском хребту. Через понижения в хребте и через сам хребет в северо-западной его части нередко переваливают влажные воздушные массы, оставляя при этом много дождевых осадков. К югу от хребта протягиваются почти перпендикулярные отроги,

соединяющие его с Южным Боковым хребтом, по ним проходят водоразделы рек. Стоит отметить, что в орографии района наблюдается миграция главного водораздела с Главного хребта на Южный Боковой. Всего в пределах исследуемого района восемь прорывов хребта реками: Баканка, Липки, Богого, Скобидо, Адегой, Пшада, Шапсуго, Туапсе [16].

В геологическом отношении Северо-Западный Кавказ представляет собой складчатую область, сложенную породами кайнозойской и мезозойской эры (рисунок 1.4). При движении от оси Главного Кавказского хребта возраст пород уменьшается. В юго-восточной части региона наблюдаются выходы пород Юрского периода, представляемые глинистыми сланцами, песчаниками, известняками, гипсом. Пространственно они локализуются в верховьях Псекупса, постепенно уменьшаясь к западу, где они встречаются небольшими островами в верховьях Убинки. Вокруг юрских пород распространены породы мелового периода, возраст которых постепенно уменьшается к западу. Меловая система представлена в основном известняками и мергелями, которые в западной части, в районе Новороссийска, имеют промышленные запасы. Окаймляют меловые породы палеогеновые и неогеновые отложения, примыкающие с северной равнинной стороны. К ним приурочены разрабатываемые нефтегазовые месторождения.

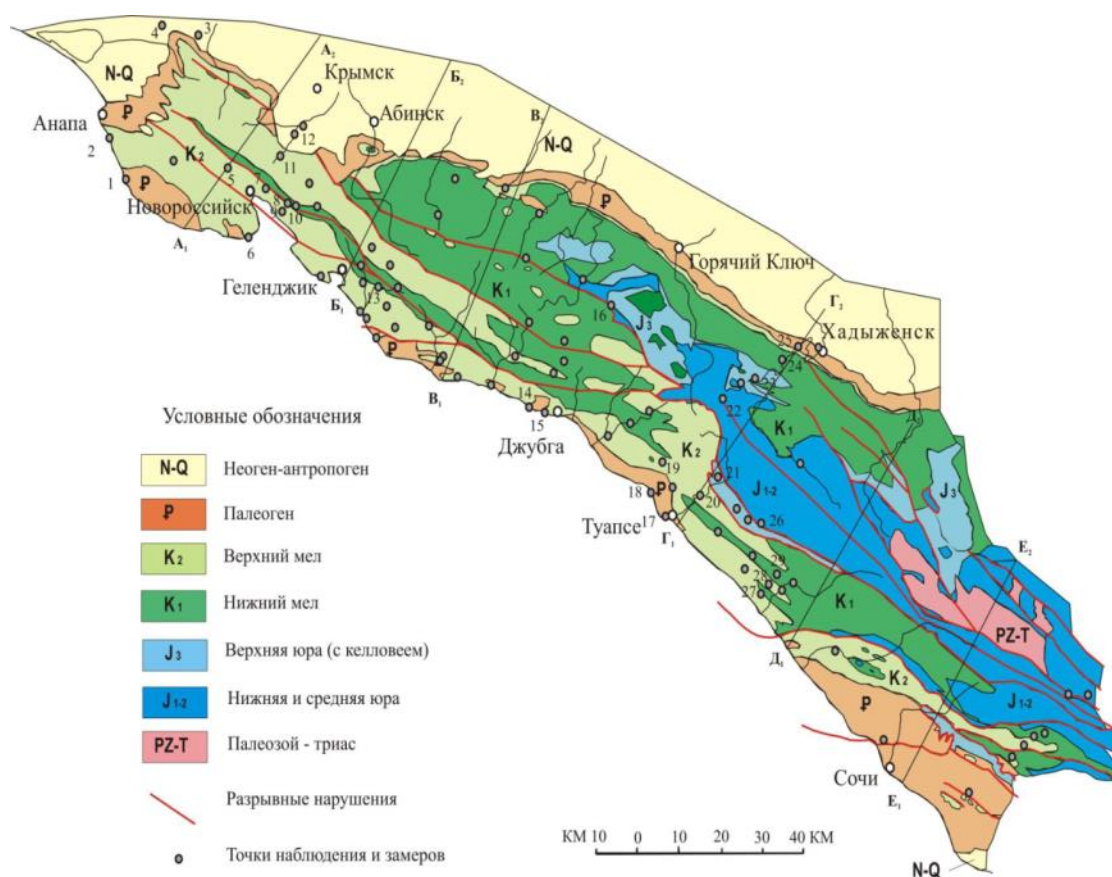


Рисунок 1.4. Геология региона. [17]

1.1.4. Растительность и почвенный покров

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). Растительный покров региона представлен в предгорной части степями, а в горной части – дубовыми и буковыми лесами. Нижняя граница леса здесь колеблется около 100 м. Лесная растительность региона представлена в основном дубовыми лесами, которые к востоку с повышением рельефа сменяются буковыми. Дубовый лес

обладает хорошими, по сравнению с лугами и степями, водоудерживающими способностями, однако уступает буковому лесу.

Растительные сообщества в условиях горной и предгорной местности определяются не только широтным расположением, но и высотной зональностью. Этим объясняется преобладание на территории региона лесной растительности вместо степей. Только долины рек северного макросклона (левые притоки Кубани) в своей равнинной части покрыты распаханной степной растительностью Азово-Кубанской низменности. Однако здесь также развиваются интразональные пойменные прибрежные леса вдоль рек (тугайные леса).

Лесная растительность на территории Северо-Западного Кавказа представлена в большей части различными дубняками – лещиновым (с преобладанием в древостое дуба черешчатого, дуба Гартвиса, лещины), щучковым и молиниевым (оба с преобладанием дуба черешчатого, различаются составом кустарников и травяного покрова), ясеневым и ольховым (с значительной примесью ясеня обыкновенного и ольхи серой соответственно). На черноморском побережье в дубняки примешивается дуб имеретинский [18]. Наиболее густо дуб произрастает на освещённых склонах хребтов. Вдоль берега между Новороссийском и Геленджиком преобладает можжевельное аридное редколесье, в котором доминирует можжевельник, дуб пушистый, держи-дерево. В районе Горячего Ключа встречаются массивы каштановых лесов.

Нижнегорная растительность черноморского побережья существенно изменяется с запада на восток по мере увеличения годовой нормы атмосферных осадков. От Анапы до Туапсе на побережье преобладают сухие дубово-грабовые леса. Южные склоны, выходы известняков, осыпи занимают шибляковые формации ксерофитов. На приморских склонах в зоне импัลверизации морских солей сохранились реликтовые сосняки с доминированием сосны пицундской или локальные массивы сосны крымской.

На территориях, расчищенных от леса на нижних частях склонов, развиваются бобово-злаковые разнотравные залежи, отличающиеся невысоким, но густым (проективное покрытие 0,7–0,9) и ценным в кормовом отношении травостоем. На

30–40% он состоит из бобовых, также развиты злаки, разнотравье. Такие расчистки хорошо подходят для сенокосов и летних пастбищ для молочного скота. В лесных расчистках на сланцевых песчаниковых хребтах развиваются крупнотравные вейнико-разнотравные луга, отличающиеся высоким травостоем (1–1,5 м) с низкой кормовой питательностью [19].

Водоохранная и водорегулирующая роль дубовых и буковых лесов на Северо-Западном Кавказе описана в [20].

В формировании паводков почвенный покров, как и растительность, играет роль водоудерживающей ёмкости, которая наполняется при выпадении осадков на её поверхность. В дальнейшем вода из неё расходуется на внутрипочвенный сток, на грунтовые воды и др. Структура и гранулометрический состав определяют водно-физические свойства почв: водопроницаемость (способность почвы впитывать и пропускать через себя воду), водоудерживающую способность. Водопроницаемость почв зависит от состава и структуры. Наиболее водопроницаемы песчаные почвы, наименее – глинистые [21]. Водопроницаемость зависит от механического состава, структуры (у структурных почв выше, чем у бесструктурных), содержания гумусовых веществ (в целом от общего объема пор в почве и их размера), а также от состава поглощенных катионов: натрий уменьшает водопроницаемость, а кальций – увеличивает. В легких по механическому составу почвах поры крупные и водопроницаемость всегда высокая. В почвах тяжелого механического состава с глыбисто-пылевой структурой и плотных бесструктурных почвах водопроницаемость низкая. После оструктурирования такие почвы в несколько раз улучшают фильтрационную способность (суглинистые и глинистые почвы, обладающие водопропрочной комковато-зернистой структурой, также отличаются высокой водопроницаемостью).

Хорошо водопроницаемыми считаются почвы, в которых вода в течение первого часа проникает на глубину до 15 см. В средневодопроницаемых почвах вода за первый час проходит от 5 до 15 см, а в слабоводопроницаемых – до 5 см.

Влагоёмкость – способность почвы впитывать и удерживать определенное количество воды [22]. Выражается в процентах к весу сухой почвы. Эта способность

зависит от гранулометрического состава, содержания гумуса, состава поглощенных катионов. Высокая влагоёмкость характерна для глинистых почв, богатых коллоидами, с высоким содержанием гумуса. Высокой влагоёмкостью обладают почвы, содержащие известь, хлориды, слабовлагоемкие песчаные почвы.

Почвы региона в центральной части горной системы представлены бурыми лесными. К ним с севера примыкают тёмно-серые и серые лесные и с юга дерново-карбонатные почвы (рисунок 1.5). 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 внутрипочвенный боковой сток. Высокой водоудерживающей способностью также обладают дерново-карбонатные почвы.

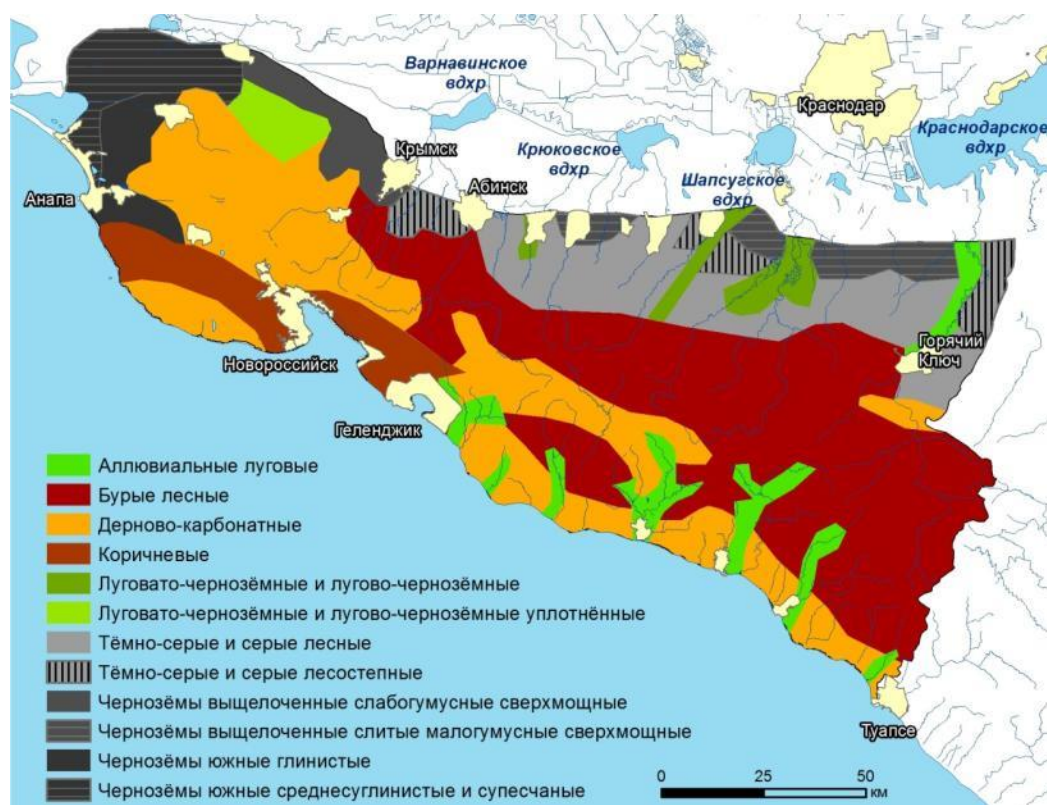


Рисунок 1.5. Почвы Северо-Западного Кавказа [23].

Серые лесные [24] почвы формируются под дубовыми лесами с развитым подлеском и травяным покровом. Преобладают тяжёлосуглинистые и суглинистые серые лесные почвы. Серые почвы – более рыхлые и более лёгкие, чем тёмно-серые.

Бурые лесные обладают промывным режимом, имеют хороший вертикальный внутрипочвенный дренаж. Верхние горизонты характеризуются низкими величинами плотности и высокой порозностью, с глубиной плотность почвы увеличивается, порозность же снижается. Водопроницаемость этих почв в верхних горизонтах высокая и очень высокая и коррелирует с величинами плотности и порозности. Величины фильтрационной способности выше 0,5 мм/мин обеспечивают впитывание сильных осадков ливней. Высокая фильтрационная способность верхних горизонтов способствует высокому поглощению осадков и переводу их во внутрипочвенный сток. Бурые лесные почвы могут пропускать влагу умеренных и сильных дождей (до 0,5 мм/мин) без формирования поверхностного стока.

Дерново-карбонатные почвы формируются в условиях повышенного увлажнения. Они обладают хорошей структурированностью, рыхлым и слабоуплотненным сложением. Это приводит к высокой водоудерживающей способности. Поверхностные горизонты могут удерживать 33–44% влаги. предельная влагоёмкость может составлять 33%. Порозность составляет 35–42% от объёма почвы и возрастает с глубиной.

Коричневые почвы [25] развиваются под кустарниками. Верхние горизонты обладают низкой плотностью и высокой порозностью.

Таким образом, наиболее промывными являются бурые лесные и дерново-карбонатные почвы, затем коричневые, тёмно-серые и серые лесные. Распространение промывных почв в верховьях рек обуславливает стабильный сток рек при выпадении несильных осадков и преобразование осадков во внутрипочвенный сток. В то же время растительный покров, при преобладании дубовых лесов с развитым подлеском и травяным покровом, также способствуют поглощением влаги при выпадении несильных осадков. Для формирования

паводков для большей части региона необходимо выпадение высокоинтенсивных осадков (более 0,5 мм/мин) на достаточно большой территории и продолжительное время.

1.1.4. Гидрология

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. Так формируется Адагум из слияния Баканки и Неберджая. Адагум в свою очередь перед Варнавинским водохранилищем сливается в единый поток с Псыжем, Шибиком и Абином. Речные системы между Абином и Ахтырем впадают в Кубань, водохранилища на ней и каналы без слияния между собой. Ахтырь, Шебш и Бзюк, как и Адагум-Абин на равнинной территории, сливаются между собой перед впадением в Шапсугское водохранилище. В горной части северного макросклона слияние крупных притоков характерно 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 неразветвлённые 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.

Гидрографическая сеть региона образована орографическим строением территории. Бассейны в горной части состоят из нескольких элементов. Водотоки, текущие по дну межгорных котловин, принимают короткие водные потоки справа и слева непосредственно с горных склонов. Слияния таких водотоков прорезают северные или южные окружающие хребты, а затем принимают другие собирающие потоки, текущие по дну межхребетных котловин. Таким образом, образуются

достаточно большие по площади речные бассейны, которые при выходе на равнину обладают повышенной паводковой опасностью. Следует отметить, что такое строение бассейнов характерно как для северного макросклона, так и для южного (рисунок 1.6). В связи с этим наводнения в регионе случаются как на черноморском побережье, так и в кубанских станицах при выходе рек на равнину.

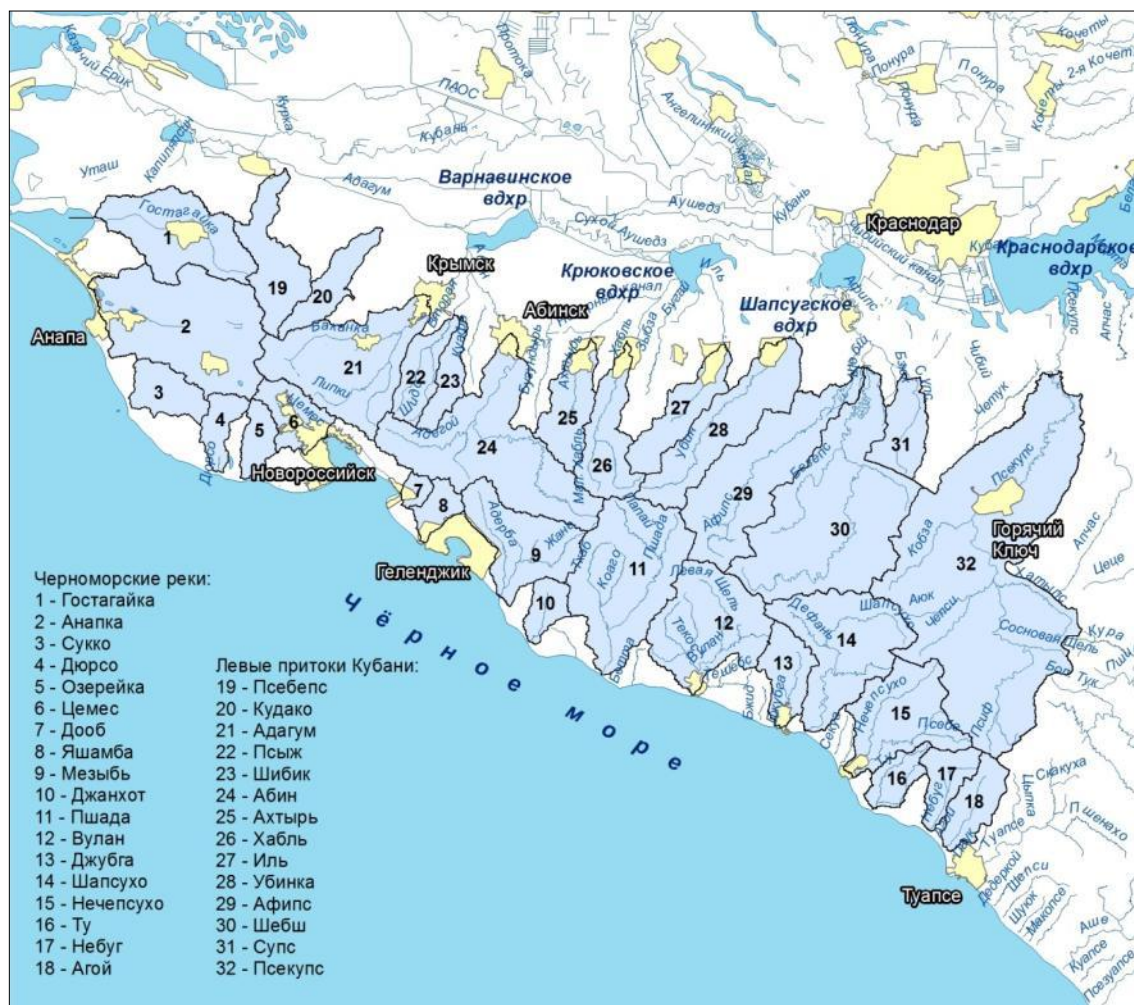


Рисунок 1.6. Гидрографическая сеть и крупнейшие водосборы региона

Большое влияние размер водосборного бассейна оказывает на процессы формирования стока. Чем больше величина бассейна, тем больше проявляется его роль как регулятора стока. В пределах большого бассейна разнообразнее количество и режим поступления дождевых вод. Также с увеличением размеров бассейна возрастает длина путей движения воды по русловой сети, увеличиваются разнообразие скоростей движения и время добегания воды через толщу почв и горных пород; растёт глубина вреза русла и относительный объём в его величине подземного стока.

Помимо размеров речного бассейна существенное влияние на процессы стока оказывает его форма. Её отражают множество показателей: длина бассейна, его средняя и наибольшая ширина, коэффициенты асимметрии, вытянутости и другие. Большое влияние количественной оценке этих характеристик, а также анализу их роли в процессах формирования стока уделено в работах [26], [27], [28] [29], [30].

С движением на запад от р. Пшиш средняя высота водосборов снижается, значительно увеличивается количество осадков, дождевые паводки учащаются, максимумы их повторяемости и интенсивности всё чаще и чаще передвигаются на зимние месяцы, когда выпадающие при оттепелях дожди смывают неустойчивый снежный покров. Водный режим региона характеризуется интенсивными паводками в осенне-зимний период и довольно устойчивой летней меженью, нарушаемой только дождями. Основная часть речного стока (75–80% годового), образующаяся за счёт выпадающих твёрдых и жидких осадков, проходит в зимний период с ноября по март. Вследствие незначительной роли грунтового питания сток некоторых рек в летнюю межень приближается к нулю.

Реки Северного Причерноморья между ст. Гостагаевской на севере и до г. Туапсе на юге обладают паводочным режимом. Гидрограф всех рек региона имеет гребенчатый вид, скачки уровня которого приурочены к выпадению сильных дождей. Дождевые паводки проходят чаще зимой, образуя в это время 45–80% годового стока рек.

Уровенный режим рек рассматриваемого региона имеет паводковый характер. Средняя годовая амплитуда уровней доходит до 5,5 м. Шебш выделяется – до 10 м (таблица 1.1). Стоит также отметить, что левые притоки Кубани иногда в межень пересыхают, даже Пшиш и Шебш.

Из приведённой таблицы 1.2 видно, что средние расходы, модули и слои стока в пространственном отношении изменяются неравномерно – со снижением на небольших средних водосборах рр. Ахтырь, Хабль, Иль, Убин. При этом в целом наблюдается рост всех значений на восток – средней высоты водосборов, модулей стока, слоя стока. В Северном Причерноморье исследованиями охвачены всего четыре реки, однако и здесь просматривается тенденция к увеличению этих

параметров. С запада на восток постепенно увеличивается средняя высота местности и вместе с тем растёт модуль и слой стока.

Таблица 1.1. Годовые амплитуды уровней воды [15], [16].

Река, нас.пункт	Ср. амплитуда, м	Макс. амплитуда, м	Мин. амплитуда, м	Площадь водосбора, км ²	Средняя высота водосбора, м
Нижняя Кубань					
Адагум, Крымск	2,12	4,04	0,7	328	220
Абин, Абинск	1,64	2,54	1,31	432	300
Убин, Северская	2,96	4,5	1,15	201	250
Шебш, Новодмитриевская	6,65	9,94	2,27	581	220
Пишиш, Хадыженск	3,58	5,45	1,42	710	560
Северное Причерноморье					
Гастогайка, Гастогаевская	1,86	3,45	1	106	160
Адерба, Светлый	1,63	2,24	1,06	60	250
Вулан, Архипо-Осиповка	2,81	5,41	1,37	265	240
Туапсе, Туапсе	2,18	5,00	1,63	350	390

Питание рек делится на дождевое, снеговое, ледниковое и подземное. Преимущество какого-либо из них проявляется в изменчивости стока. Так, при преимущественно дождевом питании основной сток реки происходит во время выпадения жидких осадков, что приводит к значительным скачкам стока. При этом основная часть стока приходится на дождливый период года (например, муссон). В остальное же время сток может быть заниженным или отсутствовать вовсе. Снеговое питание приводит к основному годовому стоку во время таяния снега – весной. Ледниковое питание рек подразумевает значительные внутрисуточные колебания стока в верховьях реки – повышенный сток днём и вечером и пониженный ночью и утром. При этом сезонные колебания несильно выражены, в тёплое время года сток повышенный, в холодное – пониженный или отсутствует. Подземное питание рек подразумевает практически равномерное распределение

стока по сезонам, незначительно меняющееся в зависимости от восполнения объёмов подземных вод.

По [16], распределение стока внутри года по сезонам на притоках Нижней Кубани крайне неравномерно. Оно обуславливается тёплой и неустойчивой зимой и частыми дождевыми паводками; максимум интенсивности и повторяемости приходится на зиму. На паводочный сезон приходится 74% стока, на весну–лето – 25%, на осень – 1%. В многоводный год наибольший сток проходит в феврале и в марте. Однако сильные дождевые паводки способны полностью менять сезонное распределение.

Таблица 1.2. Средний многолетний сток рек [15], [31].

Река, нас.пункт	Площадь водосбора, км ²	Средняя высота водосбора, м	Расход воды, м ³ /с	Модуль стока, л/с км ³	Слой стока, мм	Объём стока, млн м ³
Нижняя Кубань						
Адагум, Крымск	328	220	3,79	11,6	366	120
Абин, Абинск	432	300	6,60	13,4	423	208
Ахтырь, Ахтырская	120	160	0,99	8,3	260	31
Хабль, Холмский	141	270	1,74	12,3	388	55
Иль, Ильский	120	260	0,99	8,3	260	31
Убин, Северская	201	250	1,87	9,3	293	59
Афипс, Смоленская	317	250	3,78	11,9	379	120
Шебш, Новодмитриевская	581	220	7,69	13,2	416	242
Псекупс, Горячий Ключ	765	310	15,00	19,6	618	473
Пшиш, Хадыженск	710	560	19,00	26,8	845	600
Северное Причерноморье						
Гастогайка, Гастогаевская	106	160	0,24	2,3	71	7
Адерба, Светлый	60	250	1,00	16,8	529	31,6
Вулан, Архпо-Осиповка	265	240	6,57	24,8	780	207
Туапсе, Туапсе	350	390	13,30	38,1	1200	420

По [31], на реках Северного Причерноморья зимний сток составляет 40–45%, весенний – 30–45%, летний – 7–9%, осенний – 4–12%. Самым маловодным здесь является сентябрь, самым многоводным месяцем – февраль или март.

В целом, для рек северочерноморского сектора доля дождевого питания составляет 83%, снегового – 6%, подземного – 11% [32].

Водный режим рек определяется климатическими, орографическими и гидрографическими особенностями территории и отражает сложный комплекс физико-географических факторов. В связи с особенностями атмосферной циркуляции, подверженной влиянию гор и моря, на реках Северо-Западного Кавказа характерен паводочный режим. В регионе максимальные расходы дождевых паводков превышают пики весенних половодий. Высокие дождевые паводки формируются кратковременными ливнями, когда их интенсивность превышает скорость впитывания влаги в почву, и длительными обильными дождями, когда объём выпавших осадков превышает влагоёмкость грунтов. По [33], синхронность в формировании высоких дождевых паводков не наблюдается, что свидетельствует о локальном характере большей части интенсивных дождей и ливней.

На р. Адерба наибольший расход дождевого паводка наблюдался 12 марта 1981 г. (178 м³/с), на р. Вулан – 18 ноября 1980 г. (1050 м³/с), на р. Туапсе – 1 августа 1991 г. (2300 м³/с) [15]. По [32], максимальные расходы дождевых паводков на рр. Пшиш, Псекупс, Шебш, Афипс, Убин, Иль, Хабль, Ахтырь, Абин и Адагум составили соответственно 753 м³/с, 851 м³/с, 650 м³/с, 272 м³/с, 265 м³/с, 155 м³/с, 188 м³/с, 635 м³/с и 507 м³/с. В таблице 1.3 представлены расчётные максимальные расходы во время дождевых паводков различной обеспеченности. Они рассчитывались на основе наблюдений 1930–1960-х гг.

По наблюдениям на реках бассейна Кубани в 1927–1968 гг. на Северо-Западном Кавказе, крупные наводнения зафиксированы в бассейнах Убинки, Иля и Адагума [32] соответственно в 1968, 1944 и 1939 годах. В постсоветское время сильный паводок на Адагуме отмечался 3 января 1995 г. (скачок уровня на 376 мм в Крымске) [32]. В 2002 году, 6–9 августа, наблюдались сильные паводки на реках

Адагум, Цемес, Дюрсо Озерейка и пр. Максимальный расход воды в Крымске оценивается в 800 м³/с [34].

Таблица 1.3. Максимальные расходы воды (подчёркнутые) и слой стока (снизу) различной обеспеченности на левых притоках Кубани, впадающих ниже Краснодарского водохранилища, м³/с [15].

Обеспеченность, %	1	2	5	10	25	Коэф. поверхн. стока
Пшиш, Хадыженск	<u>895</u> 243	<u>831</u> 216	<u>738</u> 179	<u>662</u> 149	<u>536</u> 109	0,56
Псекупс, Гор. Ключ	<u>947</u> 172	<u>883</u> 157	<u>792</u> 136	<u>714</u> 119	<u>591</u> 93	0,5
Шебш, Новодмитриевская	<u>699</u> 166	<u>645</u> 149	<u>565</u> 126	<u>500</u> 106	<u>394</u> 78	0,75
Афипс, Смоленская	<u>345</u> 181	<u>319</u> 159	<u>282</u> 130	<u>251</u> 107	<u>204</u> 76	0,59
Убин, Северская	<u>317</u> 174	<u>282</u> 150	<u>234</u> 119	<u>195</u> 95	<u>142</u> 62	0,73
Иль, Ильский	<u>178</u> 136	<u>157</u> 119	<u>130</u> 96	<u>107</u> 78	<u>76</u> 54	0,74
Хабль, Холмская	<u>277</u> 115	<u>243</u> 104	<u>198</u> 89	<u>161</u> 77	<u>111</u> 58	0,72
Ахтырь, Ахтырская	<u>195</u> 98	<u>169</u> 89	<u>135</u> 75	<u>109</u> 65	<u>73</u> 49	0,54
Абин, Абинск	<u>815</u> 235	<u>727</u> 202	<u>607</u> 160	<u>507</u> 127	<u>370</u> 85	0,79
Адагум, Крымск	<u>691</u> 223	<u>576</u> 190	<u>453</u> 148	<u>357</u> 119	<u>227</u> 73	0,79

Гидрогеологические условия формирования подземных вод на территории Северо-Западного Кавказа различны. Для пород различного геологического возраста они обладают своими особенностями. Согласно геологическому строению, здесь выделяются подземные воды комплексов палеогеновых, меловых и юрских отложений. Подземные воды водоносного комплекса отложений палеогена приурочены к территории Азово-Кубанской низменности, примыкающей к горным грядам Северо-Западного Кавказа с севера. Основную часть территории слагают породы меловых отложений; на юго-востоке небольшими островками появляются юрские отложения. Режим пополнения подземных вод формируется соотношением выпадающих и тающих осадков и свойствами слагающих геологических пород – водопроницаемостью, водоносностью, строением. В общем случае объём

подземных вод и величина их разгрузки в речную сеть коррелирует с количеством выпадающих осадков: чем больше осадков, тем больше воды впитывается земной поверхностью и просачивается в подземные воды. Пополнение запасов происходит, главным образом, во время выпадения осадков (большей частью в холодное время года) и весной во время снеготаяния. Среднегодовые модули подземного стока увеличиваются с севера к главному водоразделу от 0,3 л/сек с км² до 1,0 м/сек с км². Наличие здесь преимущественно глинистых и песчано-глинистых отложений, отличающихся локальной водоносностью, приводит к ухудшению условий питания подземных вод, что выражается в низком коэффициенте подземного питания – от менее 10% на западе до 10–20% на востоке.

1.2. Дождевые паводки на реках Северо-Западного Кавказа и их исследования

Характерный для рек региона паводочный режим стока отличается практически отсутствующим половодьем и сильной зависимостью от выпадающих дождей, приводящих к паводкам. Наблюдения за реками региона первых трёх четвертей XX века были положены в основу томов 8 и 9 серии Ресурсы поверхностных вод СССР за 1973 и 1969 гг. соответственно. За последние 40 лет все районы Краснодарского края, расположенные на территории Северо-Западного Кавказа, подвергались воздействию опасных паводков [35], которые привели к разнообразному ущербу на различных водосборах и отличались по интенсивности и причинами формирования (таблица 1.4).

В рамках работы [35] проводится анализ наводнений на черноморском побережье Северо-Западного Кавказа, в рамках которого рассматривается повторяемость различных типов наводнений, а также показывается небольшой рост частоты опасных паводков со второй половины XX века.

Географическая компактность региона обуславливает практически идентичные условия для синоптических условий формирования паводка. Поэтому различия в паводковой опасности между водосборами заключаются не в климатических условиях, а в водорегулирующих свойствах конкретных водосборов

– различиях растительного и почвенного покрова, орографии, строения речных бассейнов.

Таблица 1.4. Наводнения на Северо-Западном Кавказе [36].

Дата	Слой осадков	Реки и населённые пункты	Подъём уровня	жертвы
11–13.06.1966		Мезыбь, Адерба (г.Геленджик, пос. Дивноморское)	1,5 м. Адерба	
9.07.1975	196,4 мм за сутки (Архипо-Осиповка)	Вулан		
31.12.1977		Мезыбь, Пшада, Вулан (пос. Дивноморское, с. Михайловский перевал, пос. Архипо-Осиповка)	3,5–4 м Вулан и Мезыбь	
11–12.11.1980		Вулан (пос. Архипо-Осиповка)	5,5 м	
11.11.1981		Вулан (пос. Архипо-Осиповка)	3,9 м	
01–04.08.1982		Джубга (пос. Джубга)	до 3 м	2
24.11.1989		Вулан (пос. Архипо-Осиповка)	4,7 м	
01.08.1990	МС Джубга – 205 мм за 10 ч	Джубга (пос. Джубга)		
21.06.1992		Цемес (г. Новороссийск)		
25–26.12.1995		Сукко, Цемес, Яшамба, Суаран, Мезыбь, Пшада, Вулан	до 5 м Вулан, 1,9 м Мезыбь, 2,5 м Адерба	
7.01.1996		Псекупс, Пшиш, Пшеха (г. Горячий Ключ, г. Белореченск)		
16–17.12.1996		Джубга (пос. Джубга, пос. Дефановка)		
24.12.1996		Вулан (пос. Архипо-Осиповка)	4,9 м	
26.10.1997		Мезыбь (пос. Дивноморское)		
18.02–07.03.1998		р. Чилбас		
10–12.03.2000		реки Крымского, Абинского и Северского районов	4,5 м	
31.08.2000		Вулан (пос. Архипо-Осиповка)		
02.07.2001		Джубга (пос. Джубга)		
19–31.12.2001		реки Абинского, Крымского, Северского, Туапсинского районов, Адыгеи		
08–17.08.2002	69 мм 5 августа, 10-20 мм 6 и 7 августа, 8-9 августа 115 мм (месячная норма 45 мм)	реки Дюрсо, Цемес, Баканка, Сукко, Озерейка; оз. Абрау-Дюрсо (гг. Новороссийск, Анапа, Крымск, Геленджик; пос. Абрау-Дюрсо, Южная Озереевка, Глебовское, Васильевка, Цемдолина,	в Новороссийске 0,5–2 м	59

		Широкая Балка, Горный, Тарусино, Мысхако, Нижнебаканский, Верхнебаканский, Неберджаевская, Анапская, Джубга)		
06.10.2002		Реки Цемес и др. (Геленджикский район, г. Новороссийск, пос. Кабардинка)		
12.11.2002		р. Псекупс (г. Горячий Ключ, ст. Саратовская)		
01.08.2003		Цемес (г. Новороссийск)		
15– 16.10.2010	95 мм в Туапсе	Джубга, Пляхо, Нечепсухо, Туапсе и др.	6–8 м Джубга,	17
5.10.2011	60 мм	Вулан, Пшада, Мезыбь, Адербиевка (пос. Архипо- Осиповка, пос. Береговое, пос. Дивноморское)	2,5 Пшада и Адерба	
06– 7.07.2012	282 мм (Геленджик), 275 мм (Новороссийск)			11
06– 7.07.2012	171 мм в Крымске	Адагум, Абин	7–8 м в Крымске	168
21– 22.08.2012	135 мм за 8 ч	Шапсухо, Пляхо, Нечепсухо	5 м Нечепсухо	4

Формирование паводков происходит при взаимодействии выпадающих осадков с различными элементами водосборов (растительностью, почвами, орографией и др.). В результате этого взаимодействия в руслах рек происходит кратковременный значительный скачок расходов, обусловленный стеканием водных масс поверхностного стока с водосборной площади. Взаимодействие расходов с морфологией речных русел и пойм приводит к установлению уровня воды, который становится причиной затопления русла и пойменной территории, а также определяет скорости водного потока. Высокая скорость увеличивает способность водного потока перемещать объекты, что увеличивает его опасность для имущества и жизни людей.

Кроме характеристик водного потока большое значение имеет временной промежуток между выпадением интенсивных осадков и затоплением территории. В это время необходимо предупреждать население об угрозе паводка и проводить

эвакуационные меры. При сравнении реакции водосборов на выпадение одинаковых осадков будем определять этот временной промежуток как время между максимумом осадков, который может фиксироваться наблюдениями или прогнозироваться, и максимальным расходом в замыкающем створе.

1.3. Структура и динамика природно-антропогенных ландшафтов в 2000-2015 гг.

Формирование и прохождение паводков практически во всех регионах земного шара испытывают антропогенное влияние. Человеческая деятельность оказывает воздействие на элементы водного баланса территории: на режим выпадения осадков [37], на распределение долей поверхностного, подземного, грунтового стока и др. Преобразования ландшафтов (распашка полей, лесоразведение и сведение леса, рост площадей населённых пунктов) значительно изменяют водорегулирующие свойства водосборов, определяющие условия формирования паводков [38]. Кроме того, прохождение паводков происходит в условиях антропогенного воздействия на морфологию речных долин [39] (влияние антропогена на русла), застройки пути водного потока (русла, поймы, надпойменных террас).

Антропогенные факторы оказывают влияние на погоду и климат и на природные ландшафты, свойства которых определяют формирование речного стока. Среди антропогенных процессов, воздействующих на стокоформирующие свойства водосборов, выделяются изменение растительного покрова, изменение морфологии речной долины, трансформация почвенного покрова и увеличение малопроницаемых поверхностей.

Древнейшее влияние человеческой деятельности на стокоформирующие свойства речных бассейнов связано с земледелием и скотоводством. Земледелие подразумевает распашку обширных пространств, нередко сопровождаемую сведением лесов, осушением болот, формированием ирригационной системы и прочими мероприятиями, влияющими на водный режим территории. Земледелие приводит к формированию обширных участков земли с бедным видовым

разнообразием и однородным по плотности растительным покровом. Как правило, это означает меньшую общую биомассу растительности. Важным свойством такой территории становится выраженная сезонность растительной массы, что означает резкое её сокращение в определённые сезоны. При этом влагоёмкость покрова сильно падает, что приводит к увеличению поверхностного стока и, при условии снижения шероховатости поверхности, приводит к интенсивному смыву почв. Развитие скотоводства часто приводит к перевыпасу – деградации растительного покрова (вытаптыванию), уплотнению почв [40]. Это приводит к значительному снижению способности растительного покрова поглощать влагу и к снижению влагопроницаемости почв. Повышение поверхностного стока усиливает водную эрозию почв, что приводит к быстрому развитию соответствующих геоморфологических форм, оползней и др.

Наиболее яркое влияние антропогенной деятельности на формирование стока наблюдается в сильно урбанизированных районах. Здесь практически полностью переформируется структура растительного покрова, сильно увеличиваются малопроницаемые площади (покрытия асфальтом, бетоном и другими искусственными материалами), сглаживается рельеф, концентрируются сооружения, влияющие непосредственно на водные потоки при стоке. Интенсивное строительство, сопровождаемое прокладкой современной городской инфраструктуры (канализации, водопровода и пр.), оказывает значительное влияние на почвенный покров и динамику подземных вод. Многими авторами исследовалось влияние урбанизации на формирование стока. Среди советских и российских работ следует упомянуть [41], [42], [43], за рубежом выделяются работы [44], [45], [46].

С помощью адаптированных гидрологических моделей водосбора и долины р. Адагум возможно оценить влияние роли различных антропогенных составляющих на формирование и прохождение паводка. Антропогенные изменения, влияющие на процессы формирования речного стока, могут быть оценены с помощью гидрологической модели водосбора. Влияние различных сооружений (транспортной инфраструктуры, гидротехнических и прочих

сооружений) на прохождение паводка в долине р. Адагум можно косвенно оценить с помощью гидрологической модели долины.

Для оценки влияния антропогенных изменений на формирование паводка на водосборе рассматривался некоторый водосбор площадью 10 км², обладающий схожими для суббассейнов на водосборе р. Адагум параметрами стокоформирующих процессов. При этом производился расчёт динамики расходов на замыкающем створе водосбора (время наступления максимума и значение максимума) при варьировании одного параметра. Для таких расчётов использовалась динамика интенсивных осадков (рисунок 1.7). Их суммарный объём составляет 300 мм, они длятся в течение двух суток и обладают ярко выраженным пиком, достигающим интенсивности 35 мм за 10 минут.

Наиболее сильно антропогенное влияние оказывается на растительность, поверхность, влагопроницаемые свойства почв. Кроме того, изменяется доля непроницаемых поверхностей. В гидрологической модели водосбора параметры, характеризующие влагопотребляющие свойства растительного покрова, выражаются через параметры «Начальное влагосодержание», «Максимальное влагосодержание».

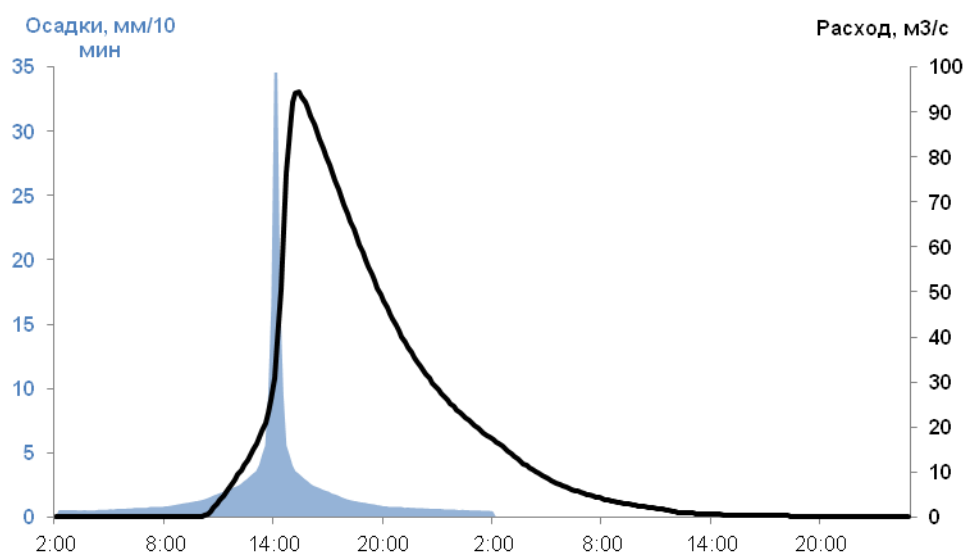


Рисунок 1.7. Динамика осадков (синим) и расходов (чёрным) на модельном водосборе при расчёте с начальными параметрами.

Антропогенное воздействие на растительность выражается в изменении объёма фитомассы на территории водосбора. Чем больше объём растительности, тем больше воды она может потребить. Кроме того, фитомасса задерживает влагу перед её поступлением на поверхность почвы. Для оценки влияния параметра ёмкости растительного покрова на расчёт динамики расхода на замыкающем створе были проведены расчёты при различных его значениях, показанные на рисунке 2.2. При отсутствии растительного покрова ($\text{max} = 0$ мм, график № 1 на рисунке 2.2) скачок расхода начинается через 5 ч 10 мин после начала ливня, динамика интенсивности которого показана на рисунке выше, пик расхода достигает максимального значения через 13 часов. При значении параметра, равного 30 мм (график №2 на рисунке 1.8), рост расходов начинается позже (через 8 ч 50 мин после начала ливня), пик расхода наступает на 10 минут позже и на $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$ ниже. На рисунке 1.9 показана зависимость величины пика паводка при различном параметре объёма воды, задерживаемой растительным покровом. В целом, на основе проведённых расчётов можно сделать вывод, что при сокращении растительности время между пиком интенсивности осадков и пиком расхода паводка сокращается при увеличении пика расходов.

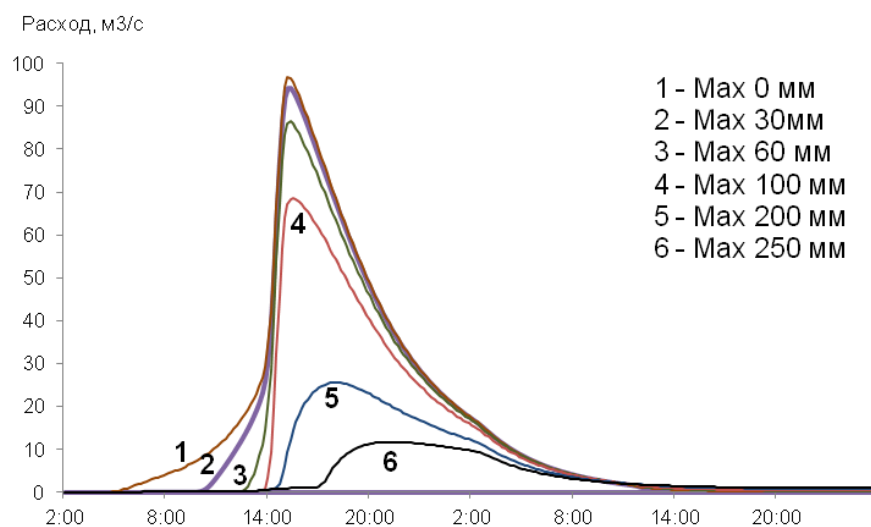


Рисунок 1.8. Динамика расходов на замыкающем створе водосбора при различных значениях параметра влагоёмкости растительного покрова.

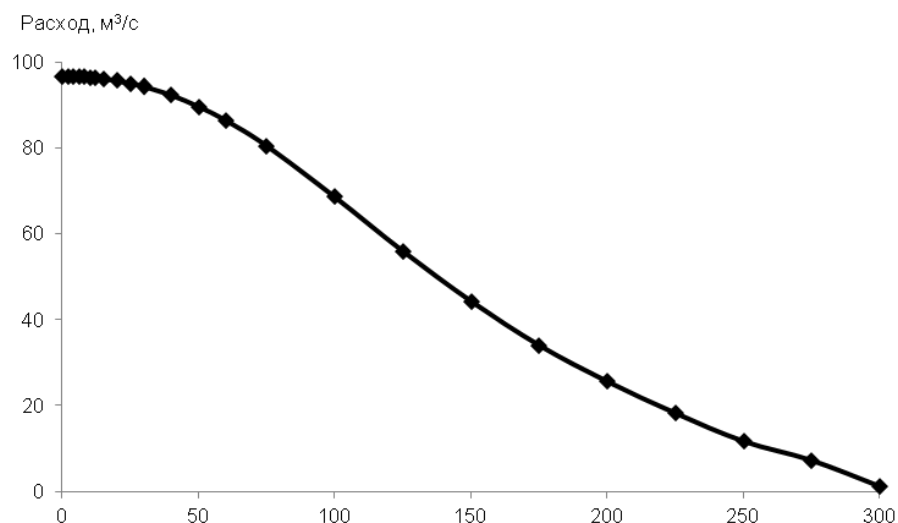


Рисунок 1.9. Зависимость величины пиков паводка от значения параметра
влагоёмкости растительного покрова

Сглаживание земной поверхности под воздействием человеческой деятельности – при распашке полей, росте урбанизированных территорий – выражается в снижении способности поверхности к задержанию воды. Были проведены расчёты динамики паводочных расходов при различных значениях параметра, представленные на рисунке 1.10. Зависимость величины пика паводка от значения параметра показана на рисунке 1.11. Влияние параметра поверхности на расчёт динамики расходов в замыкающем створе сходно влиянию параметра растительности – при его снижении паводок наступает раньше и его пик выше.

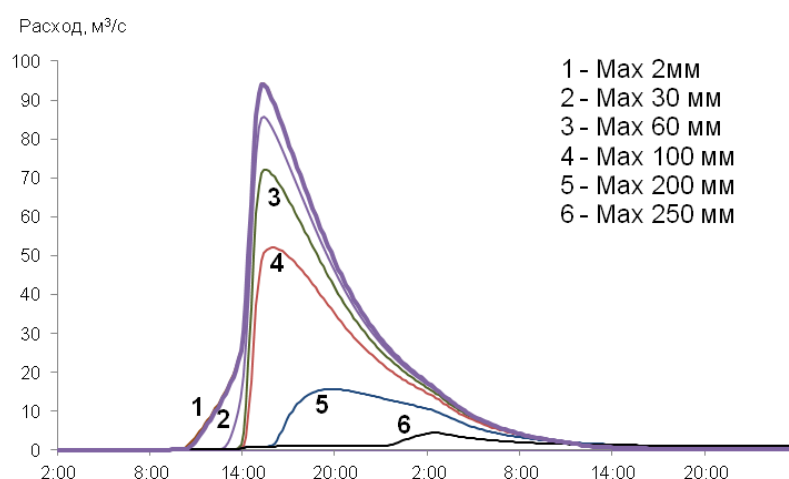


Рисунок 1.10. Динамика расходов на замыкающем створе водосбора при различных значениях параметра влагоёмкости земной поверхности.

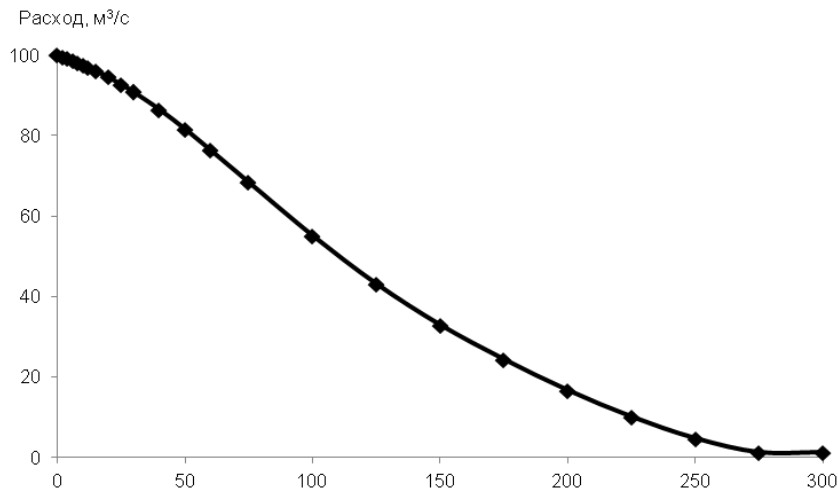


Рисунок 1.11. Зависимость пиков паводка от значения параметра влагоёмкости земной поверхности.

Для оценки антропогенного влияния на формирования паводка на водосборах крупнейших рек Северо-Западного Кавказа были рассчитаны площади типов природно-антропогенных ландшафтов, которые подвергаются изменениям растительного и почвенного покрова. К таким мы относим территории занятые транспортной инфраструктурой (автомобильными и железными дорогами с учётом буферной зоны в 20 м), застройкой населённых пунктов, пашней и различными садами Их распределение по водосборам региона представлено в таблице 1.5 и на рисунке 1.12. Кроме того, на основе [47] нами было посчитано распределение лесного покрова по водосборам, а также его динамика в 2000-2014 гг. Стоит отметить, что для расчёта площадей, занятых транспортной инфраструктурой, застройкой использовались данные сервиса Openstreetmap, для площадей пашни и различных садов проводилось визуальное дешифрирование материалов спутниковой съёмки Landsat 8.

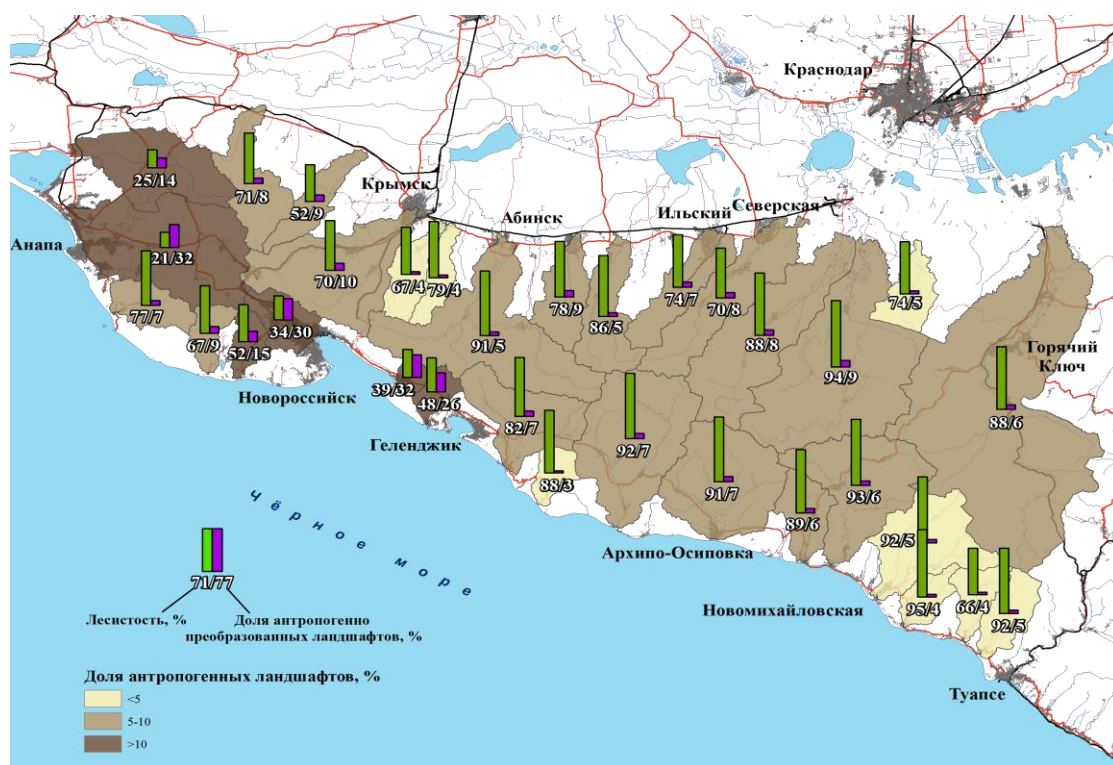


Рисунок 1.12. Соотношение лесопокрытой площади и антропогенно-преобразованных ландшафтов на Северо-Западном Кавказе.

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 1.5. Распределение антропогенных ландшафтов и динамика лесного покрова на крупнейших водосборах Северо-Западного Кавказа.

№	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)

1.4. Паводковая опасность водосборов рек Северо-Западного Кавказа

Крупнейшие наводнения в регионе рассматривались в табл. 1.4 (в разделе 1.2). Паводковая опасность на основе рядов наблюдений детально рассматривается в работе [35]. Мы предлагаем рассмотреть паводковую опасность на водосборах рек Северо-Западного Кавказа на основе физико-географических характеристик водосборов, но без учёта метеорологического фактора. Наше предложение обусловлено тем, что в настоящее время наблюдаются изменения или колебания климата, которые приводят к учащению опасных метеорологических явлений, поэтому целесообразно рассмотреть возможную гидрологическую реакцию конкретных водосборов на выпадение интенсивных осадков.

Крупнейшие населённые пункты региона (рисунок 1.13) 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 6-7 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 условиями:

- 1) осадки равномерны и одинаковы на всей территории водосборов, в таком случае их распределение не играет роли в реакции отдельных водосборов;
- 2) эффективные осадки составляли 80% от выпавших осадков на протяжении всего расчётного времени, при этом уравниваются способности водосборов удерживать выпадающие осадки;

- 3) осадки моментально формируют поверхностный сток;
- 4) скорости добегания воды принимались постоянными;
- 5) не учитывалось влияние на прохождение паводков существующих водохранилищ.

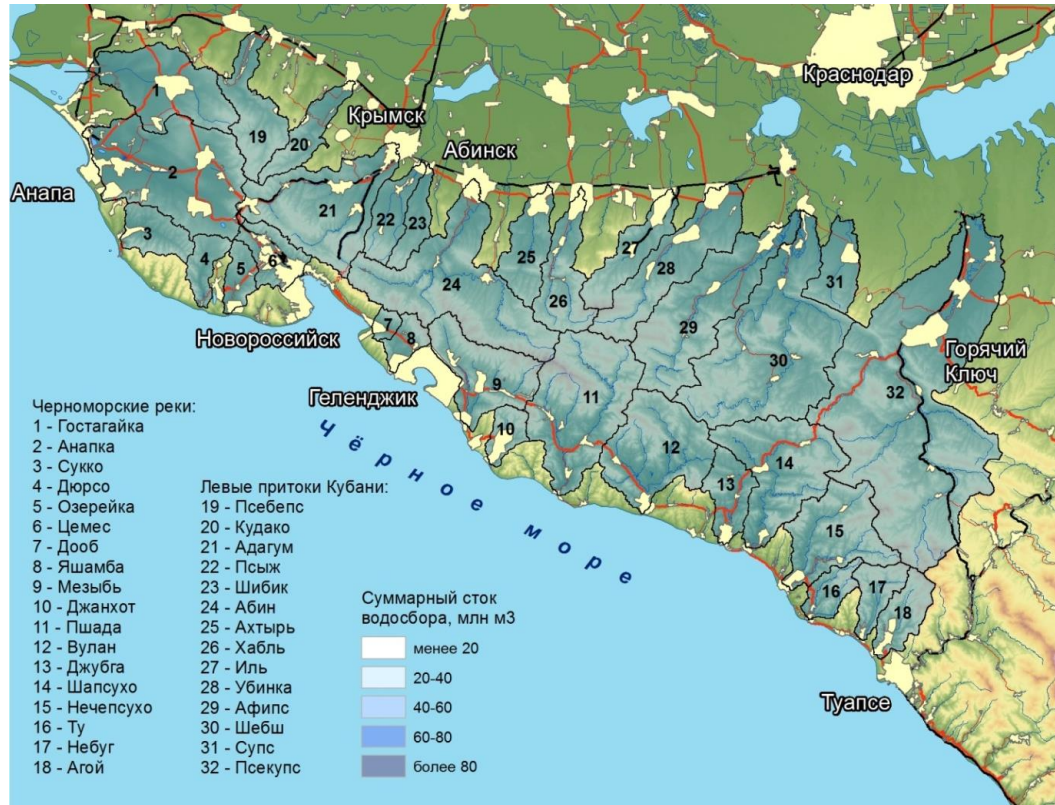


Рисунок 1.13. Объекты антропогенного воздействия на водосборах.

Для проведения расчётов использовалась цифровая модель местности на основе съёмки SRTM с разрешением 1 угловая секунда (на широтах Кавказа это около 30 м). Скорости добегания для каждой ячейки ЦММ рассчитывались по формуле [48, 49]:

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

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

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

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

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

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

$$\delta = 1/(1 + C_0 A_{03})$$

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.

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

A_{03} – коэффициент озёрности водосбора.

Таким образом, для расчёта скорости для каждой ячейки ЦММ региона использовались растры распределения n (характеризующий шероховатость поверхности), A_{03} (озёрность водосбора ячейки), i_{cp} (средневзвешенный уклон ячейки), A (площадь водосбора ячейки).

По скоростям добегания и цифровым моделям местности (ЦММ) были рассчитаны гистограммы распределения площадей на водосборе по времени добегания с них стока до замыкающего створа (рисунок 1.14). 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 1.15 и в таблице 1.6.

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.

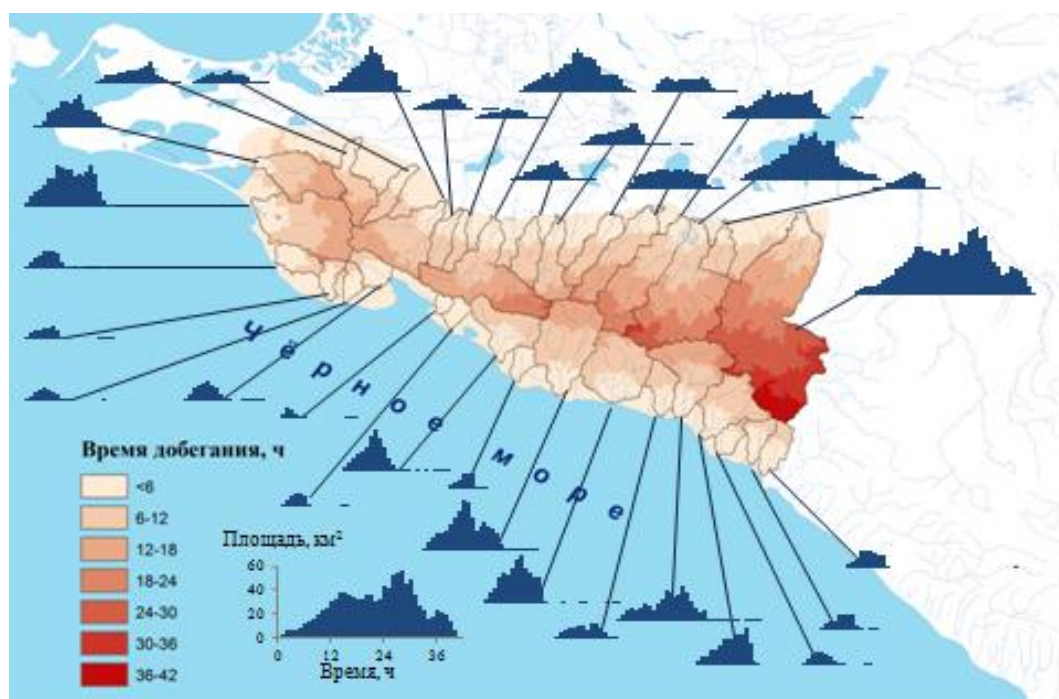


Рисунок 1.14. Распределение площадей на водосборах по времени добегания

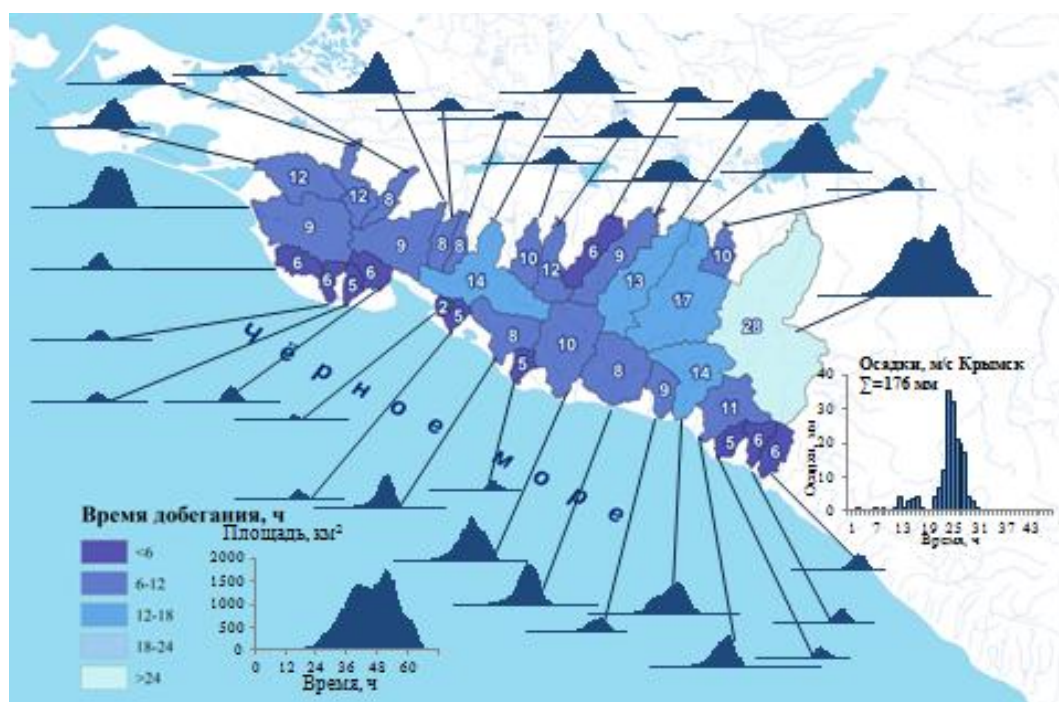


Рисунок 1.15. Рассчитанные гидрографы паводков.

Таблица 1.6. 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

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.

2. ФОРМИРОВАНИЕ И ПРОХОЖДЕНИЕ ПАВОДКА 6-7 ИЮЛЯ 2012 ГОДА НА РЕКЕ АДАГУМ

2.1. Исследования паводка 2012 г. в работах основных научных школ России

Паводок 6-7 июля 2012 года на Северо-Западном Кавказе 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 [50], ЮНЦ РАН [6], ИВП [3], МГУ [5] 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.

В соответствии с приказом руководителя Росгидромета №424 от 11.07.2012 г. ФГБУ «ГГИ», ФГБУ «Краснодарский ЦГМС», департамент Росгидромета по ЮФО и СКФО подготовили отчёт о катастрофическом паводке в бассейне р.Адагум 6-7 июля 2012 года и его причинах [50]. Исходными данными для этой работы послужили материалы наблюдений за гидрометеорологическими характеристиками на наблюдательной сети Росгидромета, различные картографические материалы, аэрокосмические снимки, а также результаты полевых гидрографических исследований специалистов Краснодарского ЦГМС, проведённые 7-24 июля 2012 г. В опубликованном отчёте даётся краткая характеристика бассейна р.Адагум, развитие синоптических условий, в том числе наблюденная динамика осадков; составленная на основе наблюдений и опроса населения динамика уровней воды на различных участках водосбора, интерпретация причин формирования обширной

зоны затопления. Также рассматривается роль Неберджаевского водохранилища: прилагается динамика наполнения и сброса воды из него 6-7 июля 2012 года. Главной причиной паводка авторы называют чрезвычайно высокие, не наблюдавшиеся никогда ранее здесь, осадки. В антропогенном факторе, усилившем опасность проходящего паводка авторы отчёта выделяют расположение железнодорожных и автомобильных насыпей и недостаточную пропускную способность проёмов соответствующих им мостов. Приводится гипотеза, что это привело к формированию временного водоёма, ограниченного насыпями, переполнение которого привело к резкому затоплению застроенной части Крымска. Обращается внимание также на застройку и замусоривание поймы. В отчёте приведены оценки максимального расхода в Крымске ($1500 \text{ м}^3/\text{с}$) и на основных притоках (Баканке – $1040 \text{ м}^3/\text{с}$ и Неберджае – $800 \text{ м}^3/\text{с}$) и объёма стока за паводок (40 млн. м^3 – 38% годового стока). Неберджаевское водохранилище рассматривается как причина некоторого снижения паводка примерно на $130 \text{ м}^3/\text{с}$.

В 2013 году Институт водных проблем выпустил препринт [3], в котором показал результаты своих работ, связанных с паводком 6-7 июля 2012 года в Крымске. В качестве материалов в препринте используются отчёт Росгидромета. В работе приводится реконструкция паводка (анализируется пространственная неоднородность выпавших осадков, описываются потери стока при прохождении катастрофических осадков, рассчитываются паводочный сток с водосбора и определяются величины расходов 1% и 0,1% обеспеченности), расчёт зон затопления в Крымске, характеристика русловых деформаций, оценка ущерба и рекомендации по снижению паводкоопасности в Крымском районе Краснодарского края. При характеристике пространственной неоднородности полей осадков приводятся картосхемы распределения осадков в прогнозном режиме модели COSMO ГМЦ РФ [51], а также распределение сумм осадков по модели WRF [52]. Представленные материалы показывают, что в режиме прогноза осадков эти модели не зафиксировали катастрофических осадков в регионе бедствия, в то время как на метеопостах Крымск и Новороссийск были отмечены часовые слои осадков 35 и 45 мм соответственно. При реконструкции паводка используются расчёты,

выполненные с помощью двух соединённых моделей – водосбора реки Адагум до железнодорожного моста перед Крымском и схематизированной городской гидрографической сети, – выполненных в программном комплексе SWMM. Верификация моделей авторами проводилась с использованием поперечных профилей с метками уровней высоких вод (УВВ), а также с графиком подъёма уровня на гидрологическом посту в Крымске до его затопления. Для расчёта зон затопления в Крымске использовался программный комплекс MIKE11, реализующий квази-двумерную неявную разностную схему решения уравнений Сен-Венана. Оценка русловых деформаций проводилась на основе результатов полевых исследований. В результате приведённых исследований предлагаются меры по защите Крымска от паводков:

- канализация русла реки Адагум;
- реконструкция мостов с целью увеличения мостовых проёмов, снижения количества опор;
- сооружение обводных паводочных каналов.

Стоит отметить, что рекомендации, предложенные в препринте ИВП легли в основу проектной документации преобразования русла реки Адагум, проводящееся с 2013 года.

Специалисты МГУ и НИИ Энергетических Сооружений провели ряд численных экспериментов и опубликовали их результаты в [5]. Расчёты на одномерной модели MIKE11 и на двумерной модели BOR показали, что затопление застроенной части Крымска было осуществлено при прохождении паводка с расходом более $1000 \text{ м}^3/\text{с}$; влияние Варнавинского водохранилища на затопление в Крымске не прослеживается; возможное засорение мостовых проёмов влияет на формирование зоны затопления на 2 км вверх по течению и на 1,5 км вниз. В работе [53] кроме того показано, что при моделировании затопления городской постройки с высокой детальностью цифровой модели местности и соответственно малым расчётным шагом по времени в распределении скоростей и уровней зоны затопления можно выделить участки большей и меньшей опасности, обусловленные расположением построек и сооружений.

Кроме означенных выше, опубликованы результаты экспедиционных исследований ЮНЦ РАН в зоне паводка 6-7 июля 2012 года, непосредственное участие в которых принимал автор диссертационной работы.

2.2. Результаты экспедиций ЮНЦ РАН в зоне паводка 6-7 июля 2012 года

Сотрудниками ЮНЦ РАН были проведены 2 экспедиции в зону катастрофического паводка 6-7 июля 2012 года: 15-16 июля и 28 июля–4 августа 2012 г. Результаты исследований позволили на основе показаний очевидцев и официальной информации составить хронологию развития гидрологической ситуации на реках водосборов Адагума и Абина, представленную в таблице 2.1.

Таблица 1.6. Хронология развития гидрологической ситуации на реках водосборов Адагума и Абина [6]

Дата	Время	Происходившие явления и события	Состояние уровня рек	Уровень рек, см над 0 поста				
				Адагум	Абин	Адегой	Богого	Неберджай
06.07	04:00	Образовался циклон над восточной частью Азовского моря.	Стабильное					
	04:00-14:00	Циклон переместился в сторону юго-запада Краснодарского края	Стабильное	299	354			
	14:00-16:00	Циклон смещался в сторону северо-западной части Краснодарского края	Стабильное	302				
	16:40-18:00	Пик наводнения (до 7 м) в Голубой бухте (г. Геленджик)	Макс.					
	17:00-20:00	Объединение плотного облачного массива с облачностью в районе Новороссийска.	Рост	302	454			
	20:00	В хуторе Верхнеадагум нет признаков наводнения	Неб. рост	299	689			
	21:13	Затоплен гидрологический пост в ст. Шапсугская , подъем уровня воды в реках Неберджай и Богого.	Рост					
	21:45	В ст. Нижнебаканская начался первый подъем воды. На реке Богого начало скачка после 23:00	Рост					
	22:00-22:30	Слабое увеличение уровня в Адагуме	Неб. рост					
	23:00	Уровень воды в реке Адагум у Крымска слабо увеличился	Неб. рост	323	689	484		
07.07	23:30	Начало второй волны паводка в Нижнебаканская						
	22:00-03:00	Выпадают осадки интенсивностью до 35-45 мм/час	Рост	323				
	00:00	Резкая смена направления ветра на южное				384		
	00:00-00:30	Подтоплен гидрометеорологический пост в Крымске , прорвалась аккумулярующая часть стока в левобережную пойму р Адагум	Быстр. рост	380			234	
		Южный ветер сменился восточным, что принесло влажный воздух в горы на побережье и это могло вызвать еще большие объемы осадков		389				
	00:30-01:00	В ст. Неберджаевская начался резкий подъем воды в домах.						
	01:00	Уровень реки Адагум в районе Крымска не достиг ОЯ		404				416

Дата	Время	Происходившие явления и события	Состояние уровня рек	Уровень рек, см над 0 поста				
				Адагум	Абин	Адегой	Богого	Неберджай
	01:30	В Крымске выпало 124 мм осадков в течении 5 часов	Быстр. рост	520				
	01:00-02:00	Резкий скачок уровня в р. Адагум (г. Крымск) на 355 см						
	02:00	Затоплен аэродром и авиагородок в Крымске , северная часть города	Быстр. рост	759			256	
	02:00-05:00	Максимум паводка в Нижнебаканской						
	03:00-04:00	Уровень воды в Крымске по данным ГМС поднялся до 9-10м	Пик					
	03:00-05:00	Пик наводнения		955		650		
	03:00-06:00	Изменение направления ветра на восточное	Пик		810			
	05:30-08:00	Уровень рек, достигнув максимальных пиков, стал понижаться	Снижение					
	05:45	Неберджаевское водохранилище снизило поступление паводочных вод в р. Адагум на 130 м³/с. Автоматический сброс воды из вдхр. Уровень составил 182 м.	Пик					
	07:00	Начало спада уровня воды в реке Адагум	Снижение		669			
	10:00	Уровень Неберджаевского вдхр достиг отметки 183.1 м и стал снижаться	Снижение					
	14:00	Уровень Неберджаевского вдхр достиг отметки 182.9 м	Снижение					

В бассейне р. Адагум в июле и августе 2012 года были проведены две экспедиции ЮНЦ РАН совместно с ИАЗ ЮНЦ РАН (рисунок 2.1). Были собраны свидетельства очевидцев, зафиксированы максимальные уровни основных рек, ширина затопления, составлена хронология протекания паводка [6], [54]. Кроме того, были построены поперечные профили долины в определённых точках водотоков (рисунок 1.13). С помощью этих измерений были рассчитаны максимальные расходы в этих точках, которые были сопоставлены с данными отчёта Росгидромета. Также по профилям были построены графики зависимости уровня от расходов.

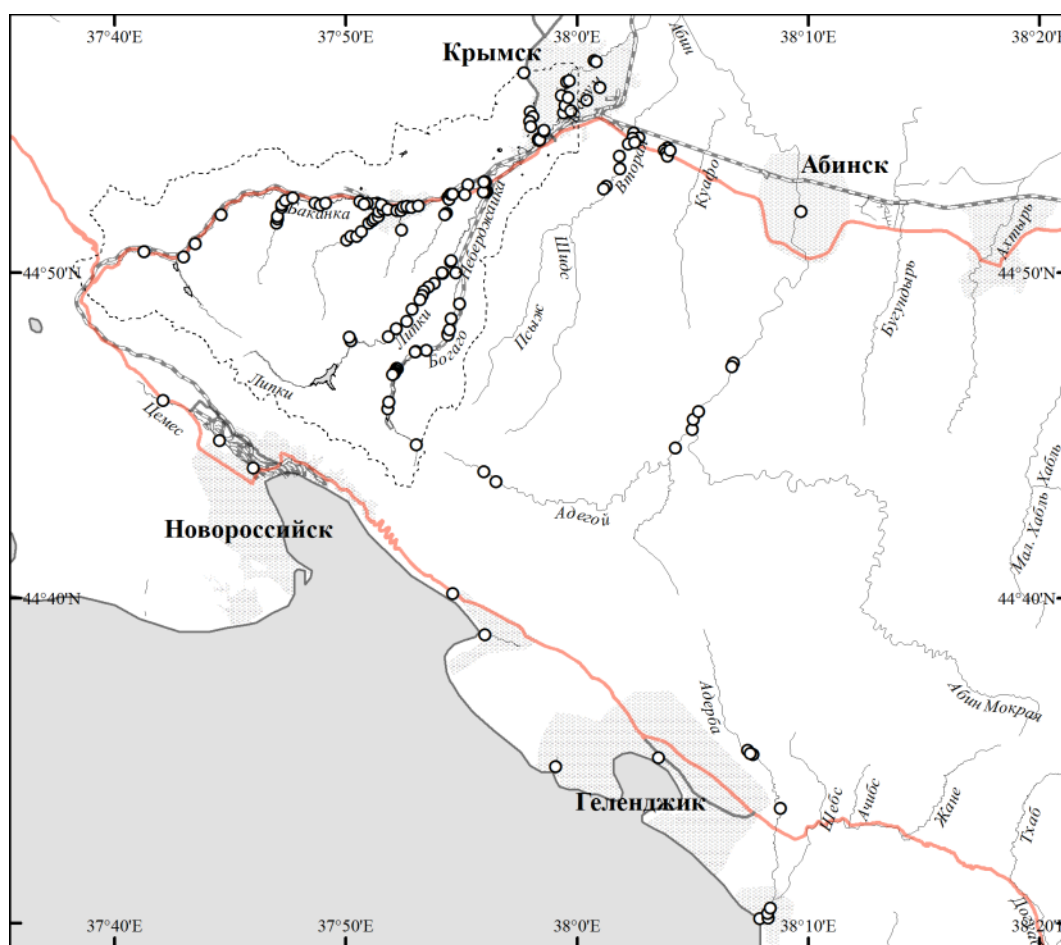


Рисунок 2.1. Точки проведения работ экспедиций в июле-августе 2012 года.

В нескольких характерных точках проводились нивелирные работы для построения поперечных профилей затопленных долин. Результаты этих измерений представлены в таблице 2.2. Во время наводнения практически одновременное слияние максимальных потоков рек Баканка и Неберджаев обусловило сильный скачок уровня затопления в точках А1 и А2 и в Крымске (рисунок 2.2). Столь

высокий уровень, приближающийся к 10 м от межени, привёл к выходу потока из поймы на надпойменную террасу и затоплению большей части Крымска.

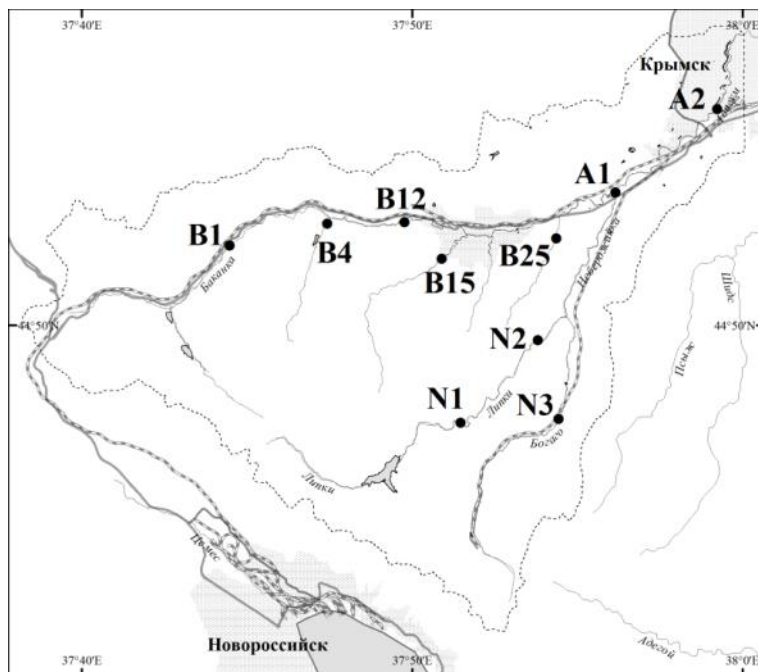


Рисунок 2.2. Расположение точек измерения поперечных профилей речных долин во время экспедиции в июле 2012 года.

Таблица 2.2. Следы максимума паводка на точках измерений.

№	Река	Максимальные отметки паводка, м	Ширина затопленной долины, м
B1	Баканка	3,0	79
B4	Чубукова	2,5	50
B12	Баканка	2,6	160
B15	Прямая	2,3	105
B25	Глубокая	2,3	130
N1	Липки	2,2	120
N2	Липки	3,1	130
N3	Богого	1,9	145
A1	Адагум	7	400
A2	Адагум	8	1200

Далее были рассчитаны максимальные расходы по формулам [55]:

$$Q = V * S,$$

$$V = C\sqrt{R * I},$$

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}},$$

где Q – максимальный расход, м³/с; V – средняя скорость потока, м/с; S – площадь сечения потока, м²; C – коэффициент Шези (шероховатости); I – средний уклон в долях единицы; R – гидравлический радиус, м.; n – коэффициент шероховатости по шкале Срибного.

В таблице 2.3 показаны максимальные расходы, рассчитанные для измеренных точек. Удельный расход определялся как отношение максимального расхода к водосборной площади.

Таблица 2.3. Максимальные расходы, площади и удельные расходы водосборов точек измерений

№	Река	Максимальный расход, м³/с рассчитан по экспедиц. данным	Максимальный расход, м³/с по оценке Росгидромета	Площадь водосбора, км²	Удельный макс. расход, мм/мин	Отношение удельного расхода к общему по водосбору
B1	Баканка	39	182	59,0	0,04	0,1
B4	Чубукова	199	-	9,3	1,28	4,6
B12	Баканка	289	290	78,8 (10,5)	0,22 (0,29)	1,0
B15	Прямая	164	560	27,2	0,36	1,3
B25	Глубокая	187	206	9,2	1,22	4,4
N1	Липки	140	-	10,3	0,82	2,9
N2	Липки	361	-	21,9(11,6)	0,99(1,14)	4,1
N3	Богого	185	280	24,2	0,46	1,6
A1	Адагум	1631	1500	257,6(96,3)	0,38(0,28)	1
A2	Адагум	3155	1500	285,1(27,5)	0,66(3,33)	1

Приведённые расчёты показывают, что наибольший удельный расход (то есть сток воды с 1 км², приводящий к максимальному расходу в замыкающем створе) пришёлся на бассейны рек Глубокая Щель и Чубуковая Щель – 1,22 и 1,28 мм/мин соответственно. Это говорит о том, что здесь выпали наиболее интенсивные осадки.

Сравнение результатов расчётов максимальных расходов по нашим экспедиционным данным с оценкой максимальных расходов Росгидромета показывает, что к истоку Адагума (точка слияния Баканки и Неберджаевской) сформировался достаточно сильный паводок, расход которого превысил 1500 м³/с. Однако максимальные расходы по крупнейшим притокам расходятся. Наши экспедиционные данные показывают, что на р. Баканка до впадения Чубуковой Щели (у х. Горный) максимальный расход наблюдался значительно меньших масштабов, чем по оценке Росгидромета – 39 против 182 м³/с. Основная волна паводка на Баканке выше ст. Неберджаевской была сформирована притоком вод из Чубуковой Щели – 199 м³/с. О чрезвычайно сильном паводке здесь свидетельствуют и повреждения дамбы пруда выше х. Жемчужный, зафиксированные во время экспедиции (рисунок 2.3), в то же время, по информации Росгидромета, разрушения на Атакойских прудах, расположенных в межхребетной котловине выше х. Горный, не обнаружены. Кроме того, максимальный расход на р. Прямая Щель, оценённый специалистами Росгидромета в 560 м³/с, по результатам наших исследований, составил 164 м³/с. Известно [50], что максимальный расход из Неберджаевского водохранилища составил 80 м³/с после 05:45 7 июля, фактически позже прохождения максимума паводков на водосборе. Специалисты Росгидромета не давали оценку максимальному расходу на Липках, наши же исследования позволяют говорить о формировании паводка с максимальным расходом 361 м³/с у границы ст. Неберджаевской. Расход на р. Богоевский рассчитывался нами для участка у пересечения реки автомобильной дорогой и составил 185 м³/с. По оценке Росгидромета, на р. Богоевский в ст. Неберджаевской расход воды достигал 280 м³/с. В целом, наши расчёты хорошо согласуются с оценкой специалистов Росгидромета в Глубокой Щели и ниже слияния Баканки и Неберджаевской. Для Глубокой Щели это 187 м³/с, по нашим расчётам, и 206 м³/с, по оценке Росгидромета. По следам паводка

непосредственно в Крымске (выше автомобильного моста в створе ул. Новороссийской) рассчитанный максимальный расход оказался чрезвычайно высоким – 3155 м³/с (почти вдвое большим, чем на истоке Адагума). Это свидетельствует о том, что уровень воды здесь был обусловлен подпором воды, а не величиной расхода.



Рисунок 2.3. Повреждения дамбы пруда выше х. Жемчужный.

Важную информацию для оценки мощности и разрушительной силы потока несут повреждения деревьев: отсутствие или наличие кроны и корней, угол и направление завала. Размер повреждений также зависит от видового состава зарослей (рисунок 2.4). Примерное количество заломленных деревьев (дуб, граб, бук, клен, ясень, ива) может исчисляться тысячами, а вырванных с корнями старых деревьев длиной до 8 м и диаметром ствола 0,4–0,8 м – сотнями. В устьях рек, на излучинах, стыке притоков, а также перед мостами корневища отдельных деревьев имели диаметр до 2–3 метров. Общая протяженность полосы растительности, заломленной и искорёженной при затоплении речных систем Адагума, Абина и Шибика, достигает порядка 120 км. Помимо ущерба древесной растительности развитие наводнения спровоцировало закономерный ряд сопутствующих природных воздействий.

В период проведения экспедиции по оценке последствий паводка, произошедшего в июле 2012 года, были проведены комплексные геоботанические и

ландшафтные исследования экосистем бассейнов малых рек низкогорной и равнинной части юго-запада Краснодарского края (Абинский и Крымский районы). Проводилась оценка состояния ландшафтов, описывалось современное состояние растительных сообществ, в них с помощью стандартных геоботанических методик [56], [57] определялись: площадь проективного покрытия, высота травостоя, доминирующие виды, биомасса наземной части растений.

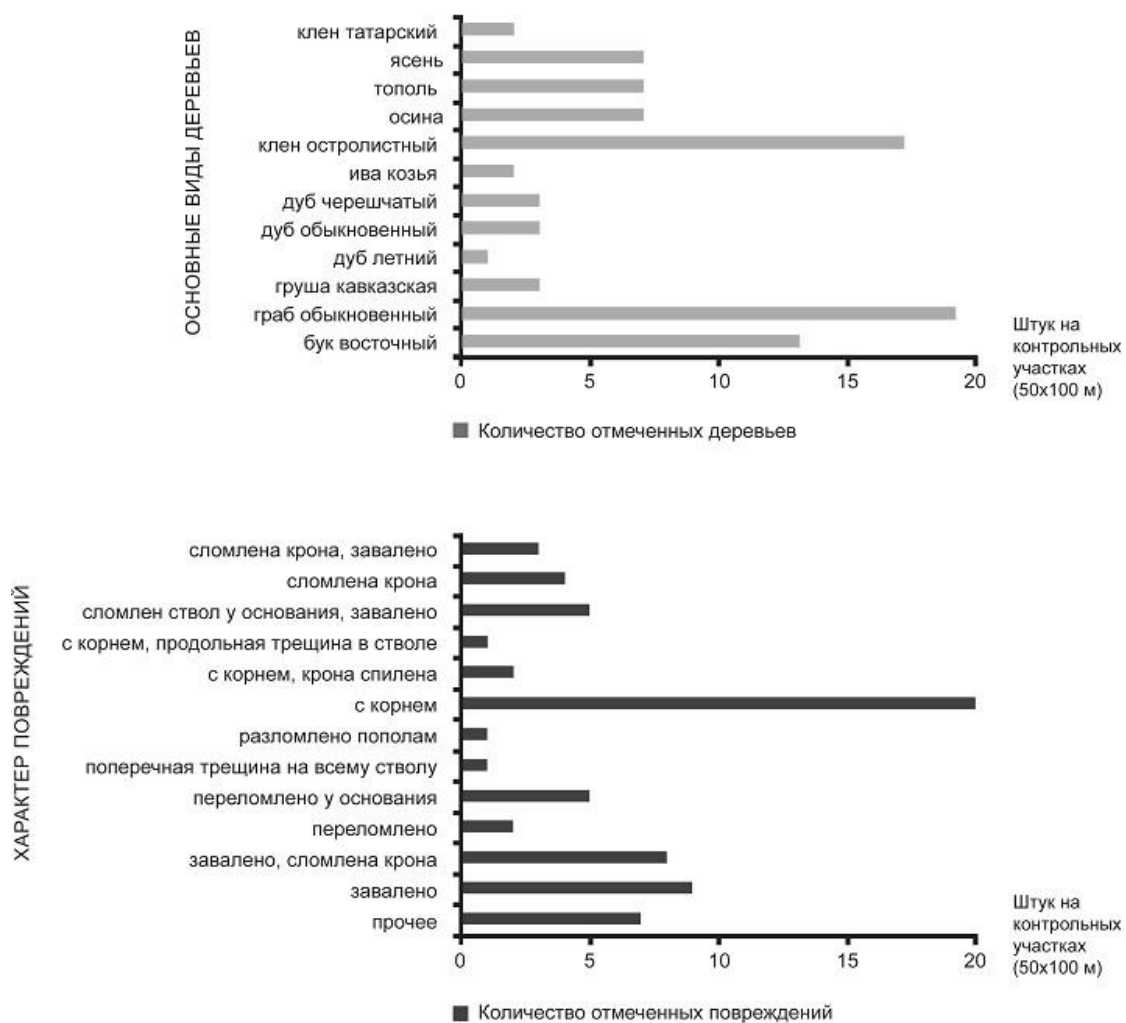


Рисунок 2.4. Характер повреждений древесной растительности после паводка в Абинском и Крымском районах [54].

Район исследований расположен в равнинном и низкогорном поясах и характеризуется большими площадями агрофитоценозов, занятыми озимой пшеницей, подсолнечником, бахчевыми, а также виноградниками и плодово-ягодными насаждениями.

Лесной тип растительности, занимающий наибольшую площадь изучаемой территории, представлен преимущественно широколиственными лесами из бука восточного (*Fagus orientalis*), двух видов дуба (*Quercus petraea*, *Q. hartwissiana*) и граба обыкновенного (*Carpinus betulus*). На отдельных элементах рельефа – в труднодоступных местах, на каменистых склонах и осыпях – фрагментарно встречаются насаждения с господством сосны крючковой (*Pinus hamata*). В числе сопутствующих древесных видов наиболее обычными являются липа кавказская (*Tilia caucasica*), клен остролистный (*Acer platanoides*), ясень высокий (*Fraxinus excelsior*), рябина глоговина (*Sorbus torminalis*), на более увлажненных ровных участках – осина (*Populus tremula*), ольха клейкая (*Alnus glutinosa*), ива козья (*Salix carpea*).

В образовании лесных фитоценозов, особенно на опушках и по террасам, принимают участие плодовые деревья: груша кавказская (*Pyrus caucasica*), яблоня восточная (*Malus orientalis*), вишня птичья, или черешня (*Cerasus avium*), боярышник (*Crataegus*) и др.

Большая часть рек Крымского и Абинского районов типично горные, с довольно высокой скоростью течения. Поэтому по их берегам и в долинах не формируется гигрофитная растительность. Порой встречаются своеобразные растительные ассоциации на речных каменистых и песчано-галечниковых наносах. По долинам рек доминируют тростник (*Phragmites australis*), широколистный рогоз (*Typha latifolia*), озерный камыш (*Scirpus lacustris*) [57], [58].

Эти виды, а также представители травяного яруса испытали на себе механическое воздействие потока, большие площади были покрыты слоем потоком наносов, который в дальнейшем может стать субстратом для развития рудеральной и карантинной растительности, в т.ч. амброзии полыннолистной (*Ambrosia artemisifolia* L.) (рисунок 2.5).

В условиях многолетней гидрометеорологической ситуации и рассеченного рельефа зрелые лесные массивы на Северо-Западном Кавказе выполняют важную водо- и почвозащитную функции [59]. Однако экстремальные подъемы уровня воды в верховьях рек приводят к многочисленным завалам леса в долинах рек и

образованию буреломов, представляющих собой поваленные, вывернутые с корнем деревья, а также примешанные растительные остатки, мусор и т.п.



Рисунок 2.5. Развитие рудеральной и карантинной растительности на паводковых наносах.

Буреломные деревья – это один из показателей мощности водного потока при подъеме уровня воды и индикатор состояния лесной экосистемы после стихийного бедствия; он основывается на информации об объемах и качестве древесины [60].

Эти данные должны быть точными, а потому, основываться на прямых измерениях буреломов. Многие существующие методы оценки основываются на таксационных данных и определяются в процентном отношении от растущего леса. В ходе проведения работ использовался стандартный метод линейных пересечений, позволяющий оценивать состояние буреломной растительности непосредственно в лесу. Суть метода заключается в том, что на площадке, где находятся поваленные деревья, разбивают несколько линий отбора. Затем учитывают все древесные материалы, которые пересекли эти линии. Пересеченные деревья рассматривают как выборку, по которой, с определенной вероятностью, можно дать оценку всему бурелому. Таким образом, можно оценить количество, объем и размерно-качественные характеристики поваленных деревьев. Например, диаметр, длину, породу, количество деловой и дровяной древесины и т.д. [60].

В полевых условиях участки разбивали с использованием мерной ленты, а также компаса (рис. 2.18). Учёт деревьев проводился по линиям отбора. Линии

отбора начинались на одной стороне и заканчивались на противоположной стороне участка, пересекая весь участок по его ширине. Позже производился подсчет поваленных деревьев, сведения заносились в журнал и пересчитывались на 1 га по всей протяженности реки.

Важно отметить, что в верховьях рек Баканка, Неберджай, Богого на высотах 230–270 м и более часто встречаются деревья, вырванные с корнем, сложенные, а также с различными сильными повреждениями кроны. Это обусловлено большим уклоном рельефа, морфологическими свойствами аллювиальных отложений, силой и скоростью паводкового потока.

Среди видов отмечено большое количество граба обыкновенного (*Carpinus betulus*) и бука восточного (*Fagus orientalis*) (рисунок 2.6). Эти виды деревьев, обладая мощными поверхностными корнями и не имея глубокой стержневой корневой системы, под действием потока оказались подвержены механическим повреждениям.

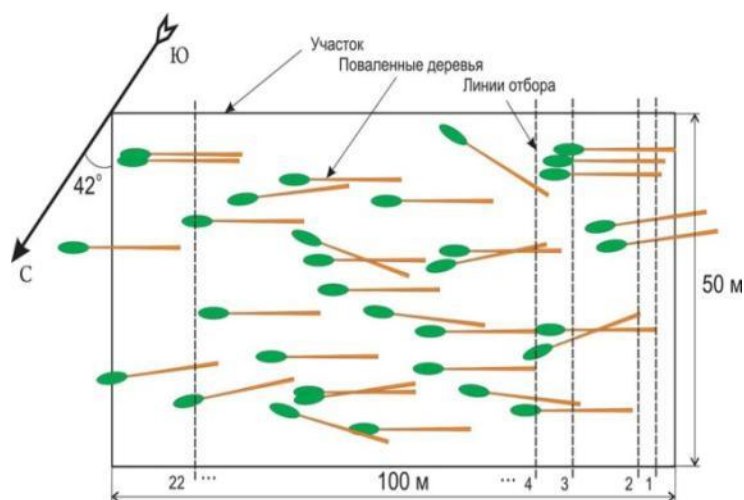


Рисунок 2.6. Разбивка участка для определения количества поваленных деревьев и буреломной древесины.

Таким образом, буковые и грабовые формации побережий горных рек оказались весьма уязвимыми к воздействию паводковых потоков и испытали на себе результат сочетания ряда факторов: уклона местности, скорости потока, характера корневой системы растений, состава и свойств почв и почвообразующих пород.

2.3. Выбор и настройка гидрологических моделей для реконструкции паводка

Собранные в экспедициях, а также опубликованные другими организациями материалы в сочетании с наблюдениями автоматической системы мониторинга паводковой ситуации Краснодарского края (АС МПСКК), поддерживаемой компанией “Emercit” [61], позволяют адаптировать модельные инструменты для создания и развития прототипов системы мониторинга и прогнозирования быстроразвивающихся паводков на реках Северо-Западного Кавказа. Автором диссертационного исследования были осуществлены выбор, настройка и калибровка гидрологических моделей для реконструкции паводка 6-7 июля 2012 года на водосборе р. Адагум, а также анализа возможных мер по снижению паводковой опасности.

Для восстановления динамики гидрологических параметров во время паводка июля 2012 года и для имитации других подобных явлений, для исследования их последствий в зависимости от масштабов происшествий необходимо использовать математические гидрологические модели. На современном этапе существует и развивается большое количество средств моделирующих гидрологическую обстановку. Развитие многих из них достигло того, что они объединяют множество инструментов в семейства продуктов. Многие из них стали либо самостоятельными коммерческими продуктами, либо вошли в их состав. Необходимо определить используемый программный продукт или ряд продуктов. Для этого были поставлены следующие критерии отбора:

- возможность имитации динамики расходов в различных частях водотоков
- возможность имитации затопления
- оперирование физически обусловленными параметрами бассейнов и водотоков
- не слишком большое количество параметров модели
- простота “входа” в моделирование
- вариативность

- адекватные требования ко входным данным
- адекватное время моделирования
- свободное распространение
- низкие системные требования (на уровне ПК)
- наличие удобных обучающих материалов

Охарактеризуем более подробно каждый критерий.

Основным термином, характеризующим паводковую ситуацию, является расход воды в водотоке. Большие расходы либо формируют высокие уровни воды при определённой средней скорости потока, либо формируют повышенные скорости потока при незначительном росте уровня. Таким образом, более высокие расходы означают более высокую опасность паводка. В связи с этим моделирующее средство (математическая модель, комплекс моделей или дугой моделирующий продукт) для имитации паводковой ситуации должно иметь возможность рассчитывать динамику расходов в водотоках бассейна.

Затопление, его площадь, глубина и время существования, является основным критерием паводковой опасности. Высокие уровни воды приводят к выходу водного потока на пойму и на надпойменные террасы и повреждению имущества, расположенного на них. Низкие уровни воды на пойме приводят к повреждению имущества, но могут не нести фатальный характер, тогда как высокие уровни воды на пойме могут приводить имущество в полную негодность. Поэтому важна не только площадь затопления, но и глубина, и продолжительность. Кроме перечисленных характеристик затопления для сохранения жизней людей большое значение имеет скорость водного потока и время события. Внезапное ночное затопление, с потоками высокой скорости приведут к большим жертвам среди населения, нежели дневное подтопление. В связи с вышеперечисленным важным качеством моделирующего средства является имитация затопления, его площади, глубины, продолжительности, времени наступления и скорости водных потоков в нём.

Параметры модели, определяющие расчётные результаты должны быть физически обусловленными, чтобы их варьирование описывало правдоподобные

свойства бассейнов и водотоков. В противном случае возможно получение одинаковых результатов моделирования при различных наборах параметров. Тогда будет стоять проблема выбора набора параметров из двух одинаковых по эффективности, а также моделирование будет способно имитировать паводки только по калибровочным и тестовым данным. Современное развитие гидрологии, пожалуй, позволяет свести параметры процессов, формирующих поверхностный сток, в виде математических закономерностей (проще говоря, формализовать процессы). Наименее изучены природные процессы, происходящие под земной поверхностью, однако физические свойства возможных слагаемых горных пород и почв известны и могут быть подобраны во время калибровки модели.

Большое количество параметров модели сильно усложняет её понимание, увеличивает продолжительность расчётов. Вместе с тем, оно не гарантирует адекватности результатов наблюдениям. Несколько параметров, характеризующих основные природные процессы формирования поверхностного стока, дают результаты приемлемой точности по сравнению с наблюдениями. Среди них впитывание воды в почву, подземный сток, трансформация выпадающих на поверхность осадков в поверхностный сток (формирование слоя стока) и скорость стока в водотоках.

Моделирующий продукт подразумевает инструмент, который упрощает для пользователя расчёты гидрологической ситуации при различных условиях. В случае, когда для использования модели необходимо наличие большого количества сложных навыков, освоение работы программы увеличено по времени и может только усложнять моделирование, но не гарантирует хороших результатов.

В гидрологии существуют различные подходы к формализации природных процессов, формирующих поверхностный сток. При этом они подразумевают использование различных параметров, настройка которых требует различной информации. Способность продукта использовать различные подходы к имитации природных процессов является важным достоинством продукта.

Для настройки модели и проверки её работы требуются входные данные. Среди данных наблюдений имеются: осадки на метеостанциях Крымск и

Новороссийск, ход уровней в местах установки АГК АС МПСКК (автоматической системы мониторинга паводковой ситуации Краснодарского края), максимальные уровни воды в различных частях бассейна р.Адагум. Моделирующий инструмент должен иметь возможность использовать имеющиеся данные наблюдений для настройки и калибровки модели.

Площадь бассейна р.Адагум около 300 км², совокупная площадь бассейнов подобных рек региона составляет около 10 000 км². Таким образом, время расчётов для всех рек региона можно рассчитывать как время расчёта для бассейна р.Адагум увеличенное в 30 раз. Моделирующий инструмент должен выбираться с учётом этого.

Коммерческие продукты для моделирования природных процессов имеют высокую стоимость и, как правило, их дистрибьюторы приукрашивают возможности продукта. Открытые продукты, в свою очередь, имеют научную направленность, пользователи могут её изменять под себя и свой объект моделирования. Нестабильная внешнеполитическая обстановка делает обязательной полную автономность продукта от зарубежных разработчиков. В связи с этим предпочтение должно отдаваться свободно распространяемым и автономным моделирующим инструментам.

Для быстрого освоения и возможности внедрения на различных технических ресурсах необходимо чтобы системные требования модели были не слишком большими. Это повышает производительность и универсальность моделей для внедрения.

Освоение моделирующего инструмента не должно требовать большого времени. Его элементы и особенности, параметры и их гидрологический смысл должны быть в доступной форме.

Для имитационного моделирования по вышеперечисленным критериям были отобраны моделирующие комплексы HEC-HMS и HEC-RAS [62], разработанные американским корпусом военных инженеров. Их достоинством является сочетание таких качеств как большой опыт применения в мире, свободное распространение и

автономность, возможность использования разных подходов к моделированию процессов формирования поверхностного стока.

HEC-HMS – программный продукт для моделирования гидрологических процессов в дендрических (т.е. разветвлённых) речных бассейнах [62]. Содержит множество гидрологических функций, среди которых инфильтрация в почву, построение гидрографа, моделирование стока. Также содержит функции для моделирования продолжительных процессов – испарения, снеготаяния, расчёт влагосодержания в почвах. Дополнительные средства анализа рассчитывают анализ глубины-площади, прогнозирование стока, эрозию, транспорт наносов, качество воды. Программа интегрирует базы данных, утилиты для входящих данных, расчётное ядро и средства представления результатов. Продукт имеет собственный графический интерфейс, облегчающий работу, настройку. Кроме того, для подготовки входящих данных с помощью ГИС (создание модели речного бассейна) разработано дополнение HEC-GeoHMS для ArcGIS. Продукт может использоваться для изучения доступности воды, городского дренажа, прогноза стока, будущего влияния урбанизации, расчета сбросов водохранилища, уменьшения последствий от наводнений, регулирования затоплений при наводнениях и пр. Отличительной особенностью модели является возможность выбирать способы моделирования отдельных процессов – осадков, процессов инфильтрации, бокового стока, базового стока, поверхностного стока.

Моделирующий комплекс HEC-HMS предназначен для расчётов динамики расходов и уровней в некоторых точках. Процесс моделирования представляет собой преобразование хода осадков на бассейне в ход расходов и уровней в узлах гидрологического графа водосбора. В его рамках используется модель бассейна, метеорологическая модель и множество дополнительных данных.

Бассейновая модель представляет собой граф, состоящий из элементарных однородных бассейнов, соединённых между собой водотоками (рис. 2.7). Бассейны обладают определёнными параметрами, характеризующими преобразование выпадающих осадков в поверхностный сток. Элементарные однородные бассейны ограничиваются замыкающими створами, которые соединяются между собой в

упрощённую гидрографическую сеть. В узлах этой сети (створах бассейнов и соединениях) рассчитывается динамика расходов. Используя кривые уровень-расход, расходы могут пересчитываться в динамику уровней.

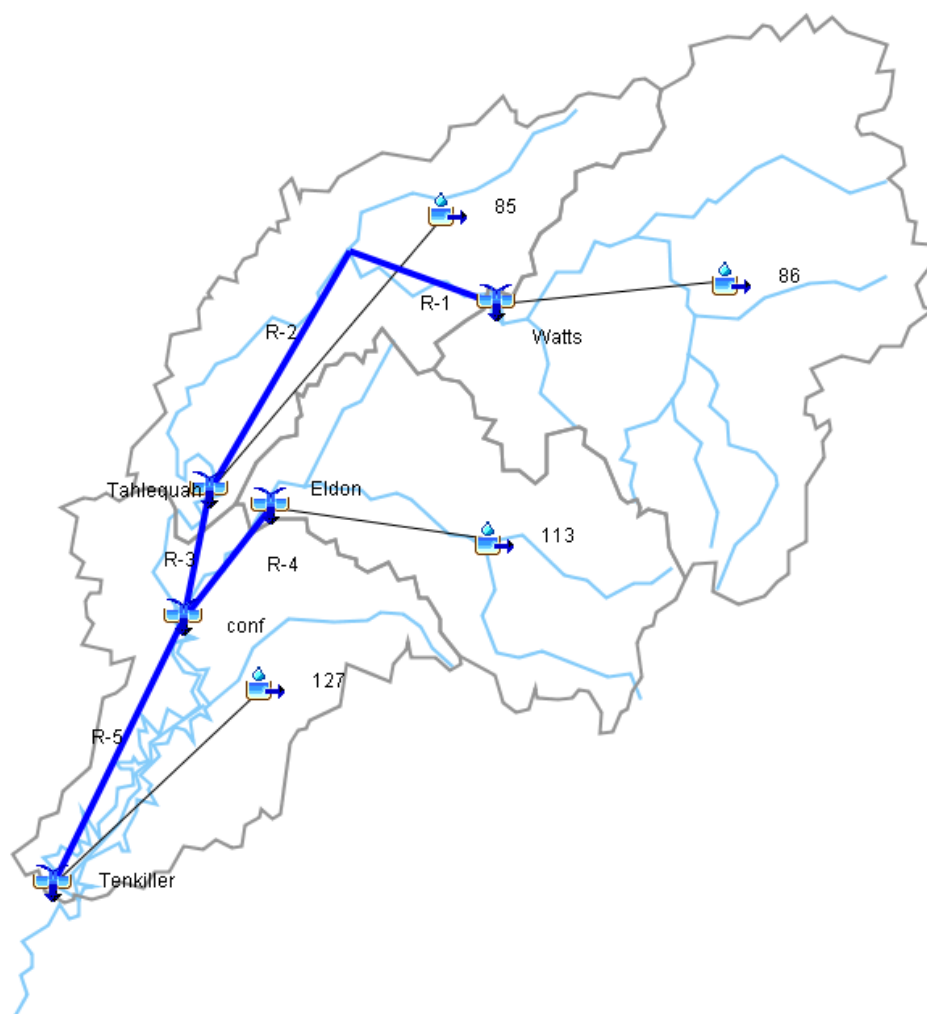


Рисунок 2.7. Пример графа бассейновой модели в HEC-HMS

Метеорологическая модель представляет собой способ задания метеорологических условий на элементарных водосборах. Осадки могут задаваться в виде набора растров, либо динамики осадков для каждого водосбора отдельно.

Взаимодействие метеорологической модели с моделью речного бассейна формирует динамику расходов и уровней в узлах речного бассейна.

HEC-RAS (River Analysis System) – одномерная или двумерная гидрологическая модель постоянного переменного стока, расчёта транспорта наносов, моделирования температуры воды [63]. Модель состоит из частей: данные о водосборе, данные о стоке, симуляция и результаты. Двумерное моделирование,

основанное на использовании ЦМР, позволяет учесть характер геоморфологии, параметры шероховатости поверхностей русел, пойм, надпойменных террас (рисунок 2.8). Расчёт проводится по нерегулярной сетке ячеек, грани которых могут представлять информацию о мостовых переходах, дамбах, шлюзах и прочее. Для каждой ячейки сетки рассчитывается динамика уровня водной поверхности, на основе которой рассчитываются глубины, скорости течений.

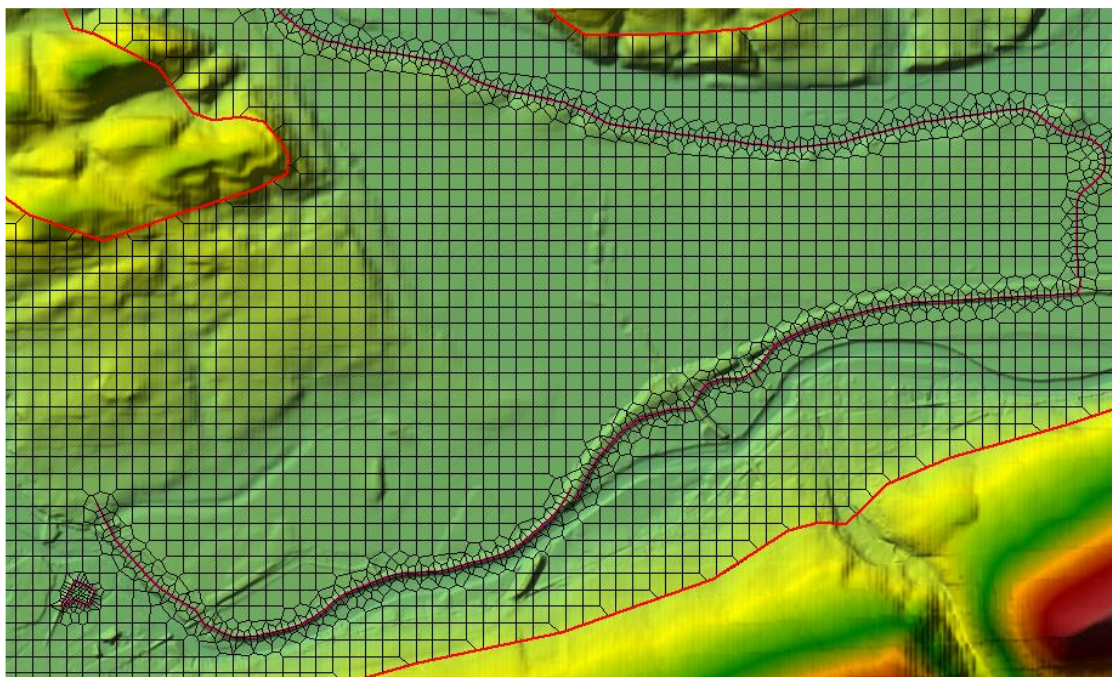


Рисунок 2.8. Пример расчётной сетки HEC-RAS наложенной на ЦМР

Данные о стоке могут содержать постоянный сток, квазипостоянный сток, переменный сток. Можно также задавать данные о седиментации и температуре воды.

В целом программное обеспечение НЕС является мощным инструментом для работы с речной гидрологией различного характера – это и моделирование непосредственно речных наводнений, моделирование формирования речного стока, влияния на него осадков, состояния почв, рельефа, ландшафтов, моделирование стока речных взвесей. Возможность использовать различные входные данные, интеграция с современным ГИС являются несомненными плюсами данных моделей. Также к достоинствам можно отнести подробную и различную документацию, tutorиалы, графический пользовательский интерфейс, возможность сочетать

различные способы моделирования отдельных простых процессов (включены возможности например моделировать базовый сток различными способами). К недостаткам можно отнести нестабильность в работе с переменным стоком в HEC-RAS, отсутствие возможности изменять модель, одномерный расчёт. Однако, ввиду модульности возможно использовать например HEC-HMS, а HEC-RAS заменять другой, более подходящей моделью. Кроме того, существуют другие бесплатные приложения для анализа последствий наводнений – HEC-FIA и HEC-FDA.

Создание гидрологической модели водосбора в HEC-HMS подразумевает: выделение суббассейнов притоков, которые будут связаны между собой в гидрологический граф, выбор используемых моделей стокообразующих процессов и установку их параметров. Построение гидрологического графа было основано на выделении элементарных суббассейнов на основе анализа орографических особенностей, отражённых на цифровой модели местности (ЦММ). Среди свободно распространяемых данных для ЦММ выделяются данные SRTM и ASTER GDEM [64], [65]. Они представляют собой растры земной поверхности, полученные при обработке радарных данных искусственного спутника Земли. Съёмка SRTM охватывает большую часть земного шара между 60 с. ш. и 54 ю. ш. Она была проведена в течение 11 дней в феврале 2000 г. с помощью специальной радарной системы. Двумя радиолокационными сенсорами SIR-C и X-SAR было собрано более 12 терабайтов данных (что примерно равно объёму информации библиотеки конгресса США). Данные предоставляются свободно в формате GeoTIFF, разрешение – около 90 м (3 угловые секунды) [64]. Продукт ASTER GDEM разработан совместно METI (Министерство экономики, торговли и промышленности Японии) и NASA. ASTER GDEM был предоставлен системе GEOS и в настоящее время бесплатно доступен посредством загрузки из Интернет через японский центр ERSDAC [66] и LP DAAC NASA [67]. Сенсор ASTER был создан METI и запущен на борту спутника NASA Terra в декабре 1999 года. Сенсор имеет возможность стереоскопической съёмки вдоль полосы пролёта с помощью двух телескопов, снимающих в надир и назад в ближнем инфракрасном диапазоне с отношением база-высота (base-to-height ratio) – 0.6. Пространственное разрешение в

плане – 15 метров. Одна сцена ASTER в видимом или ближнем инфракрасном диапазоне имеет размер 4100 на 4200 элементов, что соответствует 60х60 км на поверхности Земли. Данные бесплатны и доступны через NASA Reverb [68]. Для создания гидрологического графа использовалась ЦММ на основе данных ASTER GDEM, ввиду их более высокого пространственного разрешения. Гидрологический граф создавался с помощью дополнительного модуля HEC-GeoHMS для ArcGIS 10.1 и в несколько этапов, описанных в [69] и [70].

В основе выделения суббассейнов на водосборе р. Адагум лежала необходимость дальнейшей калибровки параметров моделей с использованием наблюдений Автоматической системы мониторинга паводковых ситуаций Краснодарского края (далее – АС МПСКК). Сначала суббассейны выделялись по крупнейшим и постоянным водотокам: рр. Баканка, Прямая Щель, Темрючки, Липки, Богого, Неберджай, Адагум. Реки Атакой, Чубукова Щель и Глубокая Щель не были выделены в отдельные суббассейны из-за отсутствия наблюдений и информации по ним. В дальнейшем, выделенные суббассейны разделялись сетью существующих пунктов наблюдений АС МПСКК (рисунок 2.9). Суббассейн Неберджаевского водохранилища выделен отдельно, замыкающему створу заданы гидротехнические свойства: полный объём водохранилища, свойства водосбросного устройства, высота дамбы и др.

В рамках гидрологической модели водосбора р. Адагум каждый элемент разработанного гидрологического графа обладает параметрами, определяющими формирование поверхностного стока. В HEC-HMS эти процессы рассчитываются четырьмя математическими моделями: моделью расчётов объёмов стока, моделью трансформации осадков в поверхностный сток, моделью расчёта подземного стока и моделью перемещения потока. Первые три модели характеризуют формирование поверхностного стока на суббассейнах, четвёртая модель описывает перемещение масс поверхностного стока между суббассейнами. Далее охарактеризуем основные положения каждой модели.

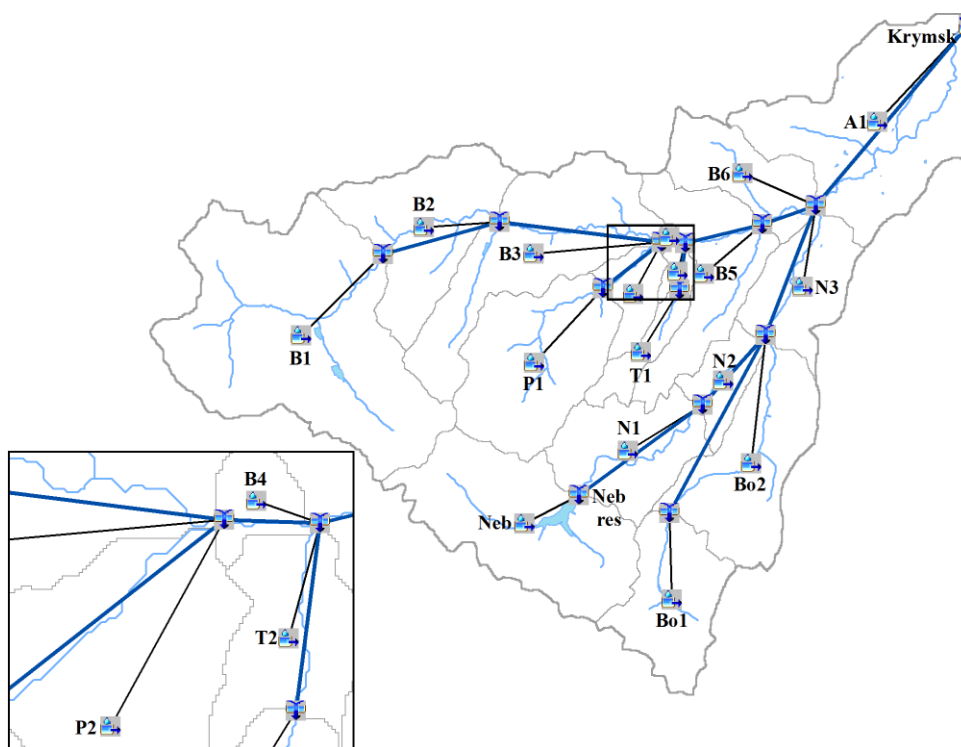


Рисунок 2.9. Гидрологический граф и выделенные суббассейны водосбора р. Адагум.

Атмосферные осадки при выпадении в первую очередь взаимодействуют с растительностью и поверхностью земли. Некоторый их объём расходуется на увлажнение растительности и накапливается в локальных непроточных понижениях микрорельефа (лужах). В гидрологической модели это качество имитируется моделью растительного покрова (Canopy model) и моделью поверхности (Surface model). Растительный покров представляет собой ёмкость, обладающую некоторым объёмом и начальным наполнением. Модель поверхности имеет аналогичное строение. При выпадении осадков сначала полностью заполняется ёмкость растительного покрова, далее начинаются процессы инфильтрации и заполнения поверхности.

Модель расчёта объёмов стока

Вода, поступающая на поверхность земли в виде осадков, не в полном объёме стекает вниз по склону. Часть её испаряется, часть расходуется на увлажнение и потребление растительностью, часть запасается на поверхности в виде луж, покрывающих неровности микрорельефа, часть впитывается в почву. Соотношение объёмов расходования воды определяется метеорологическими условиями,

свойствами растительности, почв, микрорельефом. В гидрологической модели НЕС-NMS это соотношение определяется с помощью моделей расчёта объёмов стока. В общем виде можно заключить, что в результате этих расчётов определяется объём образующегося поверхностного стока, объём потреблённой растительностью и почвой влаги и восполнение подземных вод.

Среди представленных в программе моделей расчёта объёмов стока была выбрана модель Smith Parlange [71]. Она представляет собой упрощение реальных физических процессов и имитирует перемещение воды от поверхности в глубину почвы [72]. В этой модели предполагается, что гидравлическая проводимость экспоненциально снижается от насыщенного состояния, как это обычно наблюдается в почвах[73]:

$$i = \frac{K_S \exp(\frac{IK_S}{S})}{\exp(\frac{IK_S}{S-1})}$$

где i – степень инфильтрации;

K_S – влагопроводность при насыщении;

I – кумулятивная инфильтрация.

$$S = [2K_S \Delta\psi(\theta_t - \theta_i)]^{1/2}$$

где $\Delta\psi$ – восходящее давление (всасывание);

θ_t, θ_i – влагосодержание во время инфильтрации и начальное влагосодержание соответственно.

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.

Перечисленные параметры модели описывают гидрологические свойства комплекса почв, грунтов и растительного покрова суббассейна. Разница между начальным содержанием влаги и содержанием влаги при насыщении определяет общий объём воды, который может быть впитан почвой, грунтами и растительным покровом. Всасывание насыщенного фронта и влагопроводность определяют способность транспортировать воду через почвенный покров и грунты, покрывающие пласты подземных вод. При широком распространении интенсивных осадков формируемые резкие скачки накладываются друг на друга и приводят к сильным паводкам в нижней части водосбора. Почвы по текстуре можно разделить на различные классы (рисунок 2.10), которым соответствуют значения содержания воды при насыщении, влагопроводность и всасывание насыщенного фронта (таблица 2.4). По данной классификации [74], размеры частиц для песков составляют 0,5–2 мм, илов – 0,002–0,5 мм, глин – менее 0,002 мм. Использование такой классификации обусловлено тем, что используемая модель разработана на её основе. Осадки, выпадающие на непроницаемые поверхности, практически в полном объёме образуют поверхностный сток.

В результате расчётов модели формируется объём воды, который вместе с базовым стоком образует речной сток. При прохождении сильных дождевых паводков на небольших реках этот объём воды формирует основную массу стока. Потери воды в некоторой части восполняют подземные воды и могут приводить к последующему росту базового стока.

На территории водосбора р. Адагум в равнинной части распространены чернозёмные почвы, в горной – серые почвы буковых лесов. По классам текстуры они относятся к суглинистым илам. В связи с этим параметры модели расчёта объёмов стока по суббассейнам будут принимать значения, указанные в таблице 2.5. В дальнейшем при калибровке параметров моделей они уточнены.

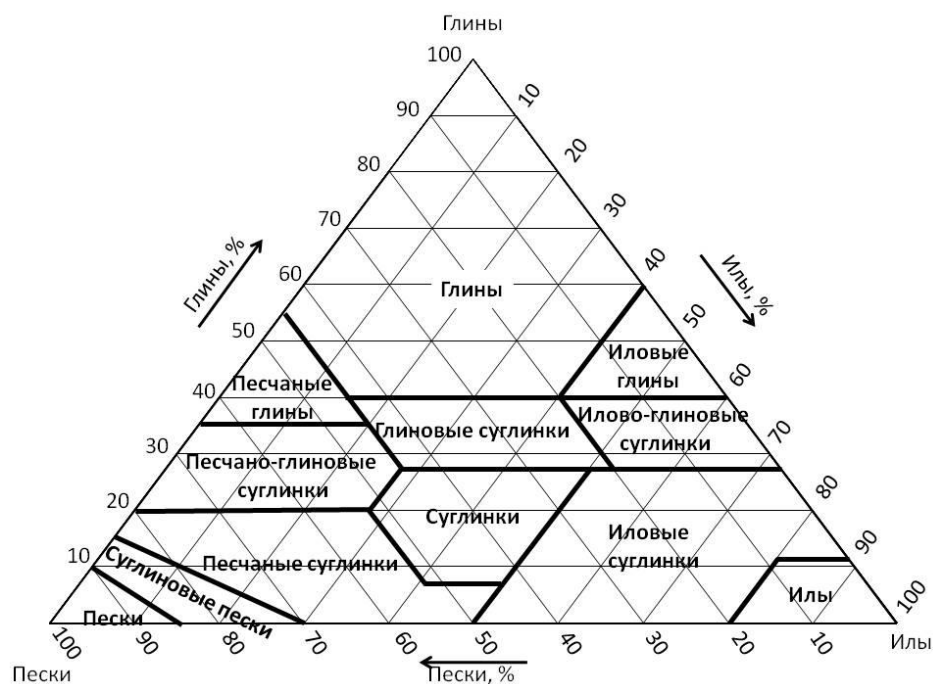


Рисунок 2.10. Схема распределения классов почв по текстуре по [75]

Таблица 2.4 Сочетания параметров модели потерь воды по классам текстур почв [76].

Класс текстуры	Пористость, ϕ , см ³ /см	Насыщенная влагопроводность, К	Всасывание насыщенного фронта, S_f , см
Пески	0,437	21	10,6
Суглинистые пески	0,437	6,11	14,2
Песочные суглинки	0,453	2,59	22,2
Суглинки	0,463	1,32	31,5
Суглинистые илы	0,501	0,68	40,4
Песочно-глинистые суглинки	0,398	0,43	44,9
Глинистые суглинки	0,464	0,23	44,6
Иловые глинистые суглинки	0,471	0,15	58,1
Песочные глины	0,43	0,12	63,6
Иловые глины	0,479	0,09	64,7
Глины	0,475	0,06	71,4

Таблица 2.5. Первоначальные параметры бассейнов в модели расчёта объёмов стока.

Бассейн	Содержание воды при насыщении	Глубина фронта всасывания	Пористость	Влагопроводность	Непроницаемые поверхности, %
A1	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
B1	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
B2	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
B3	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
B4	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
B5	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
B6	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
Bo1	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
Bo2	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
N1	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
N2	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
N3	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
Neb	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
P1	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
P2	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
T1	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0
T2	0.501	40.4	0.400	0.68	0.0

Трансформация осадков в поверхностный сток

Процесс преобразования «непотерянных» осадков в поверхностный сток будем называть трансформацией стока. Он характеризует образование прямого поверхностного стока во время выпадения осадков. Моделирующий комплекс HEC-HMS позволяет использовать эмпирический и концептуальный подходы для имитации этих процессов. Эмпирический подход подразумевает использование опыта для настраивания параметров выбранных моделей. Концептуальный подход подразумевает использование модели кинетической волны поверхностного стока.

Используемая модель единичного гидрографа Кларка (Clark Unit Hydrograph Model) рассчитывает гидрограф стока через представление двух процессов: трансляции и затухания. Трансляция представляет собой перемещение гидрографа по гидрографической сети вниз по течению. Затухание означает, что магнитуда скачков расхода снижается при перемещении вниз по водосбору.

Модель требует настройки двух параметров: время концентрации (time of concentration) и запасающий коэффициент водосбора (storage coefficient, R). Время

концентрации рассчитывается путём калибровки и представляет собой время, затрачиваемое водными потоками на преодоление поверхности водосбора. Запасающий коэффициент водосбора определяет время хранения избытка осадков в бассейне до момента достижения его замыкающего створа. Параметры этой модели рассчитываются в HEC-GeoHMS [77] во время создания гидрологического графа на основе данных о пространственном протяжении, уклонах местности и прочих данных о суббассейнах водосбора (таблица 2.6). Результаты расчётов модели трансформации осадков в поверхностный сток определяют распределение стока по времени. В связи с этим калибровка параметров этой модели состоит в подборе параметров модели, при которых минимумы и максимумы рассчитанных расходов будут совпадать по времени с наблюдаемыми значениями.

Таблица 2.6. Первоначальные параметры суббассейнов в модели трансформации осадков в поверхностный сток.

Бассейн	Время концентрации, ч	Запасающий коэффициент водосбора, ч
A1	0.67	1.7
B1	2.14	2.6
B2	1.40	2.4
B3	2.65	3.6
B4	0.36	1.4
B5	1.55	2.6
B6	4.35	5.3
Bo1	1.10	2.1
Bo2	1.08	2.1
N1	1.21	2.2
N2	0.73	1.7
N3	2.09	3.1
Neb	0.17	1.1
P1	1.30	2.8
P2	1.23	2.2
T1	1.26	1.3
T2	0.51	1.5

Модель базового стока

Базовый сток рассчитывался по модели линейного резервуара [76]. В ней подземные воды суббассейна представляются в виде резервуаров воды, которые

разгружают свои запасы в течение некоторого времени в виде базового стока. К параметрам модели здесь относятся:

1. Начальный базовый сток (удельный или общий со всего суббассейна).
2. Подземный коэффициент – время, в течение которого разгружаются водные запасы.
3. Количество резервуаров.

Так как доля подземного питания для р. Адагум составляет 11%, а среднегодовой расход воды составляет 3,79 м³/с, то среднегодовой расход подземного стока в Адагум составляет 0,42 м³/с для водосбора площадью 328 км². Тогда удельный начальный расход подземного стока составляет 0,0013 м³/с/км².

Модель перемещения потока.

Моделирование поверхностного стока в HEC-HMS представляет собой расчёт гидрографа точки ниже по течению при задании гидрографа точки выше по течению в качестве граничного условия. В рамках настоящей работы использовалась модель поверхностного стока Маскингам-Канге (Muskingum-Cunge) [76]. Этот метод расчёта перемещения потока заключается в том, что под воздействием физических свойств русел рассчитывается затухание поступающих гидрографов. Преимущество этого метода над другими заключается в том, что его параметры являются физически обоснованными. Среди параметров водотоков, соединяющих суббассейны в гидрологический граф, выделяются:

1. Длина водотока.
2. Уклон водотока.
3. Руслевой коэффициент Маннинга.
4. Коэффициенты Маннинга правого и левого берега.
5. Стандартный поперечный профиль поймы.

В результате разработки гидрологической модели водосбора р. Адагум был построен гидрологический граф, состоящий из суббассейнов, Неберджаевского водохранилища и водотоков между ними; были выбраны модели основных стокообразующих процессов и заданы их параметры на основе литературных гидрологических и географических данных о водосборе р. Адагум.

Эффективность процессов моделирования определяется тем, насколько адекватно модель имитирует процессы, происходящие в реальной системе [78]. Адекватность повышается путём калибровки параметров модели по реальной информации. Калибровка представляет собой итеративный процесс, этапы которого представлены на рисунке 2.11. Гидрологические модели водосбора и долины р. Адагум разработаны в целях имитации формирования и прохождения паводков, в связи с этим для калибровки их параметров необходимо использовать гидрологические и метеорологические наблюдения непосредственно за паводками. В результате экспедиционных исследований специалистами ЮНЦ РАН и Росгидромета была собрана разнообразная информация о формировании, хронологии и прохождении паводка в июле 2012 года. Кроме того, развитие сети уровнемеров АС МПСКК (автоматизированных гидрологических комплексов – далее АГК) позволяет в оперативном режиме фиксировать изменения уровня воды в семи точках водосбора [61]. Перечисленная выше информация даёт возможность выделить два этапа проведения калибровки гидрологических моделей: по данным АС МПСКК и метеостанций в период скачков уровня после 2012 года и по данным о формировании и прохождении паводка в июле 2012 года.

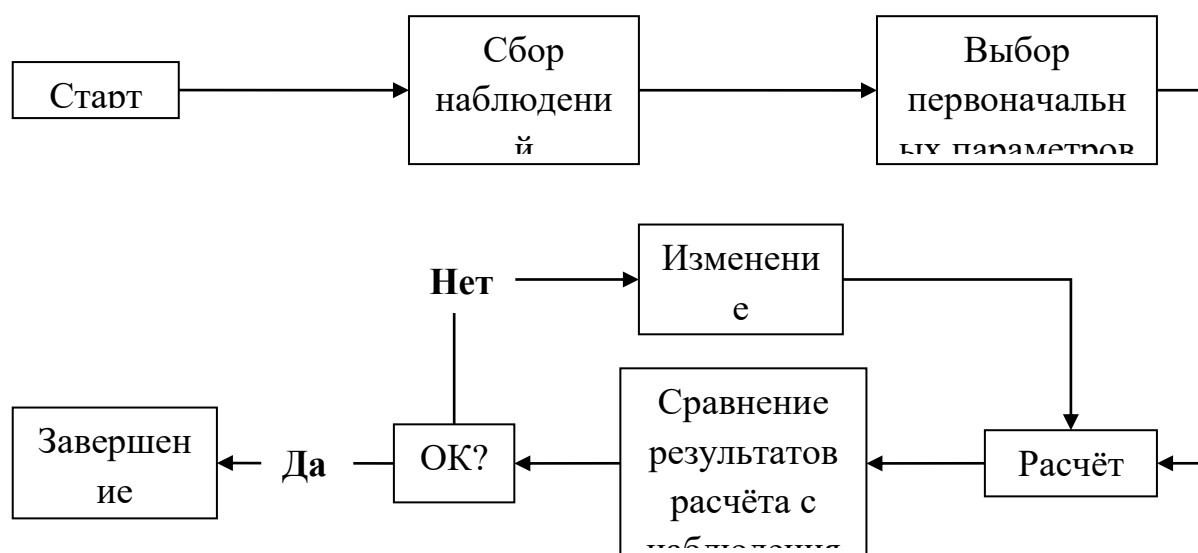


Рисунок 2.11. Общая схема калибровки.

Данные наблюдений АС МПСКК представляют собой значения абсолютного превышения поверхности воды, регистрируемые каждые 10 минут. Для проведения калибровки необходимо было перевести значения абсолютного превышения поверхности воды в значения расходов. В результате экспедиционных исследований ЮНЦ РАН в пунктах установки уровнемеров АС МПСКК в июле 2014 года были построены поперечные профили, на основании которых в гидрологической модели водосбора производились пересчёты значений наблюдений в расход воды.

Для первого этапа калибровки гидрологической модели водосбора р. Адагум был выбран случай синхронного скачка уровня на уровнемерах от 0,5 до 1,6 м, наблюдаемых между 1 и 15 декабря 2013 года. Динамика уровней воды на пунктах АС МПСКК и осадков на метеостанциях в Новороссийске и Крымске представлена на рисунке 2.12. Небольшой скачок (до 0,3 м) наблюдался в ночь с 7 на 8 декабря, а скачок до 1,6 м – 10 декабря.

Калибровка проводилась как для гидрологической модели водосбора, так и для гидрологической модели долины р. Адагум. В её основе лежали наблюдения пунктов АС МПСКК, метеорологических станций Крымск и Новороссийск, результаты экспедиций ЮНЦ РАН в бассейн р. Адагум после сильного паводка в июле 2012 года, а также информация о развитии паводка отчёта Росгидромета [50].

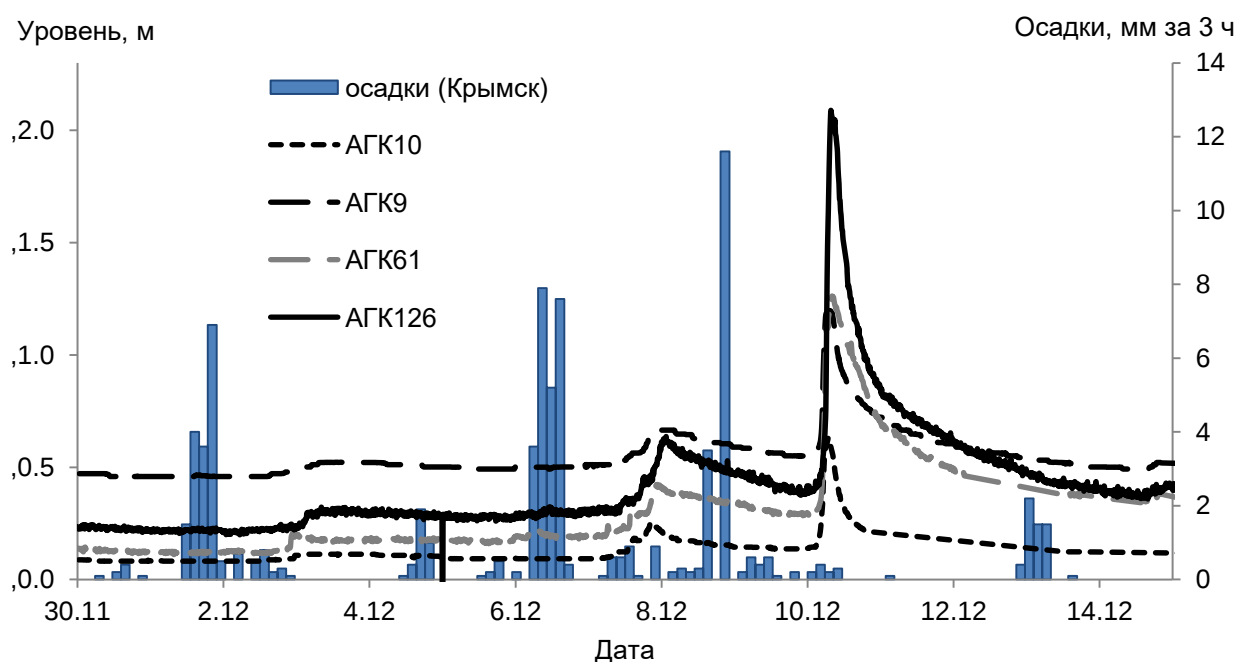
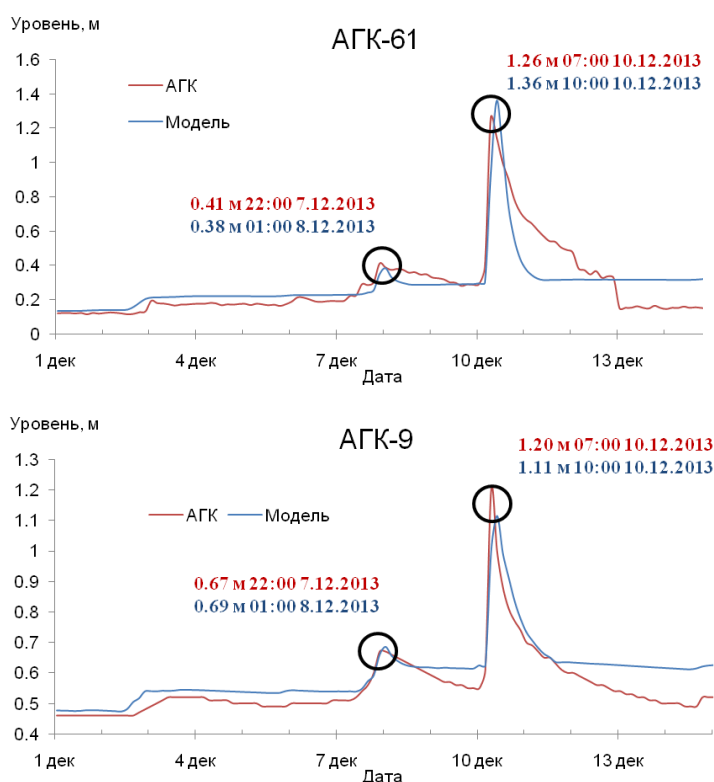


Рисунок 2.12. Динамика относительных уровней АГК на водосборе р. Адагум и выпадения осадков на м/с Крымск 1–15 декабря 2015 г.

Калибровке подвергались параметры суббассейнов, сток которых проходит через точки установки АГК-61, АГК-126, АГК-9, АГК-10. Параметры прочих суббассейнов в ходе калибровки устанавливались исходя из контрольных суббассейнов, к которым относятся: В1, В2 (АГК-61), Р1 (АГК-9), Т1 (АГК-10), В3, Р2, В4, Т2, В5 (АГК-126). Результаты расчётов представлены на рисунке 2.13. Так как расчётный шаг составлял 3 часа, то временную задержку наступления пиков модельных расчётов с наблюдениями можно считать удовлетворительной. Абсолютная ошибка уровня не превышает 0,1 м.

Параметры, рассчитанные в результате калибровки модели по данным об осадках и динамике уровня на уровнемерах АС МПСКК, представлены в таблице 2.7. Стоит отметить, что влагоёмкость растительного покрова, ввиду распространения буково-грабовых лесов, достигает значений 30–40 мм. При меньших значениях на суббассейнах 8 декабря формируется резкий скачок уровней и расходов, сравнимый со скачком 10 декабря.



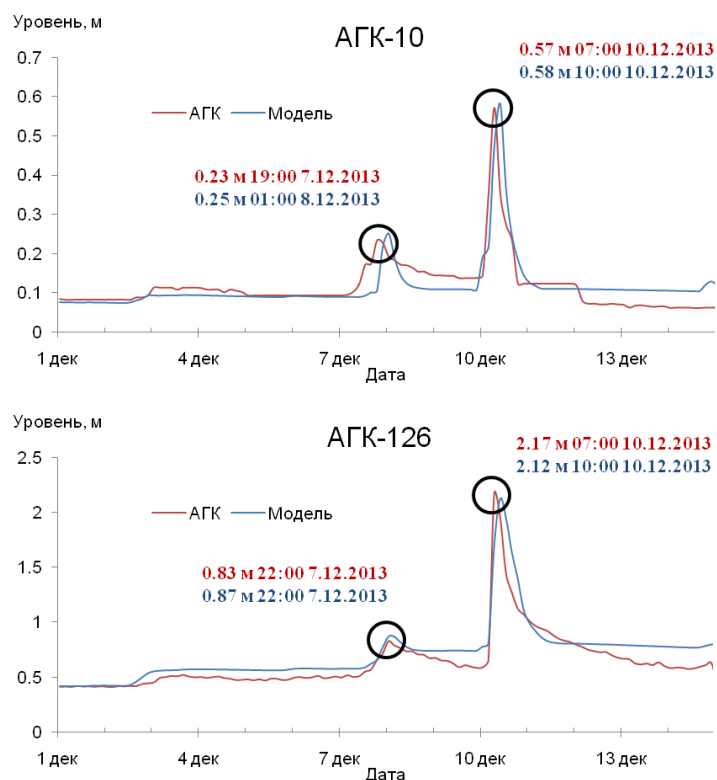


Рисунок 2.13. Результаты расчётов с использованием откалиброванных параметров моделей суббассейнов для различных АГК.

Второй этап калибровки гидрологической модели водосбора р. Адагум заключался в проведении расчётов паводка в июле 2012 года с использованием параметров моделей, откалиброванных на первом этапе. В качестве метеорологических данных для проведения расчётов были использованы графики динамики выпадения осадков на метеостанциях Крымск и Новороссийск, представленные в [79]. Сопоставление результатов экспедиций, оценки Росгидромета и результатов расчётов по модели представлены в таблице 2.8. Принципиальное различие результатов модельных расчётов с экспедиционными данными свидетельствует о неравномерном распределении осадков на водосборе во время паводка, которое имеет принципиальное значение для формирования речного стока на различных притоках Адагума. Однако рассчитанный максимальный расход на слиянии Неберджая и Баканки (истоке Адагума) и далее по Адагуму согласуется с оценками специалистов Росгидромета [50] и нашими экспедиционными данными. Можно сделать вывод, что существующая сеть осадкомеров не позволяет характеризовать динамику стока на различных частях водосбора.

Таблица 2.7. Калиброванные параметры гидрологической модели (1 – максимальная влагоёмкость растительного покрова, мм; 2 – максимальная влагоёмкость поверхности земли, мм; 3 – влагосодержание в почве при насыщении, в долях; 4 – глубина всасывания, мм; 5 – пористость, в долях; 6 – влагопроводность, мм/ч; 7 – время концентрации, ч; 8 – время накопления, ч; 9 – подземный коэффициент; 10 – количество резервуаров).

Бассейны	Максимальная влагоёмкость		Объём стока				Трансформация		Базовый сток	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A1	40	2	0.5	40.4	0.463	0.68	1	4	700	1
Bo1	30	2	0.5	40.4	0.463	0.68	2	4	700	1
Bo2	30	2	0.5	40.4	0.463	0.68	2	4	700	1
B1	23	5.5	0.5	40.4	0.463	0.68	1	4	2500	1
B2	25	4.5	0.5	40.4	0.463	0.68	1	4	2500	1
B3	39	2	0.5	40.4	0.501	0.68	1	4	700	1
B4	39	2	0.5	40.4	0.501	0.68	2	4	700	1
B5	39	2	0.5	40.4	0.501	0.68	1	4	700	1
B6	30	2	0.5	40.4	0.501	0.68	2	4	700	1
Neb	30	2	0.5	40.4	0.501	0.68	2	4	700	1
N1	30	2	0.5	40.4	0.501	0.68	2	4	700	1
N2	30	2	0.5	40.4	0.501	0.68	2	4	700	1
N3	30	2	0.5	40.4	0.501	0.68	2	4	700	1
P1	36	3	0.5	40.4	0.501	0.68	1	4	700	1
P2	39	2	0.5	40.4	0.501	0.68	1	4	700	1
T1	36	0.5	0.5	40.4	0.501	0.68	1	4	700	1
T1	39	2	0.5	40.4	0.501	0.68	1	4	700	1

Таблица 2.8. Сравнение максимальных расходов по экспедиционным данным, по оценке Росгидромета и по расчётам модели.

№	Река	Максимальный расход, м ³ /с, рассчитан по экспедиц. данным	Максимальный расход, м ³ /с, по оценке Росгидромета	Максимальный расход, м ³ /с, по расчётам модели	Время наступления максимального расхода, по расчётам модели
B1	Баканка	39	182	404	05:30 7 июля
B15	Прямая	164	560	100	05:10 7 июля
N1	Липки	140	-	163	08:30 7 июля
N2	Липки	361	-	244	08:40 7 июля
N3	Богото	185	280	112	06:00 7 июля
A1	Адагум	1631	1500	1450	06:40 7 июля
A2	Адагум	3155	1500	1513	07:40 7 июля

2.4. Результаты реконструкции формирования паводка

В гидрологической модели водосбора р. Адагум содержит 16 суббассейнов, соединённых между собой (рисунок 2.7). Кроме того, в нём выделено Неберджаевское водохранилище. Для каждого суббассейна на основе динамики осадков на метеостанциях Крымск и Новороссийск рассчитана собственная динамика осадков. Общий водосбор можно разделить на три примерно равные крупные части: Баканка до впадения Прямой Щели, система притоков Неберджай-Богого и нижняя Баканка и Адагум. Динамика осадков на водосборе и расходов на замыкающих створах бассейнов первой части представлена на рисунке 2.14.

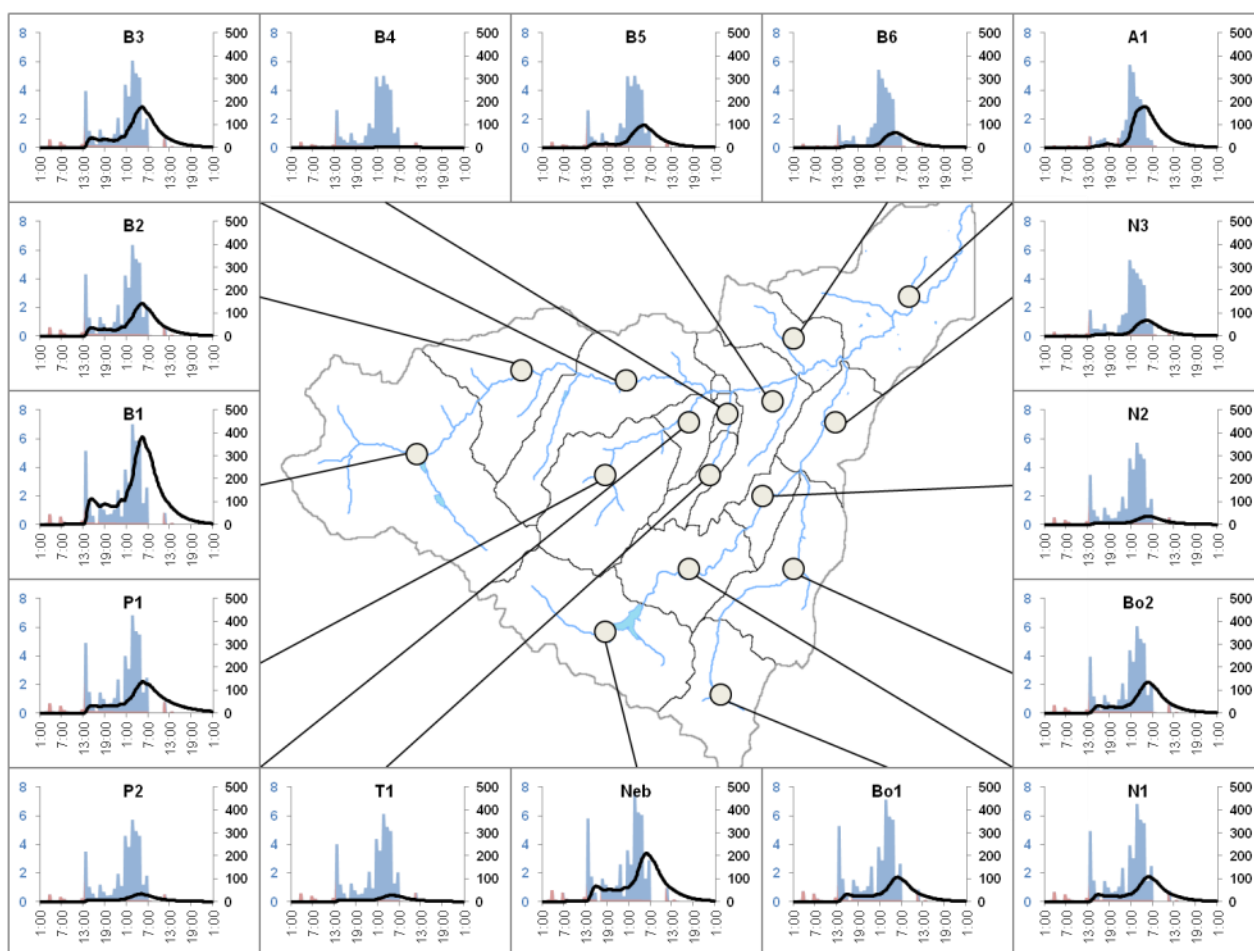


Рисунок 2.14. Осадки на суббассейнах водосбора р. Адагум (синим) и рассчитанные расходы с суббассейнов (чёрным); левые оси – осадки, мм/ч; правые оси – расходы в $\text{м}^3/\text{с}$; нижние оси – часы, начиная с 6 июля.

Скачок интенсивности осадков до 4–5 мм/ч наблюдался в горной части водосбора, где привёл к формированию скачка расходов до 100 м³/с на водосборе В1 и на других водосборах сообразно площади суббассейнов. Так как осадки распределены равномерно между метеостанциями, то величина стока с суббассейнов сообразна их площадям. Второй по времени скачок осадков наблюдался по всему водосбору Адагума, продолжался несколько часов с интенсивностью более 5 мм/ч и привёл к более значительным скачкам стока с суббассейнов. Наибольший сток сформировался на самых больших по площади суббассейнах – В1, В2, В3, А1, Neb, Р1.

Сопоставление рассчитанной динамики расходов по узлам гидрографической сети модели водосбора (рисунок 2.15) позволяет определить, что при заданных осадках, равномерно интерполированных между метеостанциями Крымск и Новороссийск, наибольший сток относится к водосбору Баканки.

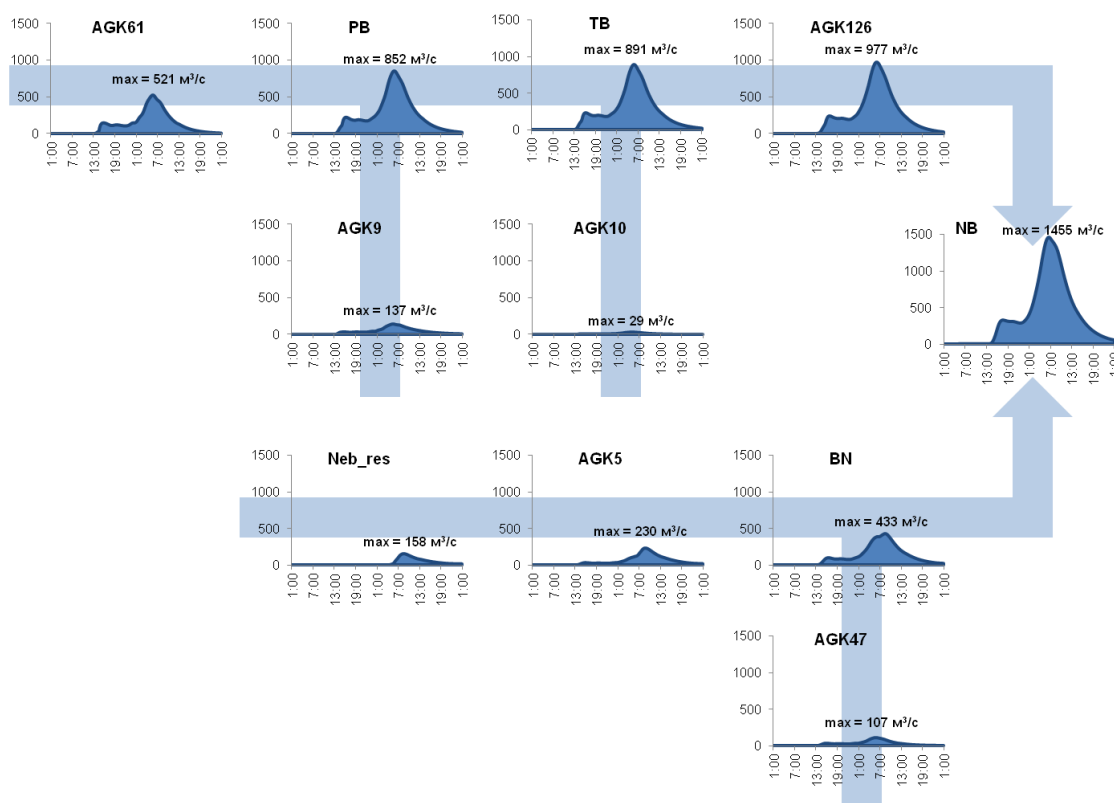


Рисунок 2.15. Динамика расходов по узлам гидрографической сети водосбора р. Адагум по расчёту паводка 6–7 июля 2012 г.

Динамика стока на всех узлах характеризуется двумя максимумами. Первый максимум наблюдается днём 6 июля и на слиянии Баканки и Неберджаевской превышает $300 \text{ м}^3/\text{с}$. Второй максимум характеризуется мощным скачком стока, который к 6:30 7 июля достигает $1455 \text{ м}^3/\text{с}$ на слиянии.

В первой главе по материалам экспедиционных исследований делается вывод, что максимальные по интенсивности и объёмы осадки приходятся на водосборы правых притоков Баканки. В реконструкции, которая основана на динамике осадков только на метеостанциях, максимум стока приходится на основной бассейн Баканки, сток с правыми притоками составляет незначительную часть (АГК-9 и АГК-10).

Сравнение результатов с экспедиционными наблюдениями (рисунок 2.16 и таблица 2.9) 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.

Особое значение в реконструкции имеет Неберджаевское водохранилище. Прорыв его дамбы мог бы значительно увеличить разрушительную способность паводка, добавив за короткое время 6–8 млн м^3 воды [80]. В гидрологической модели водосбора р. Адагум его режим имитируется на основании доступных данных: гребень плотины возвышается до абсолютной отметки 185 м, её длина составляет 250 м, из водохранилища по насосу отводится вода в Новороссийск с расходом до $0,3 \text{ м}^3/\text{с}$; имеется регулярный сброс воды и сбросная шахта, диаметром 10,5 м, воронка которой установлена на абсолютной отметке 182 м [81]. Зависимость уровень-объём составлена по [79]. Такой механизм позволяет имитировать постоянный отток воды в Новороссийск, процессы наполнения и спуска водохранилища, перелива через гребень водохранилища при переполнении.

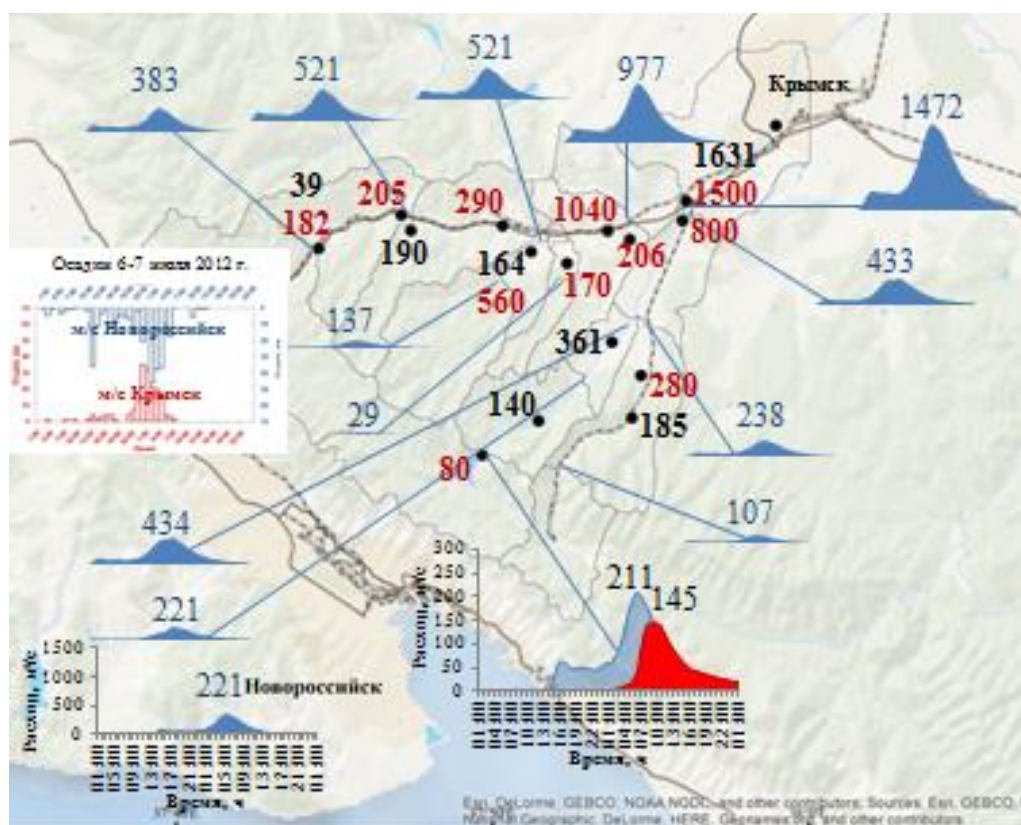


Рисунок 2.16. Результаты реконструкции паводка, сравнение максимальных расходов с полученными в ходе экспедиционных исследований ЮНЦ, Росгидромета, Института водных проблем.

Таблица 2.9. 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

По результатам нашей реконструкции (рисунок 2.17), 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 млн м^3 воды, сток – 5,1 млн м^3 .

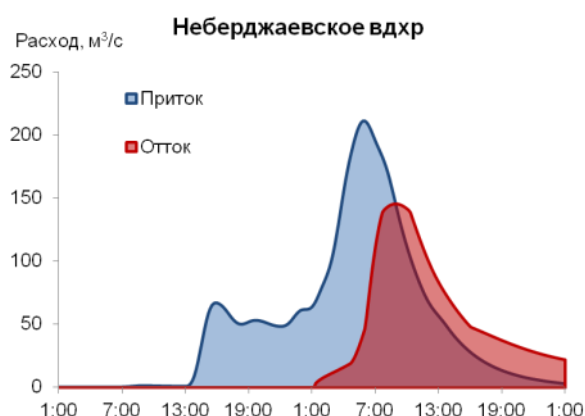


Рисунок 2.17. Приток и отток воды в Неберджаевском водохранилище по данным реконструкции паводка 6–7 июля 2012 г.

2.5. Оценка влияния мостов на прохождение паводка

В работе [4] в качестве главной причины катастрофического наводнения в бассейне р. Адагум 6–7 июля 2012 г. выделяется выпадение чрезвычайно интенсивных атмосферных осадков. Среди антропогенных факторов, определяющих условия прохождения паводков, выделяются недостаточная пропускная способность пролётов большинства мостов, построенных на реках бассейна, застроенность поймы и замусоренность русел. С помощью адаптированных для водосбора и

долины р. Адагум гидрологических моделей HEC-HMS и HEC-RAS, на основе имеющихся данных полевых наблюдений и следов паводка были проведены расчёты прохождения паводка при различном состоянии пролётов мостов, захламления русел и застроенности поймы.

2.5.1. Настройка гидрологической модели прохождения паводка

Прохождение паводка в конкретных геоморфологических и гидравлических условиях требует детального учёта влияния особенностей долины реки: как состояния и морфологии русла, так и поймы и надпойменных террас. Гидрологическая модель водосбора для этой цели является слишком грубым и общим инструментом. Определение влияния конкретных условий прохождения паводка требует разработки гидрологической модели долины реки Адагум. Она была проведена на основе программного комплекса HEC-RAS 5.0.

Разрабатываемая гидрологическая модель долины р. Адагум предназначена для изучения влияния различных факторов на прохождение паводка в окрестностях Крымска, среди которых: захламлённость русла и проёмов под мостами, железнодорожные насыпи, изменения морфологии русла. В связи с этим она должна была имитировать динамику зон затопления и их глубин, скорости водных потоков, снижение/повышение пропускной способности русла и проёмов под мостами во времени.

В основе гидрологической модели долины р. Адагум лежит двумерная нерегулярная расчётная сетка, в ячейках которой рассчитываются значения высоты водной поверхности на основе динамики расходов или уровня, заданных на границах сетки. Расчётная сетка представляет собой регулярную сетку, деформированную под воздействием линий дамб, мостовых переходов. В гидрологической модели (рис. 2.5) долины реки Адагум деформирующими линиями являются железнодорожная магистраль Крымск–Новороссийск (Ж/Д), автомобильные мосты с примыкающими автодорогами Крымска: Авто 1 (по ул. Новороссийской), Авто 2 (по ул. Синева-Маршала Гречко), борта поймы. Для рёбер ячеек, образованных в ходе деформации, заданы условия, имитирующие

железнодорожную насыпь, мосты с проёмами, для которых можно задавать режимы пропускной способности (закрывание, открывание во время паводка, разрушения и др.). Построенная расчётная сеть содержит 6669 ячеек, средний размер которых составляет 2461 м² (общая занимаемая площадь составляет 16,5 км²) и охватывает пространство окрестностей Крымска выше города и большую часть города (рисунок 2.18).

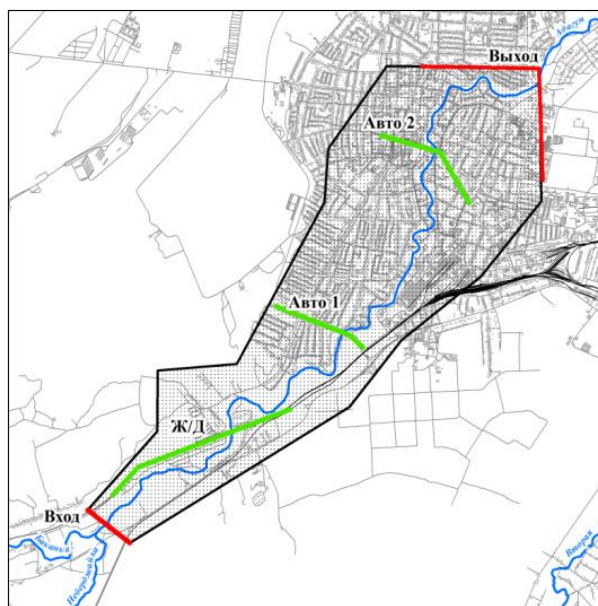


Рисунок 2.18. Расчётная сетка гидрологической модели долины р. Адагум, деформирующие линии, границы входа-выхода.

Расчёты зон затопления, распределения скоростей, распределения глубин производятся на основе взаимодействия расчётной сетки с ЦММ, представляющей геоморфологию местности. Для использования гидрологической модели долины р. Адагум были построены два варианта ЦММ окрестностей Крымска на основе разработанной ОАО «Кубаньводпроект» по заданию Министерства гражданской обороны, чрезвычайных ситуаций и региональной безопасности Краснодарского края проектной и рабочей документации по объекту «Защита территорий Крымского района Краснодарского края от негативного воздействия вод рек Адагум, Неберджай, Баканка» [82], [83], [84]. В этой документации приводятся топографические планы речной поймы, построенные на основе полевых исследований, масштабом 1:1 000, а также проектные работы по деформации русла.

На основе этих топопланов были построены два варианта ЦММ: по состоянию русла на вторую половину 2012 года и по проектируемому устройству русла.

Построение первого варианта ЦММ проводилось в несколько этапов: оцифровка данных топоплана (точек со значениями высоты, линий перегиба, горизонталей, линий откосов и пр.), создание TIN-модели поверхности, преобразование её в растр с пространственным разрешением 1х1 м, наложение на полученный растр значений высоты зданий и сооружений (на основе данных OSM). Второй вариант ЦММ предусматривал создание на основе данных проектной документации (продольных профилей бортов и дна проектируемых элементов русла, пространственного их размещения) растра деформированного русла и замещение им первого варианта ЦММ. Результаты расчётов с использованием второго варианта ЦММ представлены в следующей главе.

2.5.2. Роль мостов и пойменного мусора в прохождении паводков

После прохождения паводка 6–7 июля 2012 г. наряду с другими версиями причин большого ущерба, обусловленного затоплением значительной части города, была высказана версия, что пик паводка в Крымске усиливался влиянием мостовых переходов, в частности между слиянием Неберджая и Баканки и городом. Она состоит в том, что 2 моста – железнодорожный (у х. Верхнеадагум) и автомобильный (в створе ул. Новороссийской) – сыграли роль дамб с узким живым сечением, которое во время паводка было сильно забито мусором. Это привело к образованию масштабных запруд выше мостов по течению, затоплению обширной территории, повреждению мостов. При переполнении таких временных водохранилищ ниже мостов по течению наблюдался резкий скачок расходов, приведший к образованию разрушительной паводковой волны. При этом подразумевается, что насыпь шоссе и железной дороги сыграли роль дамбы, а недостаточные проёмы под мостами привели к быстрому росту уровня выше мостов.

Другая точка зрения на влияние мостовых переходов на прохождение паводка [54] состоит в том, что количество этих сооружений в бассейне Адагума не позволяет выделить особое влияние только двух мостов. Были полностью

разрушены или повреждены 7 мостовых переходов (автомобильных и пешеходных), проёмы мостов представляли собой решето из стволов и веток деревьев, бытового мусора (рис. 2.19), однако водный поток не преграждался полностью. Поэтому резкий скачок обусловлен не влиянием одного-двух мостов, а, скорее, наложением влияния многих мостов и интенсивностью стокоформирующих процессов.



Рисунок 2.19. Затопы на мостах (Богото, Неберджай, Баканка, Адагум)

Гидрологическая модель долины р. Адагум позволяет проводить расчёты прохождения паводков с учётом различного влияния мостовых сооружений и их проёмов. Для этого в расчётную сетку были включены профили железнодорожного и автомобильного мостов выше Крымска (рисунок 2.20). Проёмы под мостами имитировались как отверстия, которые пропускают воду либо свободно, либо в специальном режиме, моделирующим их закупоривание и откупоривание паводковым мусором.

Первым по течению является железнодорожный мост через р. Адагум. Он построен в 1884 году на участке между Крымском и Новороссийском при

пересечении речной долины железной дорогой. Полная длина моста составляет 53 м, пролётные строения моста длиной 44 м представляют собой сквозные металлические фермы с проездом понизу. Опоры моста железобетонные, массивные, обсыпного типа. Высота проёма моста составляет 8,5 м, а общая площадь поперечного сечения железнодорожного моста – около 300 м². Автомобильный мост в створе ул. Новороссийской пересекает долину р. Адагум и соединяет дорогу регионального значения 03А-009 с федеральной магистралью А-146. Длина моста составляет 100 м, полная высота – 8,5 м, площадь поперечного сечения проёма под мостом – 450 м². Автомобильный мост обладает девятью опорами, ширина каждой из которых равна 1 м, что приводит к снижению площади поперечного сечения в среднем на 7 м² на каждую опору, сокращая её до 390 м².

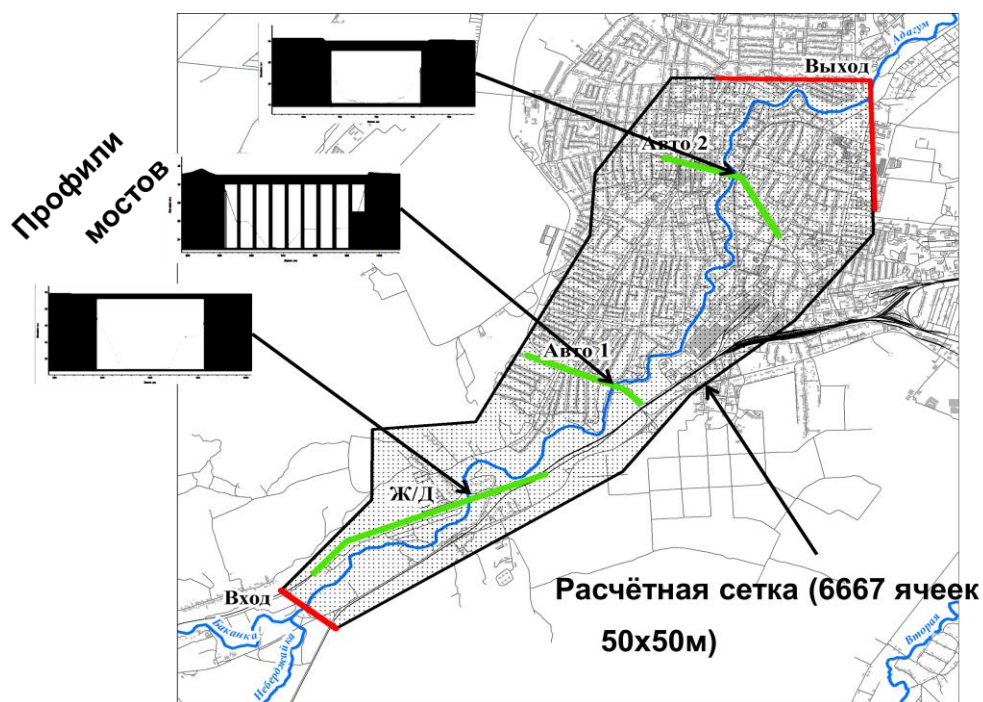


Рисунок 2.20. Профили мостов (железнодорожного – Ж/Д, автомобильного по ул.Новороссийской – Авто 1 и автомобильного по ул. Синева - Жукова – Авто 2) в гидрологической модели прохождения паводков в окрестностях Крымска.

Для определения степени влияния железнодорожного и автомобильного мостов в створе ул. Новороссийской были проведены расчёты при различных

режимах пропускной способности проёмов мостов. Расчётный шаг должен быть таким, чтобы за один шаг водный поток преодолевал расстояние не больше ячейки расчётной сетки. При средней ячейке (50 на 50 метров) расчётный шаг был выбран 10 секунд при условии, что скорость потока в местных условиях не превысит 5 м/с. В результате расчётов были получены профили водной поверхности в пределах расчётной сетки на каждые 10 минут расчётного периода, а также пространственное распределение относительной высоты уровня воды и скоростей потока. Для получения правдоподобных результатов для начального этапа расчётного периода начало расчётов было отодвинуто на 48 часов назад, это позволило к началу расчётного периода заполнить русло Адагума водой на всём его протяжении в пределах расчётной сетки.

Для определения влияния мостовых проёмов на прохождение паводка были проведены расчёты по трём сценариям:

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, а со второго часа расчётного периода – 0 м для обоих мостов).

3. Проёмы мостов открыты как в первом сценарии до 21:00 6 июля, затем закрываются наглухо к 00:00, затем прорываются в 03:00 7 июля; свободная высота составляет 8 и 6.5 м соответственно.

Сравнение результатов расчётов при различных сценариях проводилось на основании нескольких параметров: общая площадь, подвергнутая затоплению; распределение максимального уровня воды; динамика подъёма уровня на различных геоморфологических элементах долины и районах города; распределение времени наступления затопления.

Общая площадь, подвергнутая затоплению.

Зоны затопления в долине р. Адагум, рассчитанные по трём сценариям, представлены на рисунке 2.21. Площадь зоны затопления по сценарию 1 (открытые

мосты) составила 7507 тыс. м², по сценарию 2 (закрытые мосты) – 7814 тыс. м², по сценарию 3 (закрывающиеся мосты) – 7673 тыс. м². Зоны затопления представляют собой полигоны, вытянутые вдоль течения Адагума, их ширина колеблется от 400 м в южной части до 2000 м в северной части. Наибольшей ширины зона затопления для всех сценариев достигает в пределах г. Крымска, где уклон реки сильно падает, водный поток выходит на обширную застроенную надпойменную террасу. Основные различия в зонах затопления по различным сценариям наблюдаются в южной половине – в районах мостов с переменным режимом проёмов. Рассчитанные с помощью гидрологической модели долины р. Адагум зоны затопления в целом согласуются с зоной затопления, построенной волонтерами в первые дни после паводка и представленной сервисом Openstreetmap [85]. Стоит отметить, что ниже автомобильного моста (в северной части зон) различия в пространственном распределении затопления быстро нивелируются. Таким образом, можно сделать вывод, что состояние проёмов моста имело высокое значение для затопления долины перед Крымском и в районе автомобильного моста в створе ул. Новороссийской.

Распределение максимального уровня воды.

Рассчитываемые водные поверхности для каждого шага по времени при пересечении с топографией местности формируют распределение затопления по глубине. Площади, подвергнутые затоплению при максимальном уровне воды, в зависимости от сценария закупоривания проёмов рассматриваемых мостов, различны. Кроме непосредственно площадей могут изменяться отметки максимальных уровней в различных частях речной долины. В рамках сценариев рассчитывались распределения уровней воды в каждый временной шаг. Максимальные уровни в каждой точке (ячейке 1 на 1 м) речной долины, рассчитанные для каждого сценария, сравнивались между собой. При сравнении противоположных сценариев (с открытыми и закрытыми проёмами мостов) при закрытом варианте наблюдалось большее превышение максимальных уровней непосредственно перед закрытыми мостами, а также после автомобильного моста на левой надпойменной террасе (рисунок 2.22). При этом стоит отметить, что

максимальные уровни в русле и прирусловой части долины непосредственно после мостов в «закрытом» сценарии были ниже, чем при «открытом».

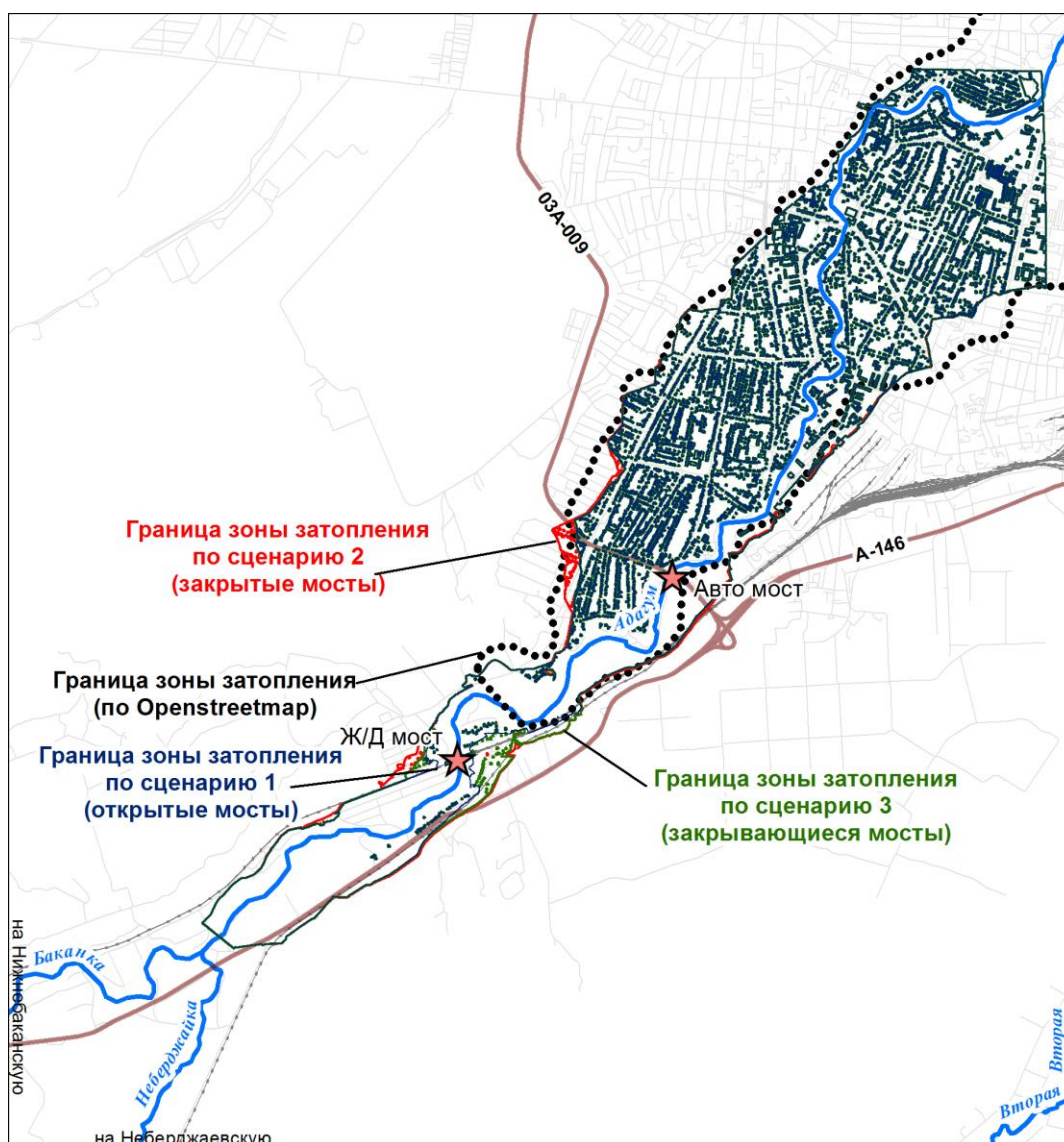


Рисунок 2.21. Зоны затопления, построенные по различным сценариям закупоривания проёмов мостов.

Разница между «закрытым» и «закрывающимся» сценариями в распределении максимальных уровней выражается в значительно большем уровне при «закрытом» сценарии (более 2 м). В то же время влияние автомобильного моста на максимальный уровень воды в этих сценариях практически отсутствует. Оно не превышает 1 м, в то время как влияние железнодорожного моста превышает 2 м.

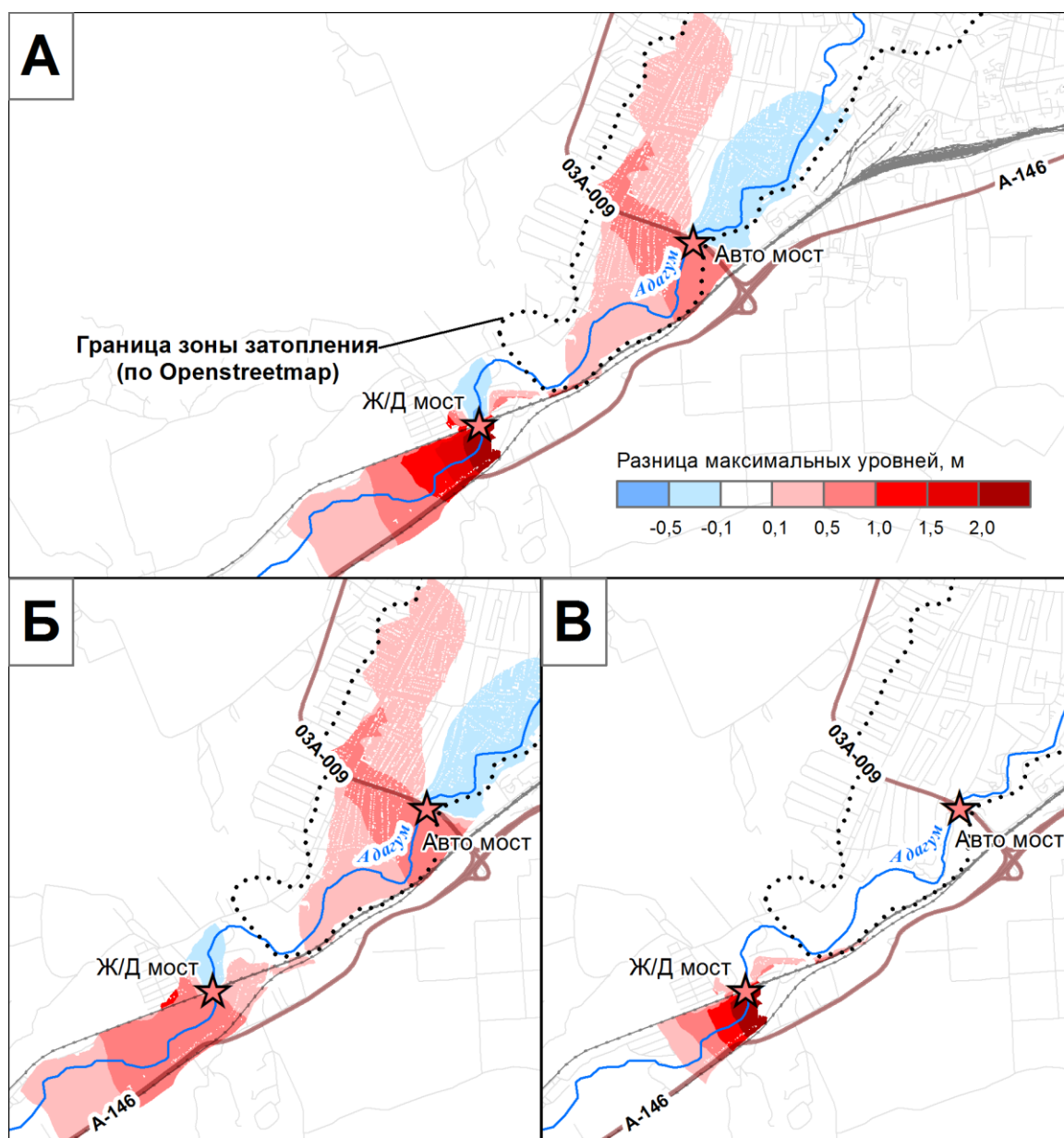


Рисунок 2.22. Разница максимальных уровней в долине р. Адагум при сравнении различных сценариев (А – сценарии 2 и 1; Б – сценариев 2 и 3; В – сценарии 3 и 1).

Динамика подъёма уровня на различных геоморфологических элементах долины и районах города.

Во время прохождения паводка водный поток, выходящий из русла на пойму и из поймы на надпойменную террасу, приводит к формированию затопления, которое протекает по-разному на различных участках речной долины. В долине р. Адагум на территории, подвергнутой наводнению, были выделены точки, для которых была рассчитана динамика уровня воды 6–7 июля 2012 года по трём

сценариям развития паводка (рисунок 2.23). Среди них выделялись: русловые точки, характеризующие прохождение паводка непосредственно по основному руслу реки, точки на надпойменных террасах, расположенные в затопленных районах города, и точки в непосредственной близости от мостов. Зона затопления по всем трём сценариям выше Крымска симметрична относительно основного русла реки, от южного въезда в город до моста по ул. Синева охватывает обширную надпойменную террасу по левой стороне долины, а ниже охватывает правую сторону долины.

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 02:00–05:00 7 июля.

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 оно переполняется и формирует резкий скачок уровня ниже моста, который перед автомобильным мостом по ул. Новороссийской образовал 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.

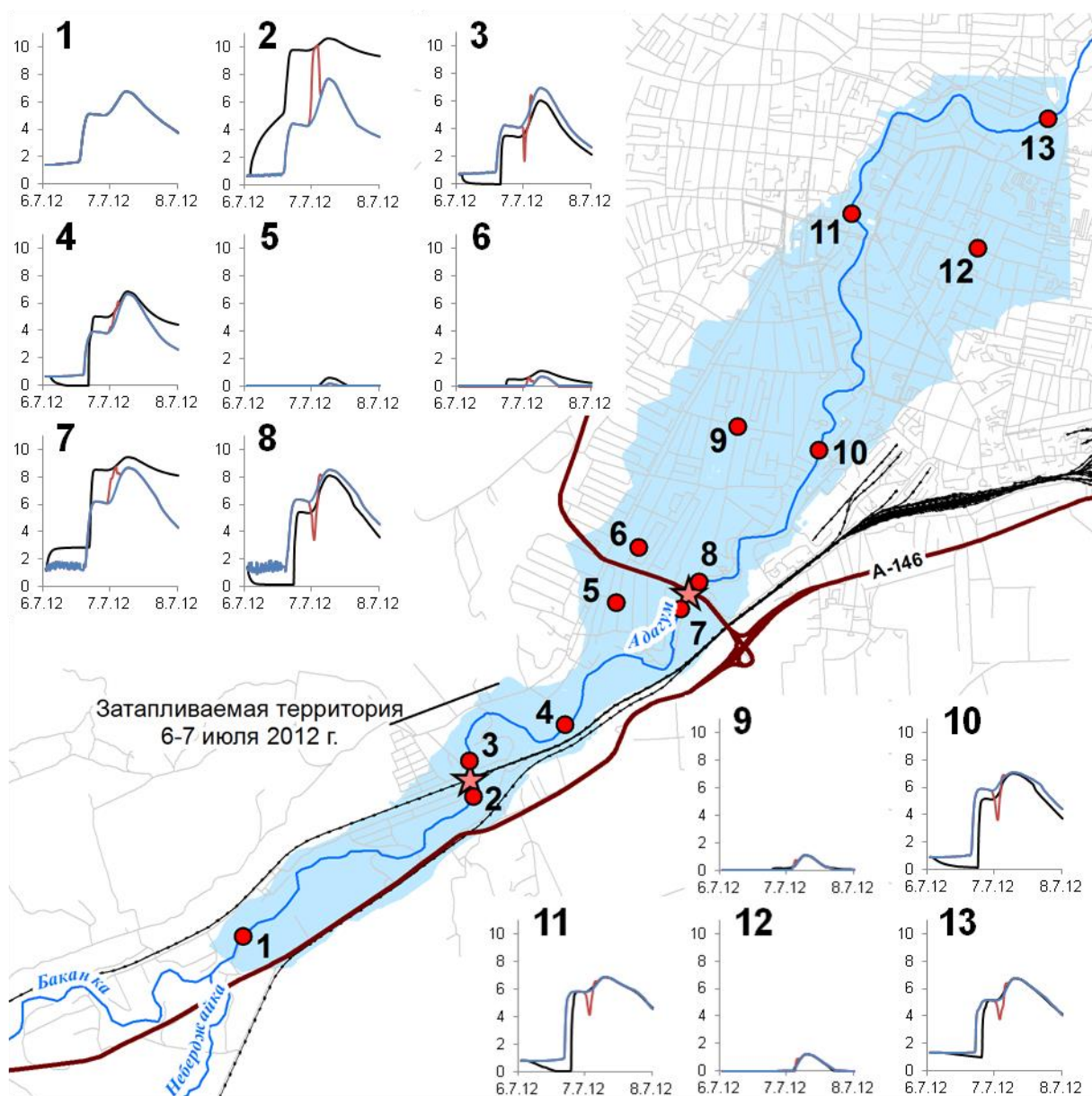


Рисунок 2.23. Динамика уровня воды, рассчитанная по трём сценариям (синим – сценарий 1, чёрным – сценарий 2, красным – сценарий 3) в точках, приуроченных к различным частям зоны затопления.

Сценарий 3 характеризуется полным закупориванием мостовых проёмов между 21:00 и 24:00 6 июля с последующим прорывом между 02:00 и 03:00 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 уровня на русловых точках перед мостами и резкий спад сразу за мостами. При вскрытии проёмов динамика возвращается к сценарию 1.

В целом, максимальный пик уровня в точках ниже автомобильного моста для всех трёх сценариев совпадает как по величине, так и по времени наступления. Разница в величине пика для точек 7 и 8 (выше и ниже автомобильного моста) не превышает 1 м, по времени наступления они практически совпадают, при этом для закрытого сценария 2 по сравнению со сценарием 1 выше моста формируется больший пик, ниже – меньший. Аналогично развивается динамика уровня в точках выше и ниже железнодорожного моста, только в более выраженной форме – выше него при сценарии 2 пик более чем на 2 м превышает пик уровня при сценарии 1. На террасных точках существенное различие наблюдается на точках 5 и 6 в виде большего пика уровня и более раннего затопления при сценарии 2. На точках ниже автомобильного моста (9, 10, 11, 12 и 13) закупоривание мостов приводит к более позднему началу затопления (на 2–2,5 часа). По рассматриваемым террасным точкам максимум затопления приходится на ночные часы с 6 на 7 июля и достигает полутора метров. Таким образом, затоплению подвергаются первые этажи строений, расположенных на надпойменных террасах.

Более подробно влияние замусоренности мостовых проёмов на динамику уровня воды при прохождении паводка можно проследить на продольных профилях вдоль русла реки (рисунок 2.24). Рассчитанные профили показывают динамику уровней между точками 1 и 10, где наблюдается существенная разница в максимальных уровнях в зависимости от сценариев. Для сравнения на графике были совмещены профили водной поверхности в различное время. Было выбрано два временных отрезка: между 15:30 и 18:30 6 июля с временным шагом 30 минут и между 23:00 6 июля и 02:00 7 июля с шагом в 1 час. Первый временной отрезок характеризует динамику первого скачка расходов и процессы переполнения временных водохранилищ во втором сценарии. Второй отрезок включает второй, более мощный скачок расхода воды, который привёл к максимальным уровням около 6:00 7 июля. Протяжённость профиля составила 7,5 км, падение реки – 20 м, таким образом, средний уклон русла здесь составил 0,0027 (2,7 м на 1 км длины). В сценарии 1 мостовые проёмы полностью открыты, поэтому на продольных профилях не выражены подпоры мостов. Скачок расходов в первый период не

привёл к сильному подъёму уровня практически до автомобильного моста в створе ул. Новороссийской, ниже которого подъём уровня за это время достигал 7 м. Второй временной отрезок привёл к равномерному подъёму уровня вдоль всего русла на 1–1,5 метров. Интенсивный подъём уровня в верхней части продольного профиля наблюдался в предшествующие первому отрезку часы, в средней части – в последующие часы, в нижней (ниже автомобильного моста) – во время первого рассматриваемого временного отрезка.

Второй сценарий, описывающий прохождение паводка при закрытых мостовых проёмах, на продольных профилях формирует высокие и протяжённые подпоры перед мостами. В первый временной промежуток подпор перед железнодорожным мостом формирует уровень воды на 1,5 км вверх по реке. Между 15:30 и 16:00 временное водохранилище переполняется, что приводит к формированию подпора у автомобильного моста, горизонтальный уровень от которого простирается на 2 км выше. Между 18:00 и 18:30 второй подпор также переполняется и формирует за это время на нижнем бьефе моста уровень 4,5 м. Во второй временной промежуток вода поступает вниз по течению через сформированные два подпора, которые выделяются на всех продольных профилях этого сценария.

Сценарий 3 во время первого временного промежутка полностью повторяет динамику уровней первого сценария, так как мостовые проёмы полностью открыты. Между 20:00 и 23:00 они закупориваются, что приводит к формированию подпоров у обоих мостов в это время. Открытие проёмов уже после рассматриваемого времени приводит к спуску подпоров, что отчётливо видно на продольном профиле в 06:00.

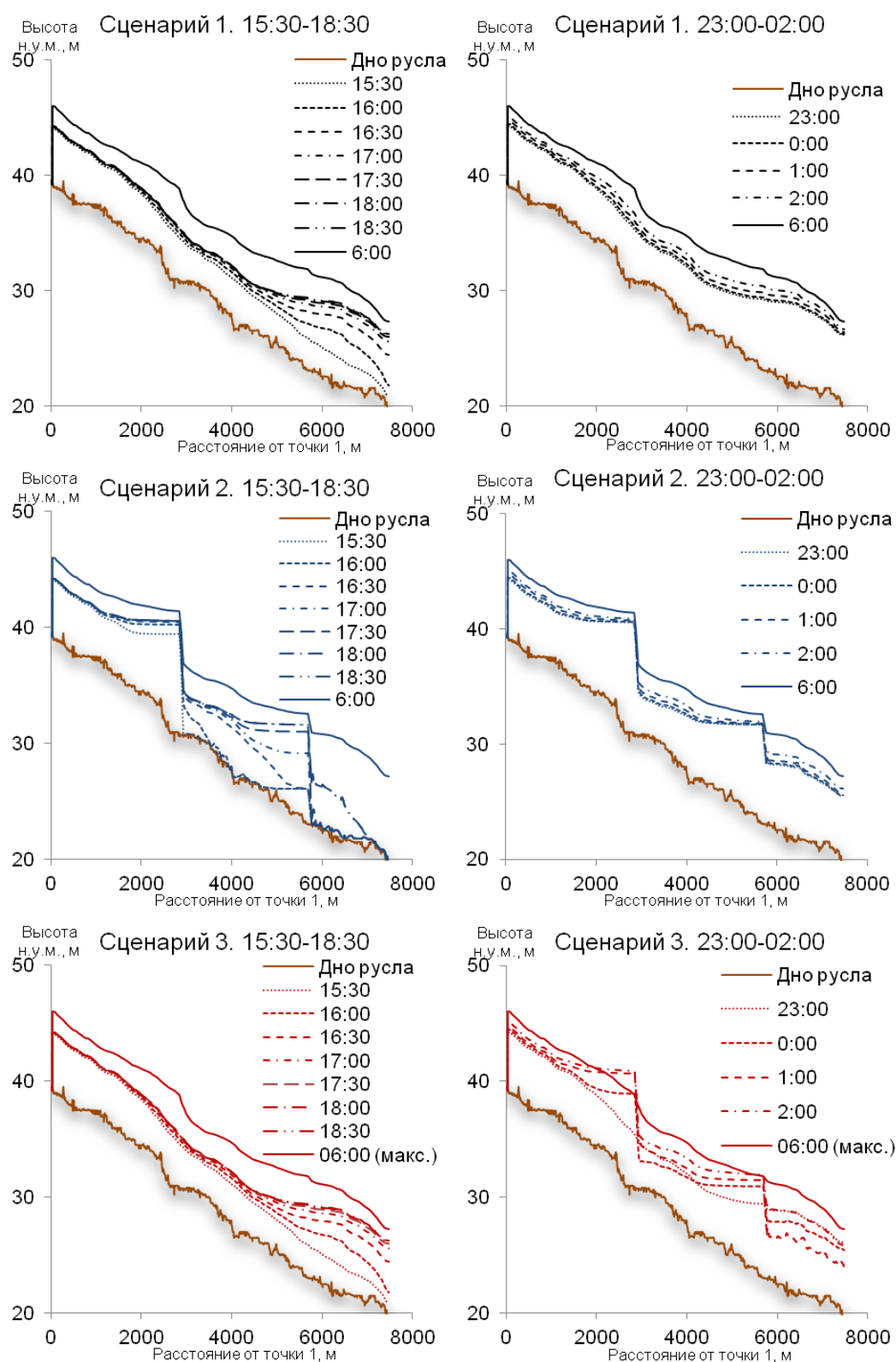


Рисунок 2.24. Динамика профилей водной поверхности по сценариям вдоль русла р. Адагум между точками 1 и 10 во время первого (15:30–18:30) и второго (23:00–02:00) скачка паводка.

Распределение времени затопления.

Одним из способов охарактеризовать прохождение сильного паводка является определение времени затопления территории. При расчётах во всех сценариях образовались обширные зоны затопления в речной долине. Расхождения во времени затопления различных частей долины могут характеризовать специфическое влияние пропускной способности мостовых проёмов. Рассчитанное распределение времени затопления при различных сценариях представлено на рисунке 2.25. При сценарии с «открытыми» мостами (сценарий 1) первые 14 часов расчёта привели к незначительному затоплению надпойменной террасы в южной части долины до прохождения железнодорожного моста. В последующие 2 часа была затоплена надпойменная терраса перед этим мостом и перед автомобильным мостом в створе ул. Новороссийской. С 16-го по 24-й час моделируемого времени затоплению подверглись центральные районы города – ниже ул. Газовой по течению. С 24-го по 28-й час затоплению подверглись верхние по течению части города, причём затопление происходило по направлению от русла реки.

При сценарии «закрытых» проёмов мосты играли роль дамб водохранилищ, что приводило к формированию обширных водоёмов перед ними с их последующим переполнением и переливанием воды через дамбы. Первые 14 часов происходило наполнение водоёма перед железнодорожным мостом. Затем в течение 2-х часов наполнялся водоём перед автомобильным мостом. При последующем его переполнении водный поток двигался уже не по руслу, а параллельно ему на расстоянии 500–1000 м от него по жилым кварталам на левой надпойменной террасе, что на короткое время привело к такой ситуации, когда середина надпойменной террасы затоплена, а прирусловая территория – нет.

При сценарии с «закрывающимися» проёмами мостов и их последующим прорывом распределение времени затопления территории схоже с первым сценарием – при более поздней (на 23–24 час) выраженности затопляющего потока второго сценария. Затопление надпойменных террас началось в центре города, в районе моста на ул. Синева, в направлении от русла. Заполнение левой

террасы происходило в направлении от моста параллельно руслу, как во втором сценарии, однако это происходило на 5–7 часов позже, чем во втором сценарии.

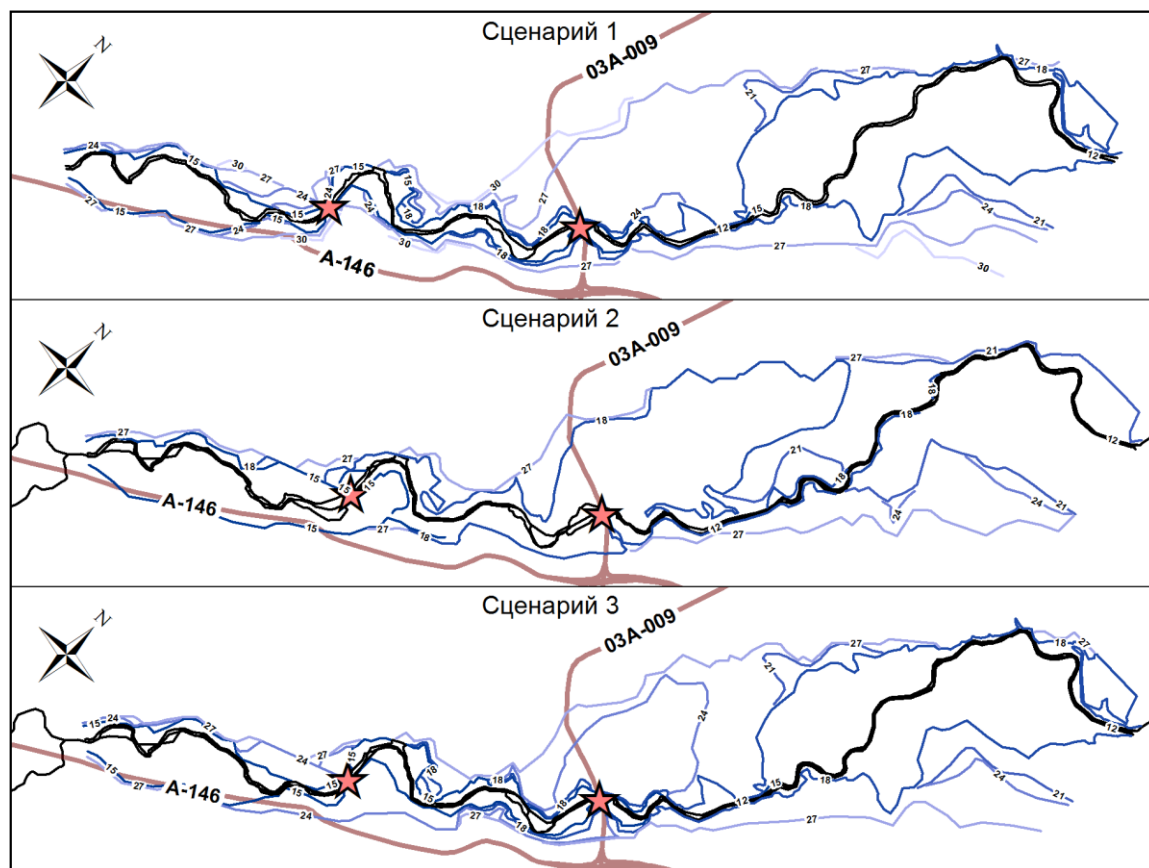


Рисунок 2.25. Распределение времени затопления при различных сценариях.

Распределение скорости потока

Кроме величины пиков уровня, времени их наступления и времени начала затопления влияние режима замусоренности мостовых проёмов, как и других возможных факторов прохождения паводков, выражается также в скорости течения воды. Полученные в ходе расчётов по трём сценариям распределения по зонам затопления максимальных скоростей потока позволили сравнить их между собой (рисунок 2.26). Как и с максимальными уровнями, основные различия приурочены к территориям вблизи мостов.

Сравнение «открытого» и «закрытого» сценариев по распределению максимальных скоростей водного потока показывает, что в первом из них в русле, на пойме и на припойменных участках затопляемой надпойменной террасы

скорости в окрестностях имитируемых мостов выше, чем в «закрытом» сценарии. Разница здесь не превышает 1 м за исключением руслового участка непосредственно под железнодорожным мостом, где она локально возрастает до 3 м. На более отдалённых от русла участках надпойменных террас наблюдается обратное: скорость потока при «закрытом» сценарии больше, чем при «открытом». Аналогичный характер распределения разницы между максимальными скоростями наблюдается и в случае «В», когда рассматривается разница между «закрытым» и «закрывающимся» сценариями. Сравнение сценариев «открытого» и «закрывающегося» показывает, что закупоривание и последующее открытие мостовых проёмов приводит к увеличению скорости потока более чем на 0,1 м/с непосредственно ниже имитируемых мостов. В целом, на большей части затопляемой территории различия в максимальных скоростях течения не превышают 0,1 м/с. Закрытие мостов приводит к усилению скорости потока в непосредственной близости от имитируемых мостов, длительное закупоривание мостов приводит к меньшим максимальным скоростям в прирусловых участках и к большим на надпойменных террасах.

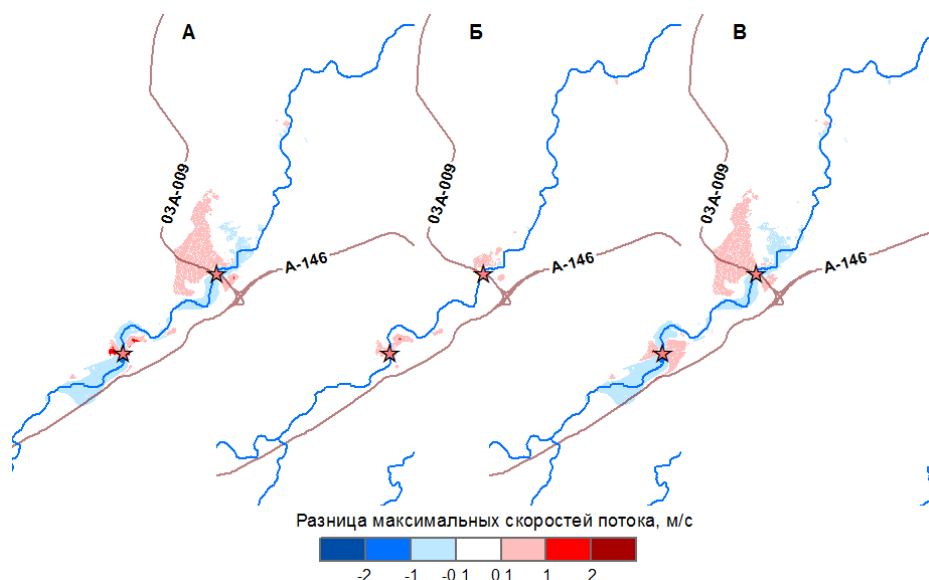


Рисунок 2.26. Разница максимальных скоростей потока, А – между сценарием 2 и 1; Б – между сценарием 3 и 1; В – между сценарием 2 и 3 (сценарий 1 – «открытые» проёмы мостов, сценарий 2 – «закрытые», сценарий 3 – «закрывающиеся»).

3. СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ОПАСНОСТИ ДОЖДЕВЫХ ПАВОДКОВ

3.1. Мероприятия в мире

Наводнения сопровождали человеческую деятельность на протяжении всей истории. Ещё в местах зарождения цивилизации в Египте, Месопотамии, долинах Инда и Хуанхэ они приводили к крупному ущербу. Попытки контролировать паводки предпринимались уже тогда. Как правило, это означало сооружение противопаводковых сооружений (дамб) и развитие ирригационных систем. В Нидерландах, начиная со средних веков, борьба с наводнениями (в низовьях Рейна и Шельды) сочеталась с противостоянием повышению уровня моря и с осушением территорий ниже уровня моря. С развитием производительных сил масштабы и распространение противопаводковых сооружений увеличились, однако вырос и потенциальный ущерб от неконтролируемых паводков. Так, крупнейшие наводнения XX века в Китае и других густонаселённых странах унесли жизни миллионов людей. На современном этапе меры по минимизации ущерба от паводков включают в себя не только разнообразные сооружения, но и комплекс мероприятий для населения, местных властей и служб. Для снижения риска ущерба от паводков используют следующие меры:

1. Строительство различных типов дамб и сооружений, защищающих территорию от затопления.
2. Организация сооружений по распределению паводковой воды (сухих ёмкостей или каналов для перехвата или отвода паводковой воды).
3. Создание систем контроля паводков (прогнозирования, раннего оповещения населения, эвакуации и др.).
4. Законодательные меры (правила землепользования, системы страхования и финансового возмещения ущерба, стимулирование инициатив по защите домовладений от паводка и др.).

Традиционно минимизация ущерба от паводков сводилась к сооружению дорогостоящих масштабных сложных противопаводковых сооружений, таких как в Роттердаме [86], Новом Орлеане [87] или на реке Хуайхэ [88] в Китае. Всё более

очевидно, что в управлении рисками паводкового ущерба можно обойтись без широкомасштабного строительства [89]. Большой вклад в сокращение ущерба могут внести меры по снижению антропогенного влияния на прохождение паводков, например, планирование землепользования на затопляемых землях. Яркий пример этому – Кейптаун [90]. Кроме того, можно снизить уязвимость населения к наводнениям такими мерами, как: подготовка убежищ, систем предупреждения и эвакуации населения, прогнозирование паводков, введение особых строительных норм на затопляемых территориях, создание эффективной системы страхования имущества. Эффективность таких мер была показана паводками в Бангладеш [91], европейских Альпах и в Китае.

В развитых странах разрабатываются специальные программы по снижению риска паводков на государственном уровне. В Великобритании такая стратегия поддерживается Департаментом окружающей среды, продовольствия и сельского хозяйства [92]. В ЕС принята общая директива оценки управления риском наводнений [93]. В США постоянно развивается управление наводнениями [94], [95], [96].

В целях снижения ущерба от прохождения внезапных паводков (в иностранной литературе «flashflood») предпринимаются следующие меры:

1. Строительство противопаводковых сооружений (сооружений, которые направляют потоки и уменьшают их опасность).
2. Картирование зон опасности.
3. Развитие метеорологического и гидрологического прогнозирования.
4. Создание и развитие систем раннего оповещения населения.
5. Обучение населения действиям во время паводка.
6. Учения служб спасения и эвакуации.
7. Маркирование на местности паводкоопасных мест.
8. Введение особых правил землепользования на подверженных паводкам территориях и зонах.

9. Введение и контроль соблюдения строительных норм – укрепление существующих и строительство новых объектов с учётом опасности прохождения сильных паводков.

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, относящиеся в наибольшей степени к геоэкологии: эффективность создаваемых противопаводковых сооружений (трансформация морфологии русла), картирование рисков опасности внезапных паводков в окрестностях Крымска и предлагаемая система гидрологического прогнозирования на водосборе.

3.2. Оценка эффективности преобразования русла в окрестностях реки Адагум

После прохождения паводка 6–7 июля 2012 года, вызвавшего широкий общественный резонанс, были проведены совещания по ликвидации ущерба на местном, региональном и федеральном уровнях, в том числе были изданы Указ Президента России от 17 июля 2012 г. № 1015 и распоряжения главы Краснодарского края от 23 июля 2012 г. № 167-р [97], [98]. На основании этих документов Министерство гражданской обороны, чрезвычайных ситуаций и региональной безопасности Краснодарского края заказало ОАО «Кубаньводпроект» разработку проектной и рабочей документации по объекту «Защита территорий Крымского района Краснодарского края от негативного воздействия вод рек Адагум, Неберджай, Баканка». В рамках этого проекта предусматривается ряд мероприятий в бассейне р. Адагум:

1. Канализация русла реки Адагум.
2. Канализация русла реки Неберджай.
3. Канализация русла реки Баканка.

4. Техничко-экономическое сравнение вариантов защиты («сухое» водохранилище, обводной канал и др.).

Кроме этого, в проект дальнейшего развития системы противопаводковых мер включены планы сооружения сухих водохранилищ для перехвата паводковой воды в долине Прямой Щели и возможность строительства отводящего канала в обход Крымска, однако конкретных характеристик этих объектов ещё нет.

В условно-естественном состоянии, с учётом морфологии речной долины во время и непосредственно после прохождения паводка 2012 года, р. Адагум от слияния Баканки и Неберджая до впадения в Варнавинское водохранилище относится к водотокам с ограниченным меандрированием, на который влияют различные гидротехнические сооружения. Длина участка составляет 20 км по руслу или 16 км по прямой. Долина реки здесь имеет корытообразную форму шириной до 3 км, увеличивающуюся вниз по течению с небольшим уклоном. На дне долины меандрирует русло реки с высокими (до 6 м), крутыми, сложенными суглинками, деформируемыми берегами. Пойма во многих местах заросла пойменными деревьями и кустарником. Эта растительность во время сильных паводков увлекается водным потоком вниз по течению и составляет один из источников карча. Её видовой состав характеризуется быстрорастущими влаголюбивыми пойменными породами, которые быстро восстанавливают растительный покров после паводка. Ширина русла на большей части реки составляет до 40–45 м, во время межени оно не заполняется, на его дне наблюдаются сильно меандрирующие слабые водные потоки. В межень водные потоки на многих притоках Адагума пересыхают или не выходят на поверхность. В русле наблюдаются плёсы, где глубина в межень может достигать 1,5 м, при сильной межени поток превращается в цепочку несообщающихся водоёмов. Дно русла сложено гравием, галькой, дрсвой. В городской черте склоны местами укреплены бетонным откосом. Русло пересекают пешеходные и автомобильные мосты. В пределах г. Крымск долина реки представлена двумя большими излучинами, которые формируют обширные надпойменные террасы сначала на левом, а затем на правом берегу. Эти террасы были затоплены во время паводка 2012 года. Основные плановые деформации

закljučаются в сползании излучин по течению реки без существенного изменения их плановых очертаний и размеров. В русле наблюдаются довольно значительные побочни, занимающие в меженный период большую часть русла и расположенные в шахматном порядке. При прохождении паводков они затапливаются, и русло принимает более прямолинейный вид. Побочни в это время играют роль перекатов. В период паводков сила и продолжительность повышенных расходов определяют интенсивность переформирования морфологии русла.

После прохождения паводка в неотложном порядке проводились работы по расчистке русел рек Адагум, Баканка и Неберджай. Канализация (трансформация морфологии) русел рек проводится в целях увеличения пропускной способности в период прохождения паводков 1%-ной обеспеченности. На участке русла р. Адагум канализация рассчитана на прохождение паводка расходом $1040 \text{ м}^3/\text{с}$ и состоит из трёх участков: с трапециевидным поперечным сечением выше плотной застройки Крымска по течению (на протяжении 6061 м), с лотком прямоугольного сечения в плотной застройке (на протяжении 4278 м) и с трапециевидным руслом ниже Крымска (6537 м). Русло с трапециевидным поперечным сечением означает формирование плоского земляного дна шириной 31–45 м (возрастает вниз по течению), с бортами высотой 5,8 м и шириной 11,6 м; на бортах сооружаются дамбы обвалования с верхней площадкой шириной 4,5 м (рисунок 3.1). В центральной части города Крымска река Адагум застроена жилыми и промышленными зданиями. Расширение в этой части города русла реки без больших объемов сносимых зданий и сооружений невозможно. Поэтому в центральной части города на длине 2,131 км русло выполняется в виде лотка из монолитного железобетона. Ширина лотка в свету 35,0 м. Толщина вертикальных стенок лотка – от 0,3 м сверху до 0,75 м в основании. Толщина днища колеблется от 0,75 до 0,45 м. Днище лотка имеет уклон i к центру лотка, равный 0,043. Как и в земляном русле, по обоим берегам реки устраиваются эксплуатационные проезды шириной 4,5 м. Учитывая, что ширина реки по дну в земляном русле и в бетонном лотке неодинакова, для создания благоприятных гидравлических условий на выходном участке лотка предусмотрен переходной участок из монолитного железобетона с водобойным колодцем

глубиной 1,5 м. Угол расширения русла составляет 22° . На входном участке имеется переходная зона, выполненная в каменном креплении. На участках русла, обвалованных дамбами, предусматривается устройство ливнеотводных сооружений для отведения ливневых стоков с прилегающих территорий в русло реки.

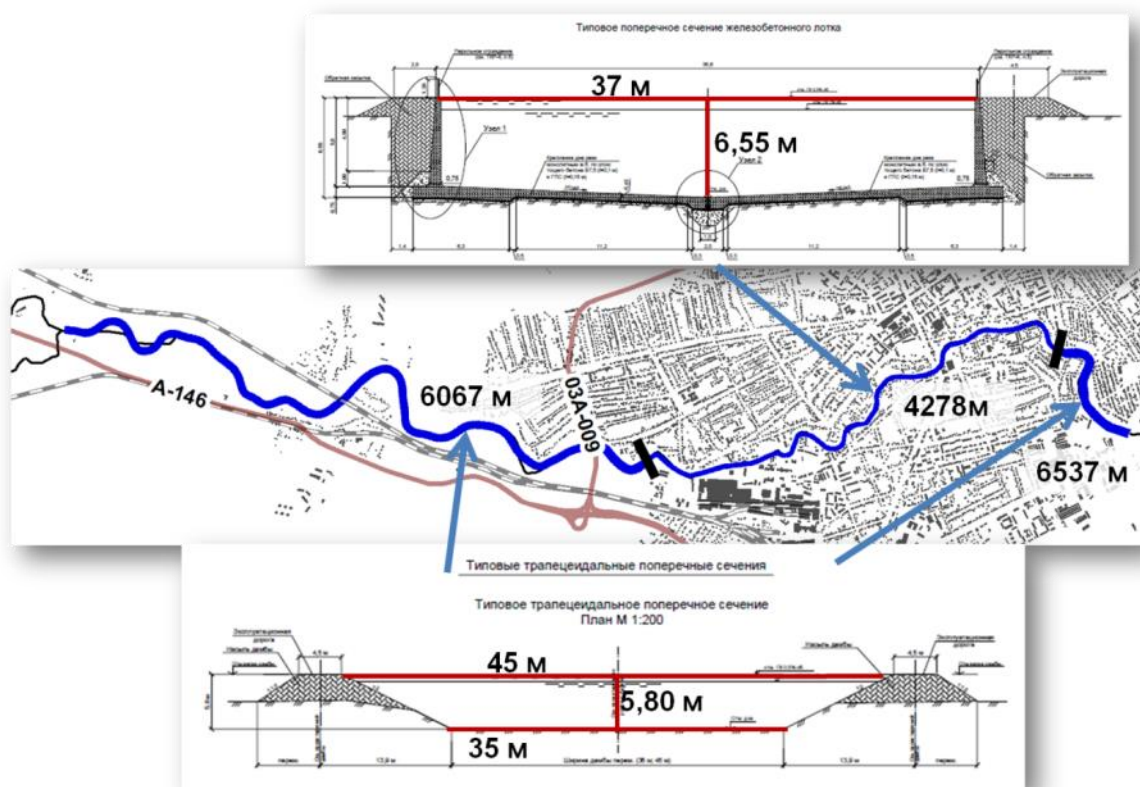


Рисунок 3.1. Сечения трансформации русла р. Адагум.

Разработанная ОАО «Кубаньводпроект» проектная и рабочая документация легла в основу электронного аукциона по выносу коммуникаций и канализации рек Адагум, Неберджай и Баканка на общую сумму более 2 млрд. руб. Документация по соответствующим лотам находится в открытом доступе на портале zakupki.gov.ru [82], [83], [84]. Её использование позволило построить цифровую модель трансформации русла реки Адагум и оценить изменения условий прохождения паводка.

На основании топографических планов трансформации (в используемой документации «канализации») русла реки Адагум, разработанных ОАО «Кубаньводпроект», а также топографических карт ГГЦ масштаба 1:25 000, была

построена цифровая модель местности с изменённым руслом. Для определения роли мостовых проёмов на прохождение паводка были проведены расчёты по трём сценариям:

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, а со второго часа расчётного периода – 0 м для обоих мостов).

3. Проёмы мостов открыты, как в первом сценарии, до 21:00 6 июля, затем закрываются наглухо к 00:00, затем прорываются в 3:00 7 июля; свободная высота составляет 8 и 6,5 м соответственно.

В рабочей и проектной документации, разработанной «Кубаньводпроект», декларируется, что канализование русла позволит уберечь от затопления застроенные территории Крымска и его окрестностей при прохождении паводка 1%-ной обеспеченности ($1040 \text{ м}^3/\text{с}$). Перед рассмотрением сценариев были проведены расчёты прохождения паводка установившегося расхода (постоянного по времени) $1040 \text{ м}^3/\text{с}$ по канализованному руслу. Показатели шероховатости канализованного дна при расчётах соответствовали проектным: 0,03 для трапецевидного земляного русла и 0,018 для бетонного лотка в плотно застроенной части Крымска. Проёмы мостов при этих расчётах принимались свободными, однако сама конструкция мостов соответствовала состоянию на 2012 год.

Результаты расчётов прохождения паводка 6–7 июля 2012 года в Крымске рассматривались с точки зрения формирования зон затопления, динамики затопления на различных элементах речной долины, максимальных скоростей водного потока.

Зоны затопления. В рабочей документации по канализации русла реки Адагум рассчитывается, что паводок вероятностью 1 раз в 100 лет соответствует расходу $1040 \text{ м}^3/\text{с}$ и ему не будут противостоять серьёзные механические препятствия. Другими словами, канализованное русло не будет зарастать

растительностью, проёмы мостов будут открытыми, шероховатость дна русла не будет увеличиваться, а глубина потока при таких условиях не превысит 5,8 м на участках земляного трапецевидного русла и 6,55 м на участке бетонного лотка.

Зоны затопления, рассчитанные в естественном и канализованном русле по сценарию 1 (с открытыми проёмами мостов), представлены на рисунке 3.2. При естественном русле зона затопления охватывает большую часть Крымска, в значительной части зоны уровень затопления превышает 1 м. Левобережье Крымска будет затоплено вплоть до ул. Луначарского, правобережье – примерно до ул. Победы. В условиях канализованного русла зона затопления охватывает планируемую область и некоторые прилегающие территории. Затопление более чем на 1 м приурочено к территориям долины перед Крымском, однако они не являются застроенными. Небольшое затопление затронет самый центр города, район рынка и стадиона, однако уровень подъёма воды здесь редко превышает 1 м. В целом, большая часть застроенной площади города при таких условиях не подвергнется затоплению при прохождении паводка 6–7 июля 2012 года.

Полученные результаты показывают, что, с точки зрения площади и глубины, канализованное русло показывает эффективность в условиях открытых проёмов мостов и снижает средний уровень воды, но не сокращает зону затопления при условии закупоривания мостовых проёмов мусором.

В зоне затопления различия максимального уровня между естественной и трансформированной морфологией русла наиболее существенны вдоль русла, особенно перед мостами, а также на левобережье. При этом канализация русла приводит к изменению затопления русла.

При сценарии 2 проёмы мостов в Крымске (железнодорожный мост, по ул. Новороссийской, по ул. Синева) оказываются закупоренными мусором, что приводит к снижению их пропускной способности и к формированию подпора выше мостов. В таком случае рассчитанные зоны затопления показывают (рисунок 3.3) небольшую разницу в сформированной зоне затопления при естественном и канализованном руслах. Наибольшие различия в уровне воды рассчитанных зон относятся к участкам русла непосредственно после закупоренных мусором мостов:

при канализованном русле уровень воды в этих местах снижен. Однако подпор перед мостами формируется не меньше, чем при естественном русле. В целом, для этого сценария зоны затопления примерно одинаковы и на большей части зоны затопления максимальные уровни изменяются менее чем на 1 м.

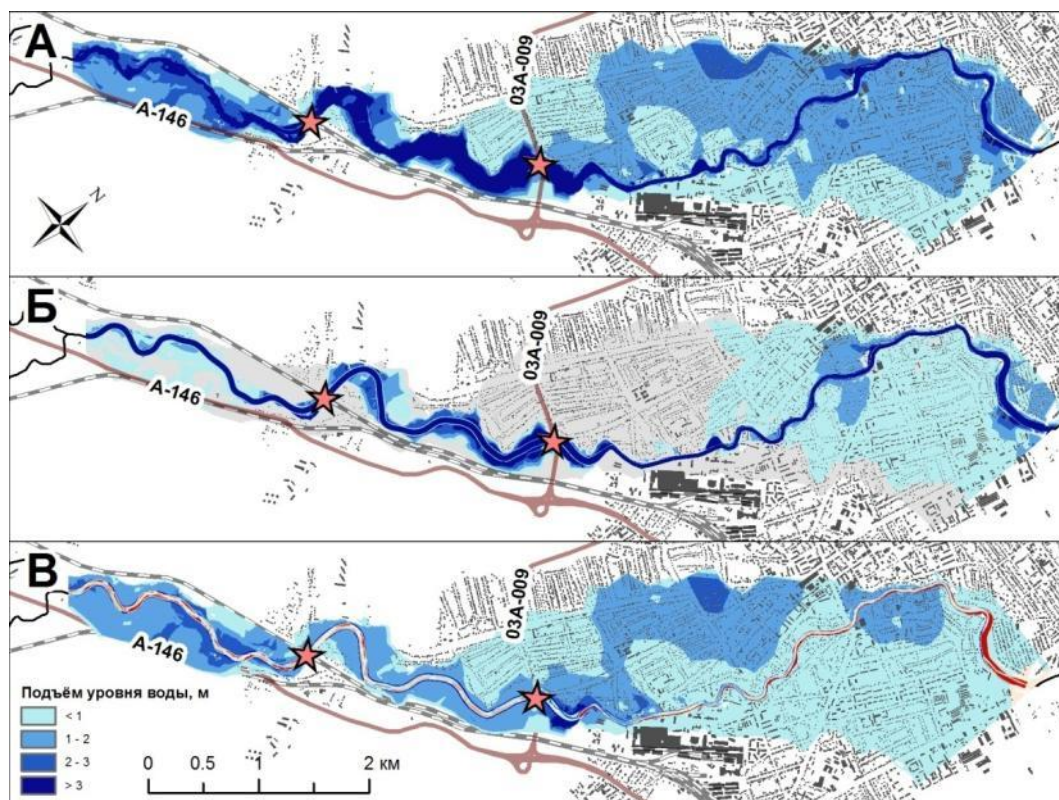


Рисунок 3.2. Глубины затопления территории в условиях открытых проёмов мостов при естественном (А), канализованном (Б) русле и разница между ними (В).

Полученные результаты показывают, что, с точки зрения площади и глубины, канализованное русло показывает эффективность в условиях открытых проёмов мостов и снижает средний уровень воды, но не сокращает зону затопления при условии закупоривания мостовых проёмов мусором.

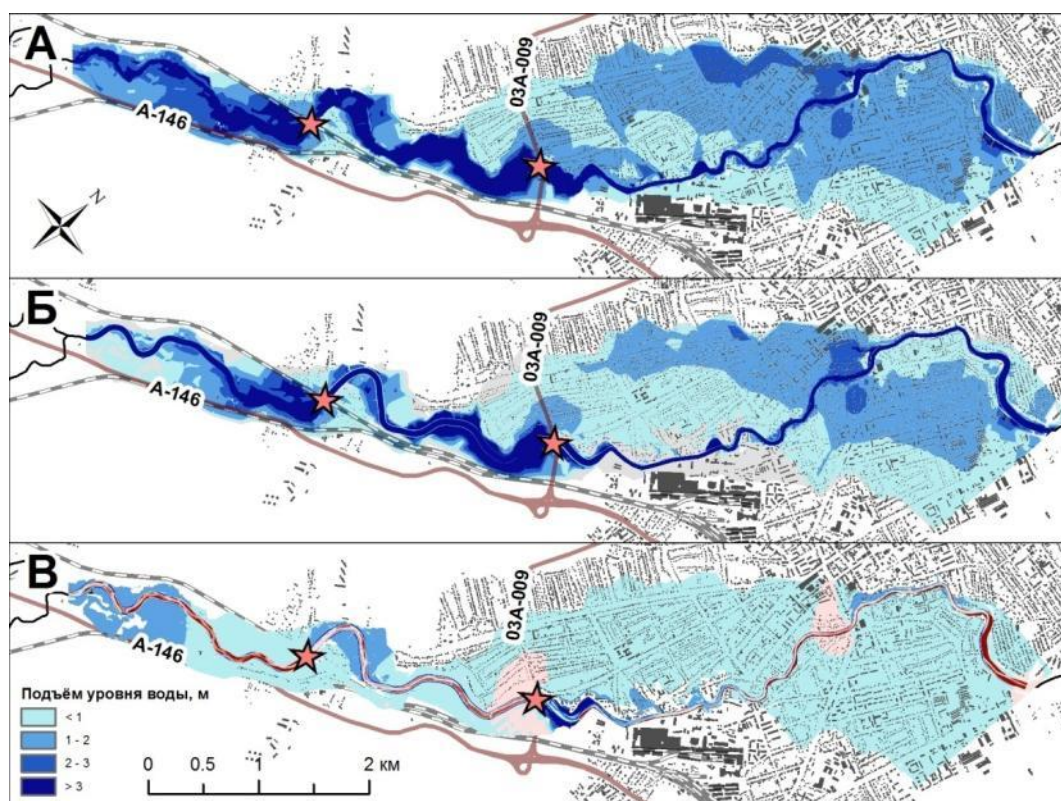


Рисунок 3.3. Глубины затопления территории в условиях закупоренных проёмов при естественном (А), канализованном (Б) русле и разница между ними (В).

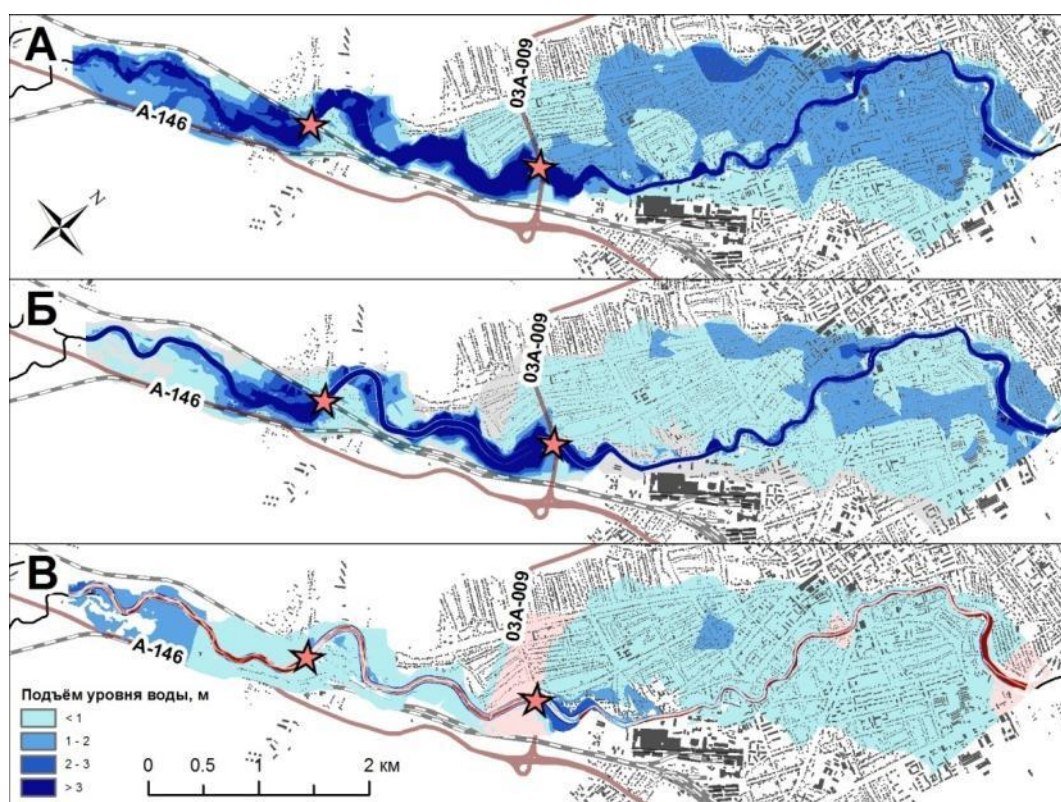


Рисунок 3.4. Глубины затопления территории в условиях сценария 3 при естественном (А), канализованном (Б) русле и разница между ними (В).

Динамика затопления. Рассчитанные для трёх сценариев зоны затопления ранжировались по времени затопления. В условиях первого сценария (рисунок 3.5) в естественной морфологии русло Адагума заполнилось в течение первых 24 часов расчётного паводка, и произошло частичное затопление поймы, обусловленное выходом водного потока из русла при его резком повороте в верхней части долины и низких прирусловых бортов в центре города. После этого в течение двух часов затоплению подвергалась большая часть пострадавшей территории города. Затопление в условиях открытых мостовых проёмов развивалось в перпендикулярном руслу направлении, что говорит о неспособности естественного русла вместить паводковый поток большого расхода ($1500 \text{ м}^3/\text{с}$), особенно при такой извилистости. Нижняя часть правобережья подверглась затоплению позже всего – после 27 часов, что соответствует 03:00 7 июля. При этом же сценарии в условиях канализованного русла застроенная часть города затапливается гораздо позже, ближе к 27 часам. При условии того, что уровень воды здесь не превысил 1 метра, такое затопление не является катастрофическим. Это позволяет заключить, что канализованное русло в условиях открытых проёмов существующих мостов справилось бы с паводковым потоком 6–7 июля 2012 г.

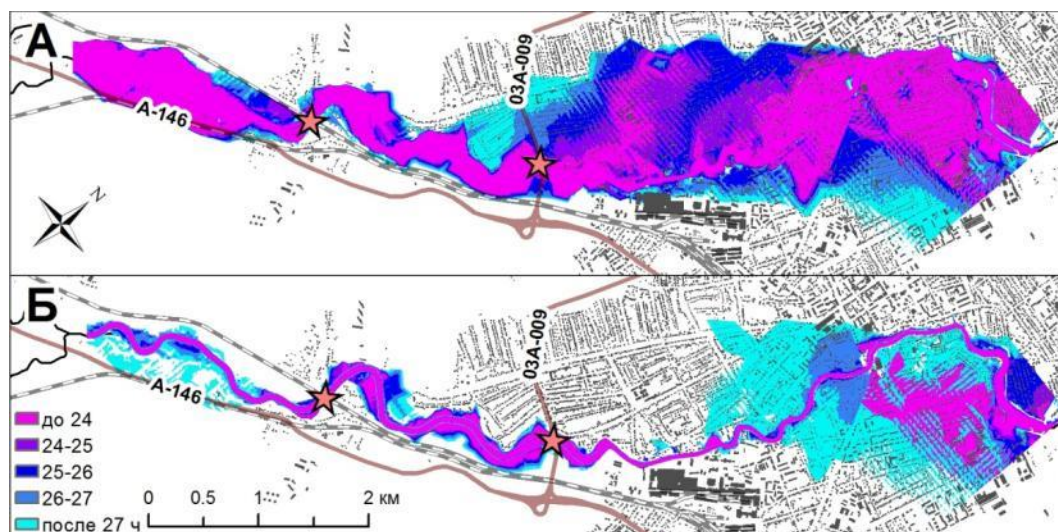


Рисунок 3.5. Время затопления территории в условиях открытых проёмов мостов при естественном (А) и канализованном (Б) руслах.

Тот же паводок при условиях закупоренных проёмов мостов приводит к ускоренному затоплению территории (рисунок 3.6). В условиях естественного русла уже к 16-му часу формируются подпоры перед железнодорожным и автомобильным (в створе ул. Новороссийской) мостами. На 17-й час подпор заполняется и приводит к затоплению левобережья поймы по улицам города. За последующие два часа будет затоплена практически вся левобережная пойма, а затем за час и правобережная пойма. По сравнению с первым сценарием направление затопления имеет другой характер: подпор, образованный перед первым автомобильным мостом, переполняется, вода переливается на протяжении всей оси ул. Новороссийской и быстро по асфальтированным улицам (Луначарского, Советской, Лагерной и др.) затапливает левую пойму значительно раньше. Таким образом, основной водный поток движется не по руслу реки, а распластывается по улицам на левобережной пойме. В условиях канализованного русла механизм действует схожим образом, только немного быстрее. К 19-му часу затапливается примерно половина левобережной поймы, остальная затопленная часть Крымска – в течение следующих часов.

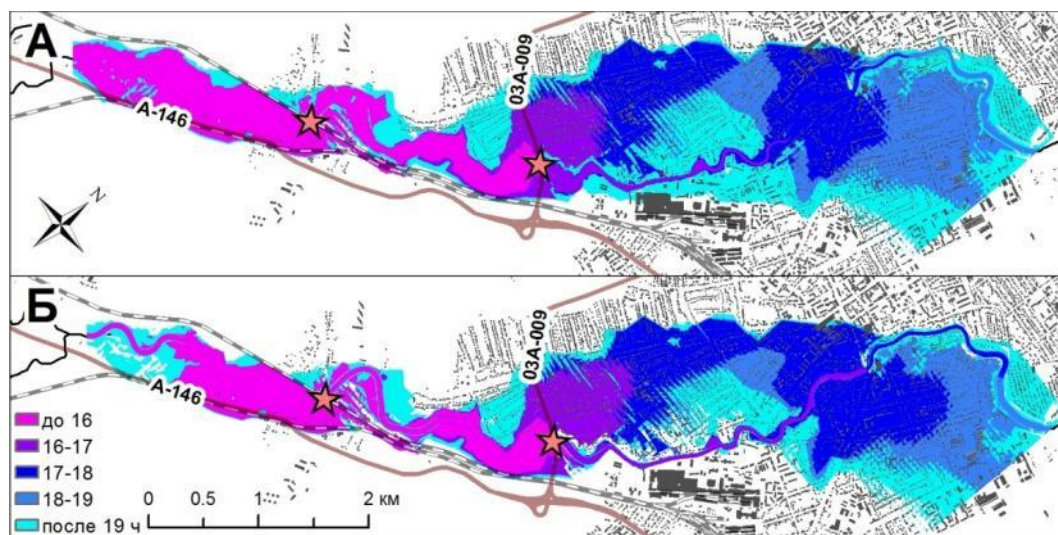


Рисунок 3.6. Время затопления территории в условиях закупоренных проёмов мостов при естественном (А) и канализованном (Б) руслах.

Третий сценарий, с точки зрения динамики затопления, территории является переходным (рисунок 3.7). Основное затопление происходит после 23-х часов с

начала расчета паводка, как в первом сценарии, однако механизм затопления поймы напоминает второй сценарий с переливом воды из подпора. В естественном русле затопление до 23-го часа охватывает прирусловую территорию и часть города в районе стадиона. Наблюдается выход воды на надпойменную террасу при резком повороте русла ниже автомобильного моста в створе ул. Новороссийской. В условиях трансформированной морфологии русла механизм затопления левобережья соответствует второму сценарию – без перелива воды из русла при повороте, однако затопление происходит значительно позже (на 6–8 часов).

Рассмотренные выше сценарии показали, что трансформация русла приведёт к изменениям в механизмах затопления поймы. Во всех сценариях в новых условиях не происходит значительного перелива воды на пойму при поворотах русла.

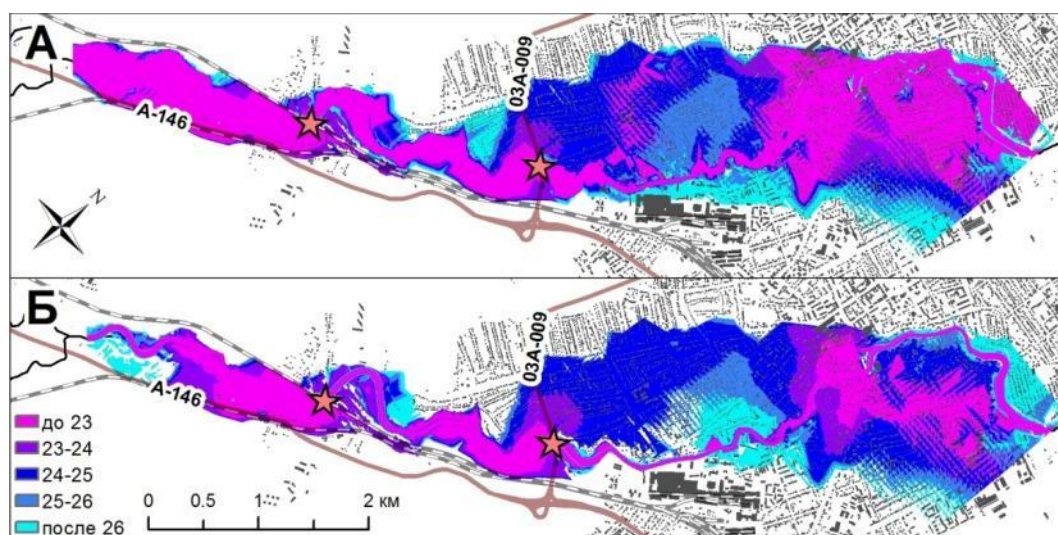


Рисунок 3.7. Время затопления территории в условиях сценария 3 при естественном (А) и канализованном (Б) руслах.

Скорости водного потока. Наряду с уровнем воды в зоне затопления и временем его затопления важным фактором, с точки зрения опасности, является скорость течения паводкового потока. В связи с этим для двух сценариев состояния мостов также были рассчитаны максимальные скорости течения паводковых потоков. Разработанная ОАО «Кубаньводпроект» трансформация морфологии русла была рассчитана на рост русловых скоростей водного потока для увеличения пропускной способности русла и минимизации зоны затопления. Кроме

непосредственно геометрических изменений профиля русла подразумевается изменение его шероховатости: снижение до 0,03 в земляном русле и до 0,018 в бетонном лотке. На рисунке 3.8 представлено распределение максимальных скоростей для естественного и канализованного русла с учётом этих изменений. В естественных условиях скорость течения при открытых мостовых проёмах достигает максимальных значений в русле непосредственно перед ключевыми мостами и после них – до 2 м/с. На большей части русла максимальная скорость потока находится в пределах 1–1,5 м/с, достигая 2 м/с в местах резких поворотов или сильного сужения русла. На большей части зоны затопления максимальные скорости находятся в пределах 0,5–1 м/с, а по краям падают ниже 0,5 м/с. После трансформации морфологии долины русловые скорости водного потока по всей длине превышают 2 м/с, в то время как на затопленной надпойменной террасе скорости не достигают 0,5 м/с.

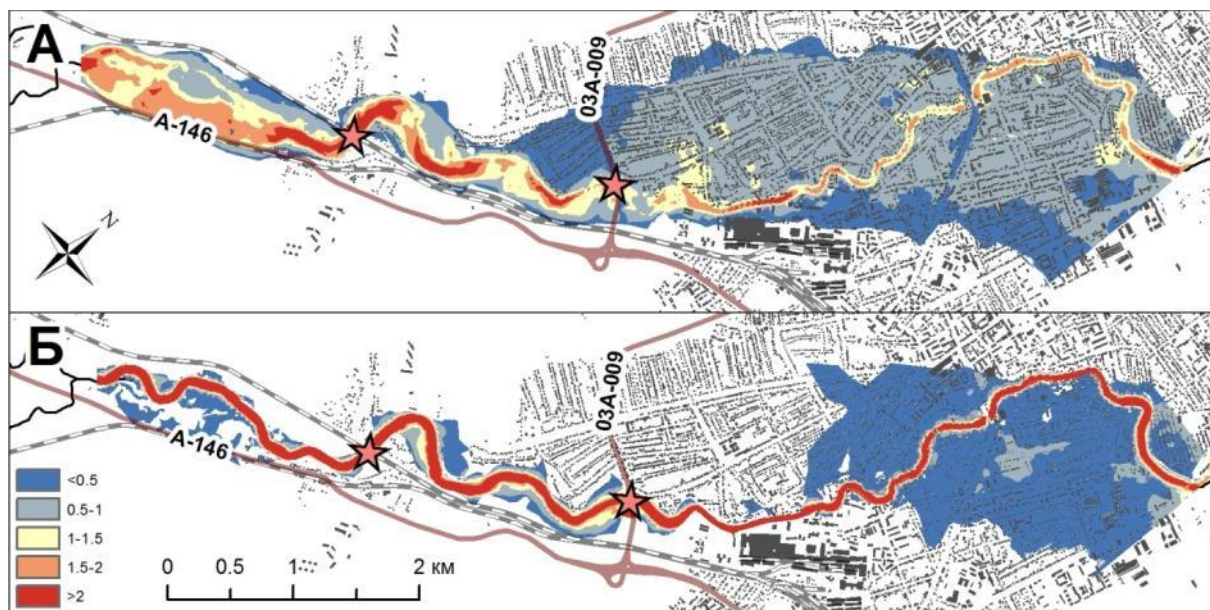


Рисунок 3.8. Максимальные скорости течения в условиях открытых проёмов мостов при естественном (А) и канализованном (Б) руслах.

При втором сценарии в условиях естественного русла распределение максимальных скоростей по зоне затопления имеет схожий характер, как и в первом сценарии (рисунок 3.9). В зоне подпора мостов максимальные скорости водного потока несколько ниже, после подпоров – значительно выше при обоих вариантах

морфологии русла. Зоны повышенных скоростей распластываются вдоль закупоренных мостов. В условиях канализованного русла скорости водного потока в русле значительно превышают 2 м/с. На затопляемом право- и левобережье при естественных условиях распределение скоростей на большей части схоже с первым сценарием. При трансформированной морфологии максимальные скорости приурочены к руслу реки, на затопляемых пойменных территориях – к потоку прорыва подпоров. Однако водный поток в этих условиях медленнее, чем в естественном русле. Некоторые строения в городе усиливают водный поток, однако он практически не превышает 1 м/с. Наиболее опасными территориями, с точки зрения скорости водного потока, при обоих вариантах морфологии долины являются прирусловые территории перед Крымском. Трансформация русла снизила скорости на пойме перед железнодорожным мостом.

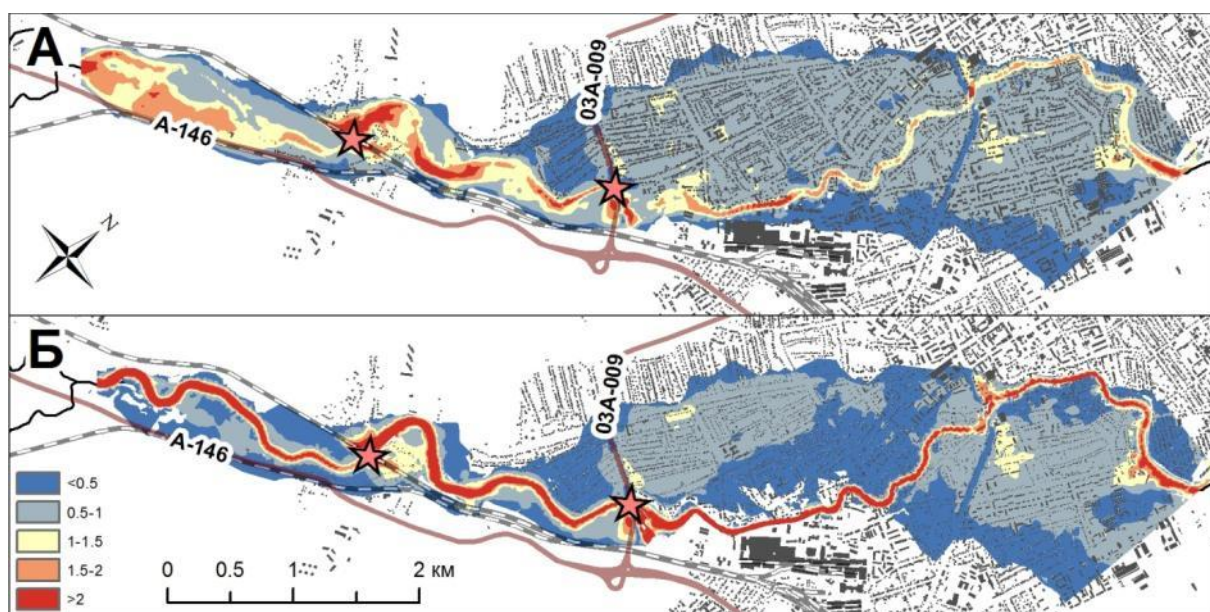


Рисунок 3.9. Максимальные скорости течения в условиях закупоренных проёмов мостов при естественном (А) и канализованном (Б) руслах.

Третий сценарий закупоривания мостовых проёмов приводит к результатам схожим со вторым: происходит затопление большей части Крымска при обоих вариантах морфологии русла, однако в новых условиях скорости водного потока на пойме несколько снижены (рисунок 3.10). Прорыв мостов приводит к повышению

максимальных скоростей в русле перед подпорами и к большому снижению скорости на лево- и правобережье.

В целом, с точки зрения площади, динамики затопления и максимальных скоростей потока, проводимая трансформация русла оправдана в условиях открытых мостовых проёмов, однако всё, что находится в русле, подвергается большей опасности, чем в естественных условиях в силу повышенных скоростей течения воды здесь. При условии закупоренных мостовых проёмов трансформация русла приводит к незначительному сокращению площади затопления и к снижению скорости затапливаемых водных потоков. При этом максимальные скорости в русле повсеместно превышают 2 м/с и могут достигать 6 м/с и более.

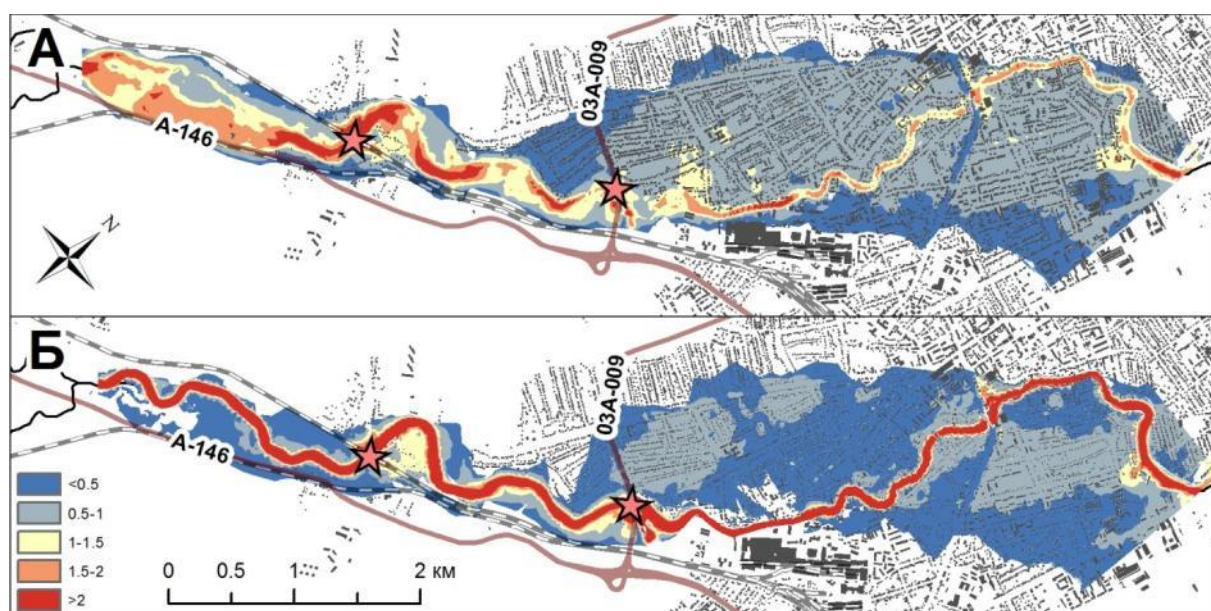


Рисунок 3.10. Максимальные скорости течения в условиях сценария 3 при естественном (А) и канализованном (Б) руслах.

Альтернативный вариант противопаводковой защиты Крыма

Изменение морфологии русла и снижение его шероховатости не являются единственными способами возможной эффективной защиты территории от паводков.

В июне 2013 года в Центральной и Западной Европе наблюдались продолжительные и интенсивные осадки, приведшие к наводнениями на обширной территории. Сильный подъём уровня наблюдался на крупнейших реках региона – Рейне, Эльбе/Лабе, Дунае. Опасности подтопления подверглись многочисленные

крупные города по берегам этих рек в Германии, Чехии, Швейцарии, Австрии, Словакии, Венгрии, Бельгии и пр. Один из крупнейших подъёмов воды наблюдался на Дунае [97]. Наводнение привело к значительному ущербу, однако в некоторых районах благодаря противопаводковым мерам и сооружениям он был практически нивелирован, в частности в регионе Верхняя Австрия – муниципалитеты Грайн, Клостер-Нойбург, город Линц и др. Одним из решающих факторов снижения ущерба здесь стали противопаводковые сооружения – система Махланддам (MachlandDamm)[98]. Она сооружена для защиты левобережья Дуная в Верхней Австрии и состоит из ряда земляных насыпей и «мобильных» дамб (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11. Действие мобильной дамбы во время наводнения 4 июня 2013 года (муниципалитет Грайн, Верхняя Австрия, подъём уровня на 14,95 м [99]).

Особый интерес представляет собой опыт использования в рамках этой системы «мобильной» дамбы. На берегу посёлка через определённые расстояния сооружены крепления для нее. В местной дорожной службе на складах хранятся детали сборной конструкции. При угрозе опасного роста уровня воды в Дунае местная дорожная служба транспортирует и сооружает сборные конструкции водонепроницаемого забора – «мобильные» дамбы (рисунок 3.12)[100].



Рисунок 3.12. Сборка мобильной дамбы работниками дорожной службы (слева) [101], схема установки мобильной дамбы (справа) [102].

Исходя из этого, к приведённым выше расчётам по прохождению паводка 2012 года по естественному (к 2012 году) и трансформированному руслам были также проведены расчёты необходимой высоты «мобильной» дамбы для минимизации ущерба в Крымске. Для этого вдоль застроенной части берега реки в Крымске в расчётную сетку были введены линии возможной «мобильной» дамбы. Протяжённость гипотетической дамбы составляла 8000 м для левобережья и 6200 м для правого берега. При этом абсолютная высота дамбы колебалась от 40 м перед Крымском до 28 м для обоих берегов (рисунок 3.13). Это приводило к относительному превышению дамбы над бровкой берега на 6–15 м. Также подразумевалось, что мосты на время прохождения паводка перекрываются сооружениями «мобильной» дамбы. Для оценки необходимой высоты «мобильной» дамбы в целях защиты застроенной части города от наводнения 6–7 июля 2012 года на рисунке 3.13 показан продольный профиль максимальной глубины вдоль русла.

Полученная зона затопления и продольный профиль глубины затопления вдоль русла показывают, что для сдерживания паводка 6–7 июля 2012 года таким способом достаточно было возведение «мобильной» дамбы превышением до 10 метров над дном русла. При этом глубина затопления превысит 10 м перед железнодорожным мостом, т.е. до Крымска и мобильной дамбы; затопление у автомобильного моста в створе ул. Новороссийской достигнет высоты 9 м.

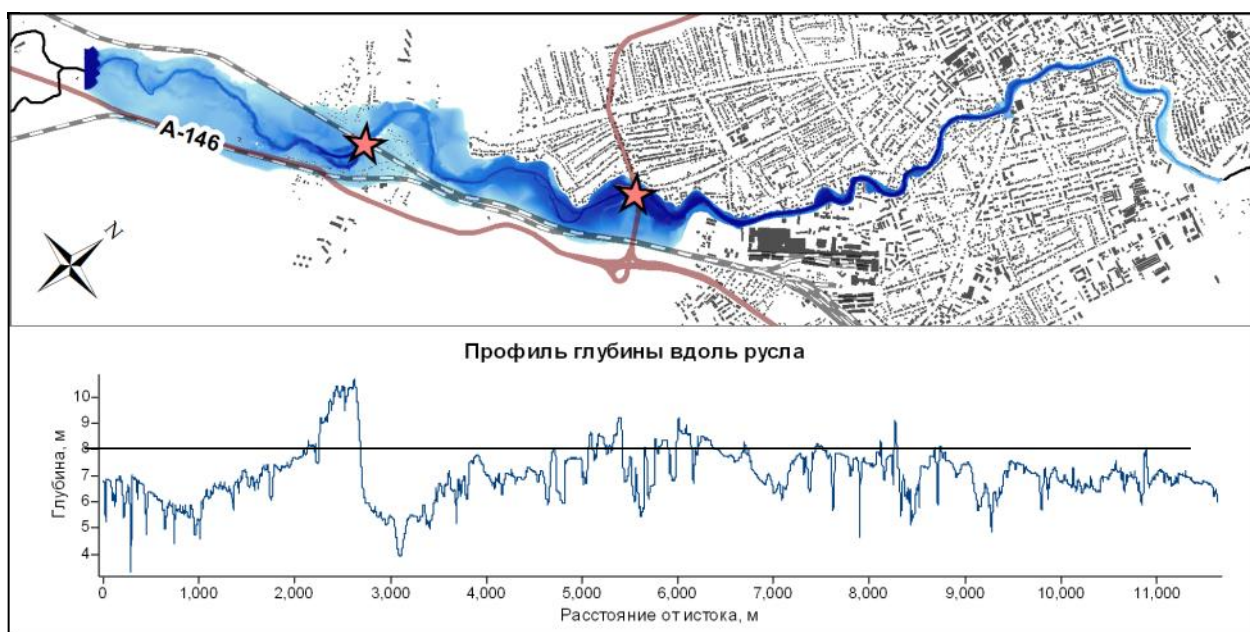


Рисунок 3.13. Зона затопления и профиль глубины затопления вдоль русла реки Адагум при возможном использовании «мобильных» дамб во время прохождения паводка 6–7 июля 2012 г.

3.3. Картографирование зон опасности

Опасность паводков может заключаться в глубине формируемого затопления, во времени его наступления, в скорости водных потоков и в их разрушительной силе. В зависимости от морфологии речной долины зоны затопления при прохождении паводков могут формировать максимальные уровни воды, которые будут приводить к большим или меньшим материальным потерям. Динамика прохождения паводка приводит к затоплению сначала одних территорий, затем других, что означает меньшее количество времени на эвакуацию населения и имущества время для первых по сравнению со вторыми. Скорости водных потоков при затоплении в сочетании с уровнями воды могут обладать более или менее разрушительной силой и приводить к большим или меньшим убыткам.

При разработке зон паводковой опасности в окрестностях Крымска проводилась имитация прохождения паводка различного масштаба и фиксировались максимальные уровни, скорости и кинетическая энергия водных потоков. Согласно Постановлению Правительства РФ от 18 апреля 2014 г. N 360 «Об определении границ зон затопления, подтопления» [103], границы зон затопления определяются

Федеральным агентством водных ресурсов на основании предложений органа исполнительной власти субъекта Российской Федерации, подготовленных совместно с органами местного самоуправления. Они должны содержать текстовое и графическое описание местоположения границ, перечень координат границ зон затопления в системе координат, установленной для ведения государственного кадастра недвижимости. Требования к точности определения координат зон затопления и подтопления устанавливаются Министерством экономического развития Российской Федерации.

При подготовке предложений учитываются:

а) геодезические и картографические материалы, выполненные в соответствии с Федеральным законом «О геодезии и картографии», а также данные обследований по выявлению паводкоопасных зон [104];

б) данные об отметках характерных уровней воды расчетной обеспеченности на пунктах государственной наблюдательной сети;

в) данные об отметках характерных уровней воды расчетной обеспеченности из фондовых материалов гидрологических и гидрогеологических изысканий под размещение населенных пунктов, мелиоративных систем, линейных объектов инфраструктуры, переходов трубопроводов, мостов;

г) данные проектных материалов, подготовленные в целях создания водохранилищ;

д) сведения, содержащиеся в правилах использования водохранилищ;

е) расчетные параметры границ затоплений пойм рек, определенные на основе инженерно-гидрологических расчетов;

ж) параметры границ подтоплений, определенные на основе инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий.

Границы зон затопления, подтопления отображаются в документах территориального планирования, градостроительного зонирования и документации по планировке территорий в соответствии с законодательством о градостроительной деятельности.

Установлены также требования к территориям, входящим в зону затопления:

а) территорий, которые прилегают к незарегулированным водотокам, затапливаемых при половодьях и паводках однопроцентной обеспеченности (повторяемость один раз в 100 лет) либо в результате ледовых заторов и зажоров. В границах зон затопления устанавливаются территории, затапливаемые при максимальных уровнях воды 3, 5, 10, 25 и 50-процентной обеспеченности (повторяемость 1, 3, 5, 10, 25 и 50 раз в 100 лет);

б) территорий, прилегающих к устьевым участкам водотоков, затапливаемых в результате нагонных явлений расчетной обеспеченности;

в) территорий, прилегающих к естественным водоемам, затапливаемых при уровнях воды однопроцентной обеспеченности;

г) территорий, прилегающих к водохранилищам, затапливаемых при уровнях воды, соответствующих форсированному подпорному уровню воды водохранилища;

д) территорий, прилегающих к зарегулированным водотокам в нижних бьефах гидроузлов, затапливаемых при пропуске гидроузлами паводков расчетной обеспеченности.

В Градостроительном кодексе среди основных понятий в ст. 1 [105] приводятся также *зоны с особыми условиями использования территорий*, которые объединяют ряд зон (охранные, санитарно-защитные зоны, зоны охраны объектов культурного наследия, водоохранные зоны, зоны затопления, подтопления, зоны санитарной охраны источников питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения, зоны охраняемых объектов и иные). Зоны с особыми условиями использования территории выделяются при надобности, сведения о них содержатся в документах территориального планирования Российской Федерации, субъектов РФ, муниципального района, в генеральных планах и иной документации.

Существующая нормативно-правовая база, связанная с затоплениями, не регулирует влияние хозяйственной деятельности на опасность проходящего паводка. В настоящее время водоохранные и прибрежные зоны ограничивают, главным образом, землепользование на определённых территориях с точки зрения загрязнения. Зоны затопления, введение которых возложено на Федеральное

агентство водных ресурсов по ходатайству субъектов РФ, не ограничивают землепользователей с точки зрения недопущения усиления затопления. Дополнительные ограничения на землепользование в зонах затопления могут налагаться актами субъектов РФ, однако на практике они обычно повторяют ограничения для водоохранных зон, то есть направлены на предотвращение загрязнения водоёмов. Постановление правительства о введении зон затопления вступило в силу только в 2014 году; утверждённые зоны в Крымске показаны на рисунке 3.14.

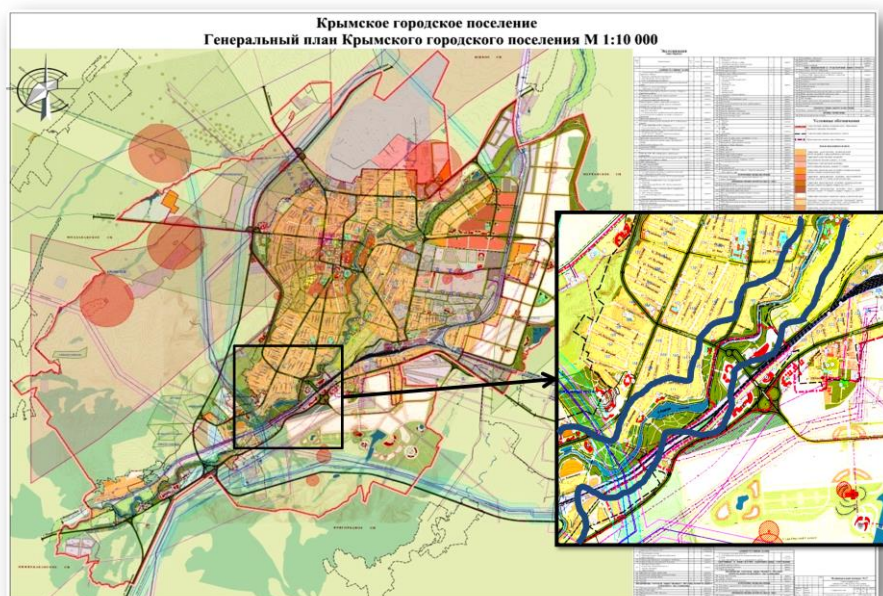


Рисунок 3.14. Водоохранная зона на генеральном плане Крымска [106].

Прохождение паводка 6–7 июля 2012 года и лета 2002 года показало, что на Северо-Западном Кавказе могут наблюдаться паводки низкой вероятности, которые сильно деформируют распределение силы паводков по обеспеченности. В связи с этим в данной главе рассчитывались схемы опасности затопления в окрестностях Крымска на основе прохождения гипотетических паводков максимального расхода 500 м³/с (примерно соответствует среднегодовому расходу Кубани, Одера или Сены), 1000 м³/с (Висла, Тигр, Уссури), 1500 м³/с (Днепр, По) и 2000 м³/с (Рейн, Анадырь). При этом рассчитывались зоны опасности при естественной и трансформированной морфологии русла. С помощью гидрологической модели формирования паводка на водосборе реки Адагум (модель НЕС-HMS) были

получена динамика расходов на входе в расчётную область с указанными максимальными расходами.

Рассматривалось три параметра, исходя из которых впоследствии были рассчитаны интегральные зоны опасности: максимальные глубины затопления, максимальные скорости и максимальная кинетическая энергия водных потоков. Для каждого параметра выделялись три класса опасности: малый, средний и высокий. Для глубин затопления границами классов были определены уровни 0,8 и 1,2 м, которые выбраны переломными в формировании материального ущерба (рисунки 3.15 и 3.16).

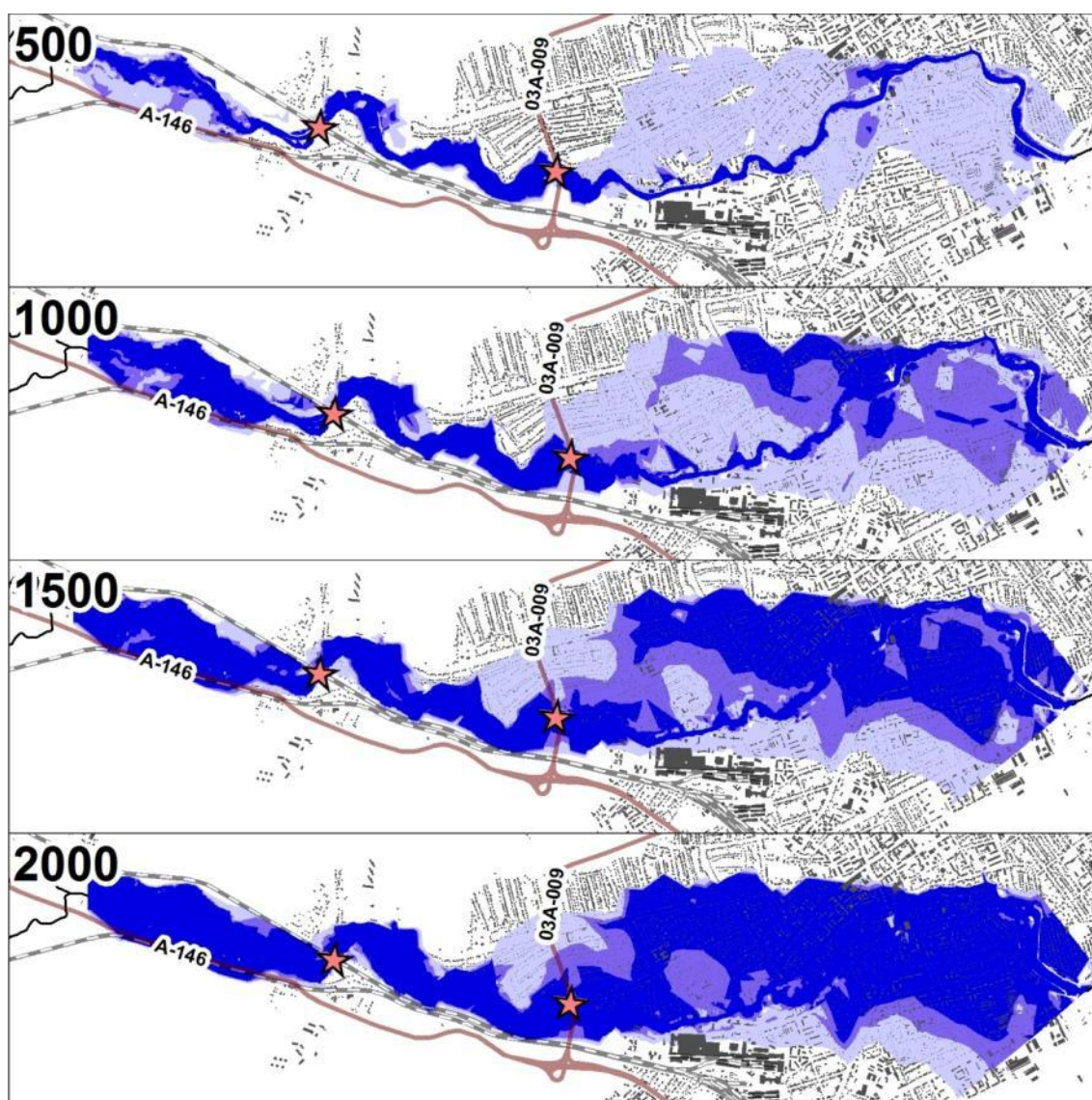


Рисунок 3.15. Классы опасности (малая – голубая, средняя – синяя и сильная – тёмно-синяя) по уровню затопления в условиях естественного русла при соответствующих максимальных расходах.

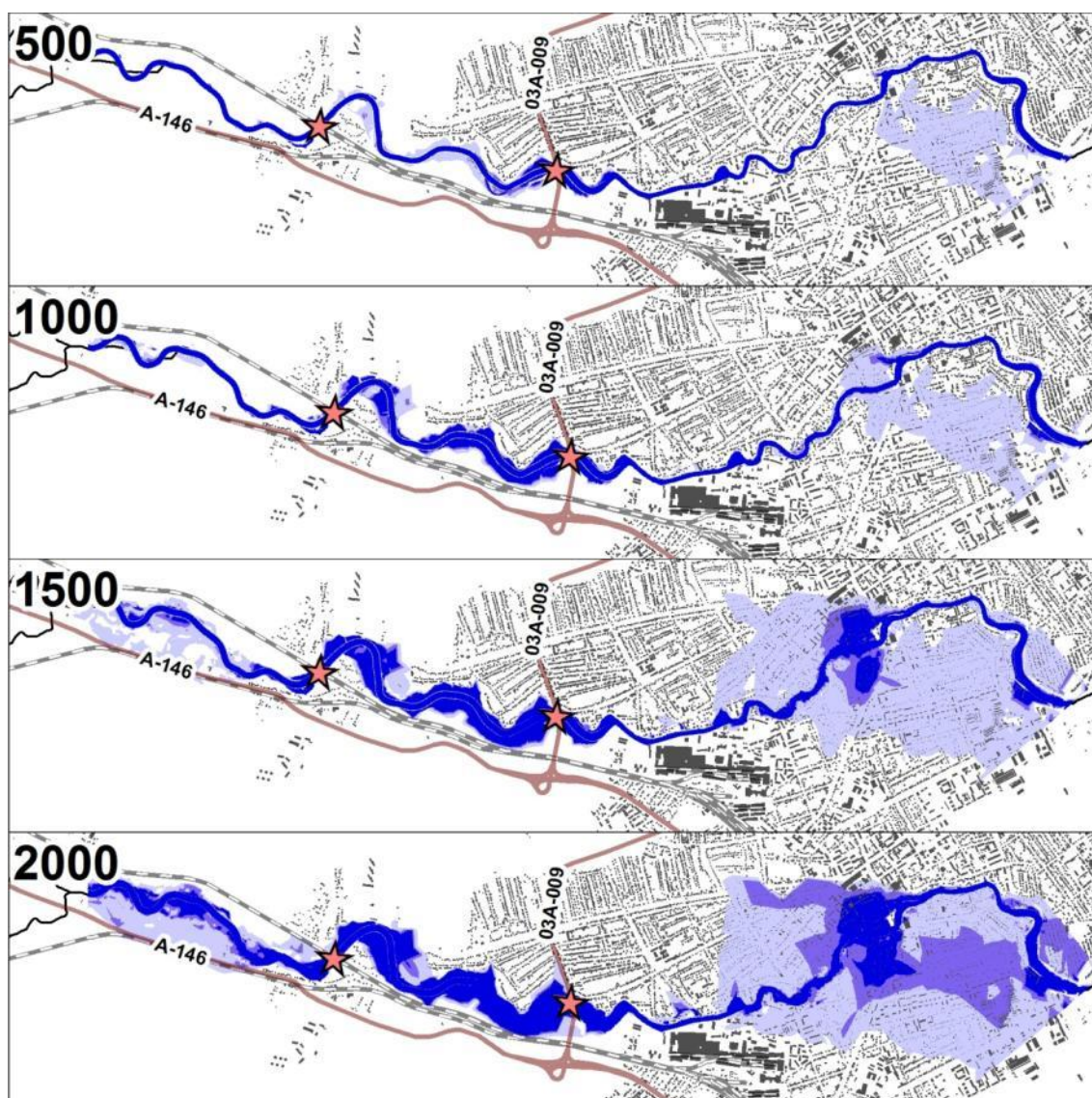


Рисунок 3.16. Классы опасности (малая – голубая, средняя – синяя и сильная – тёмно-синяя) по уровню затопления в условиях изменённого русла при соответствующих максимальных расходах.

В условиях естественного русла опасный уровень занимает около 50% от общей зоны затопления уже при паводке с максимальным расходом $1500 \text{ м}^3/\text{с}$. Наиболее опасной территорией является пойма реки между железнодорожным и автомобильным мостами в створе ул. Новороссийской. Центральная часть города подвергается опасности опасного затопления уже при паводке $1000 \text{ м}^3/\text{с}$.

В условиях изменённого русла наиболее опасной с точки зрения уровня затопления также является территория между мостами. При паводках $1500 \text{ м}^3/\text{с}$

более опасному затоплению подвергается центральная часть города в районе моста по ул. Синева.

С точки зрения максимальных скоростей водных потоков, территория затопления была разделена на классы с границами 1 и 2 м/с. Результаты представлены на рисунках 3.17 и 3.18.

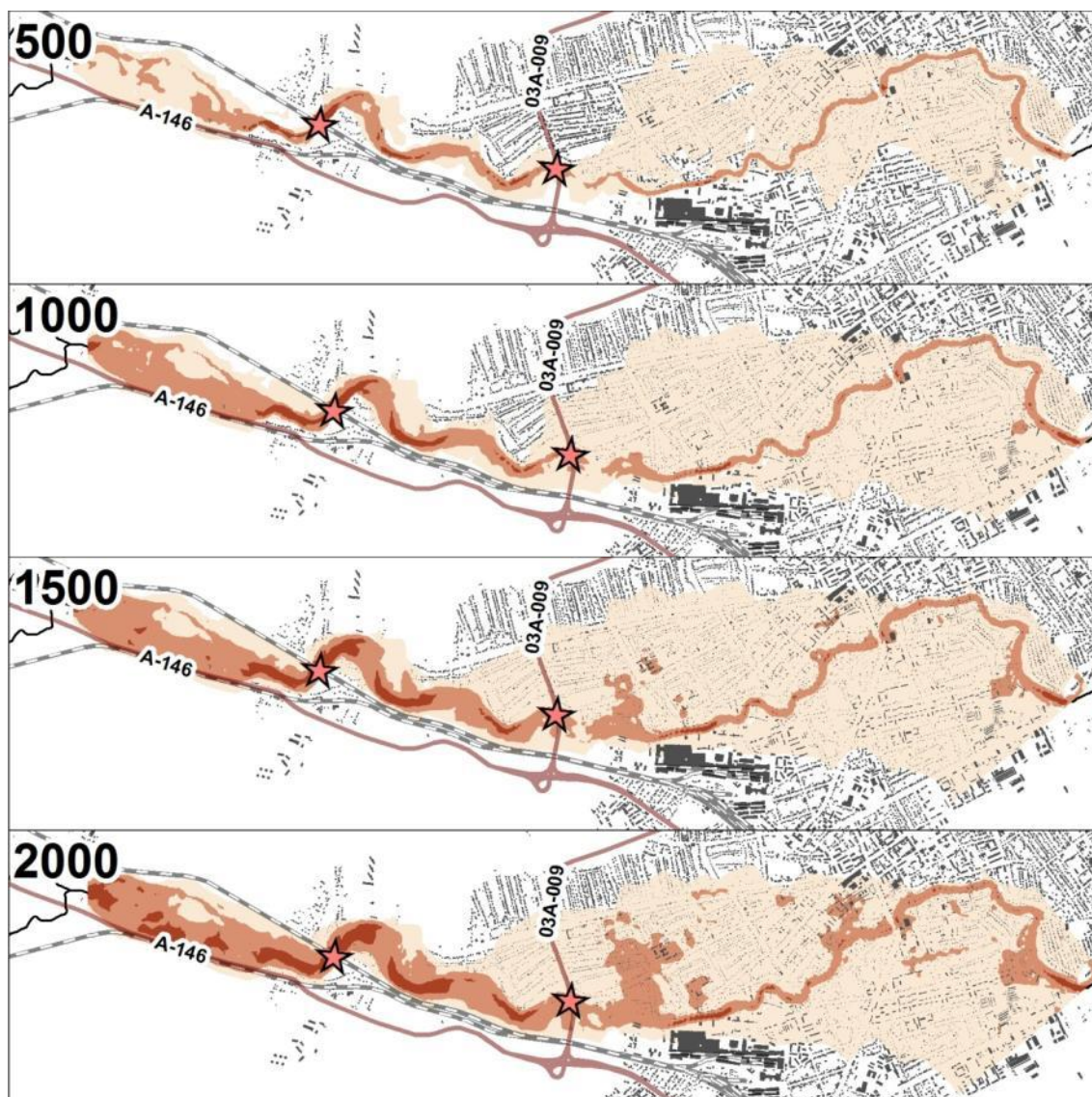


Рисунок 3.17. Классы опасности (малая – розовая, средняя – светло-красная и сильная – красная) по максимальной скорости течения в условиях естественного русла при соответствующих максимальных расходах.

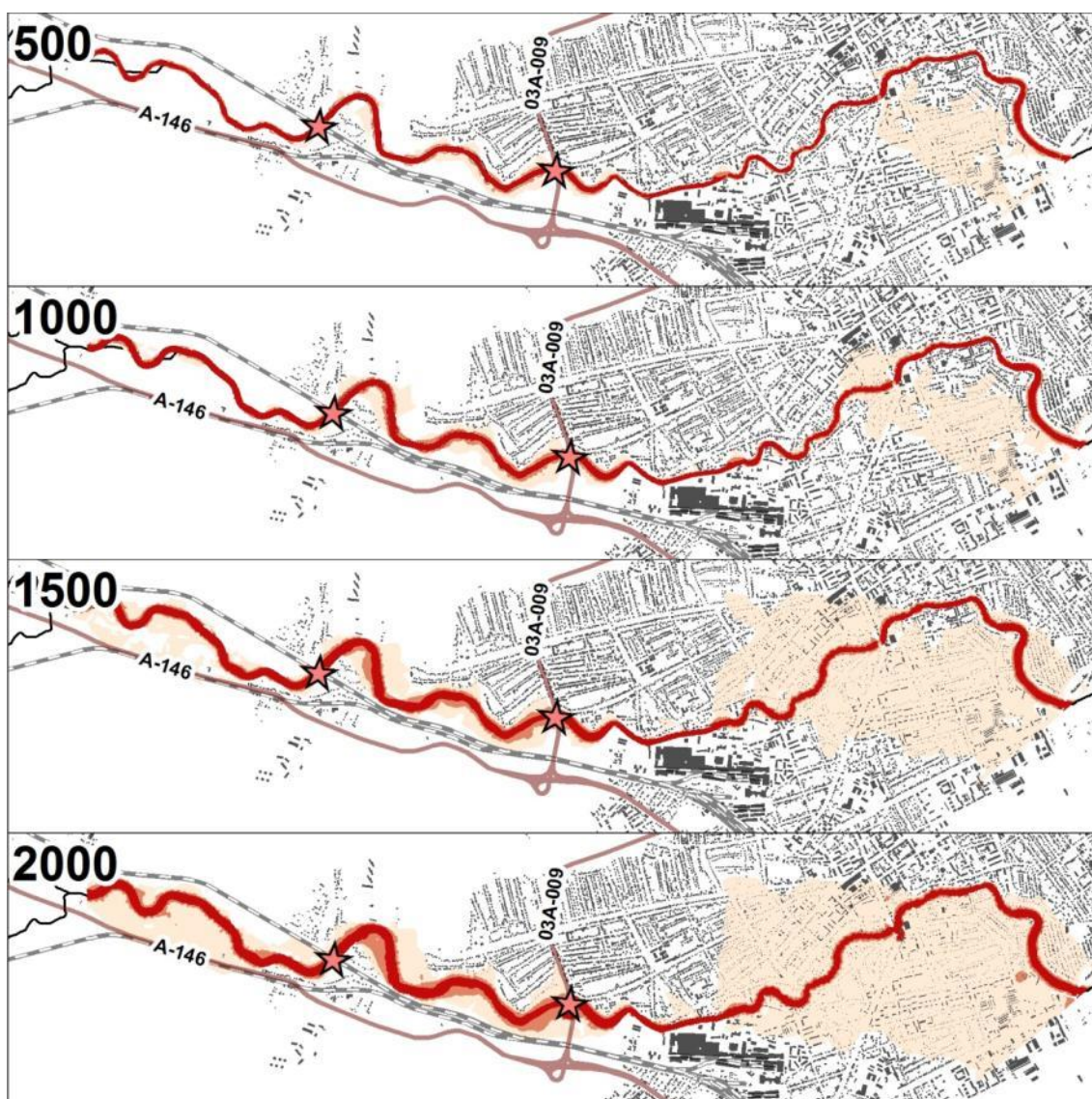


Рисунок 3.18. Классы опасности (малая – розовая, средняя – светло красная и сильная – красная) по максимальной скорости течения в условиях естественного русла при соответствующих максимальных расходах.

Кинетическая энергия рассчитывалась по формуле [107]:

$$E = 0.5 * m * V^2, m = r * \rho * H,$$

где m – масса водного столба, r – разрешение пиксела ЦММ, ρ – плотность водного потока, H – глубина затопления, V – скорость водного потока.

На каждый расчётный час было получено распределение кинетической энергии водного потока в виде растра. Далее для каждой ячейки было выбрано максимальное значение. Полученный растр был классифицирован по опасности затопления. Для наглядности, в качестве границ классов были выбраны значения,

при которых водный поток способен сдвинуть с места автомобиль массой 1 т, длиной 4 м. Устойчивость автомобиля против бокового скольжения (сдвига) может быть обеспечена, если будет соблюдено следующее условие:

$$(P - P_0)\varphi \geq F_1 + F_2 \text{ при } \varphi = \sqrt{(\varphi_0^2 - \varphi_1^2)},$$

где P – вес автомобиля в загруженном или незагруженном состоянии; P_0 – потеря веса автомобиля в воде; φ – коэффициент поперечного сопротивления боковому сдвигу; F_1 – сила бокового давления водного потока; F_2 – сила давления боковой ветровой нагрузки; φ_0 – коэффициент сцепления шин автомобиля с покрытием проезжей части; φ_1 – коэффициент тягового (или тормозного) усилия [108].

С учетом данных А.В. Макарова [109], коэффициент φ_1 может быть принят равным $0,7 \varphi_0$, а выражение представлено в следующем виде:

$$\varphi = 0.72 \sqrt{\varphi_0^2}$$

Для затопленных участков дороги значение φ_0 следует определять в зависимости от типов покрытия и его состояния [108]:

1. Мокрые поверхности покрытий, покрытых слизью или лишайником, равные $0,4 + 0,5$;
2. Покрытия со скользкой поверхностью (грязь, лед и т.п.), равные $0,3 + 0,2$.
3. Черные щебеночные покрытия во время перелива вод, равные $0,2 + 0,08$.
4. Цементобетонные покрытия в таких же условиях, равные $0,15 + 0,06$.

Потеря веса автомобиля в воде может быть определена по следующей формуле:

$$P_0 = \gamma(\sum W_k + W),$$

где γ – объемный вес воды; $\sum W_k$ – сумма объемов затопленных частей колес; W – объем затопленной части автомобиля на высоту выше отметки просвета в средней его части.

Так как мы проводим расчёты влияния давления водного потока на неподвижный автомобиль весом в 1 т, длиной 4 м и плотность водного потока

принимая равной 1, то $F_1 = 0$. Затопление гипотетического автомобиля принимаем на уровне, полностью покрывающем колёса. Тогда P_0 будет равен произведению объёма колёс и плотности воды. Объём колеса легкового автомобиля, в зависимости от модели, колеблется около значения $0,1 \text{ м}^3$. Исходя из этого, кинетическая энергия на 1 м^2 площади, необходимая для сдвига автомобиля, составляет 25 кгс. Поэтому границы классов составят 25 и 10 кг/с (рисунки 3.19 и 3.20).

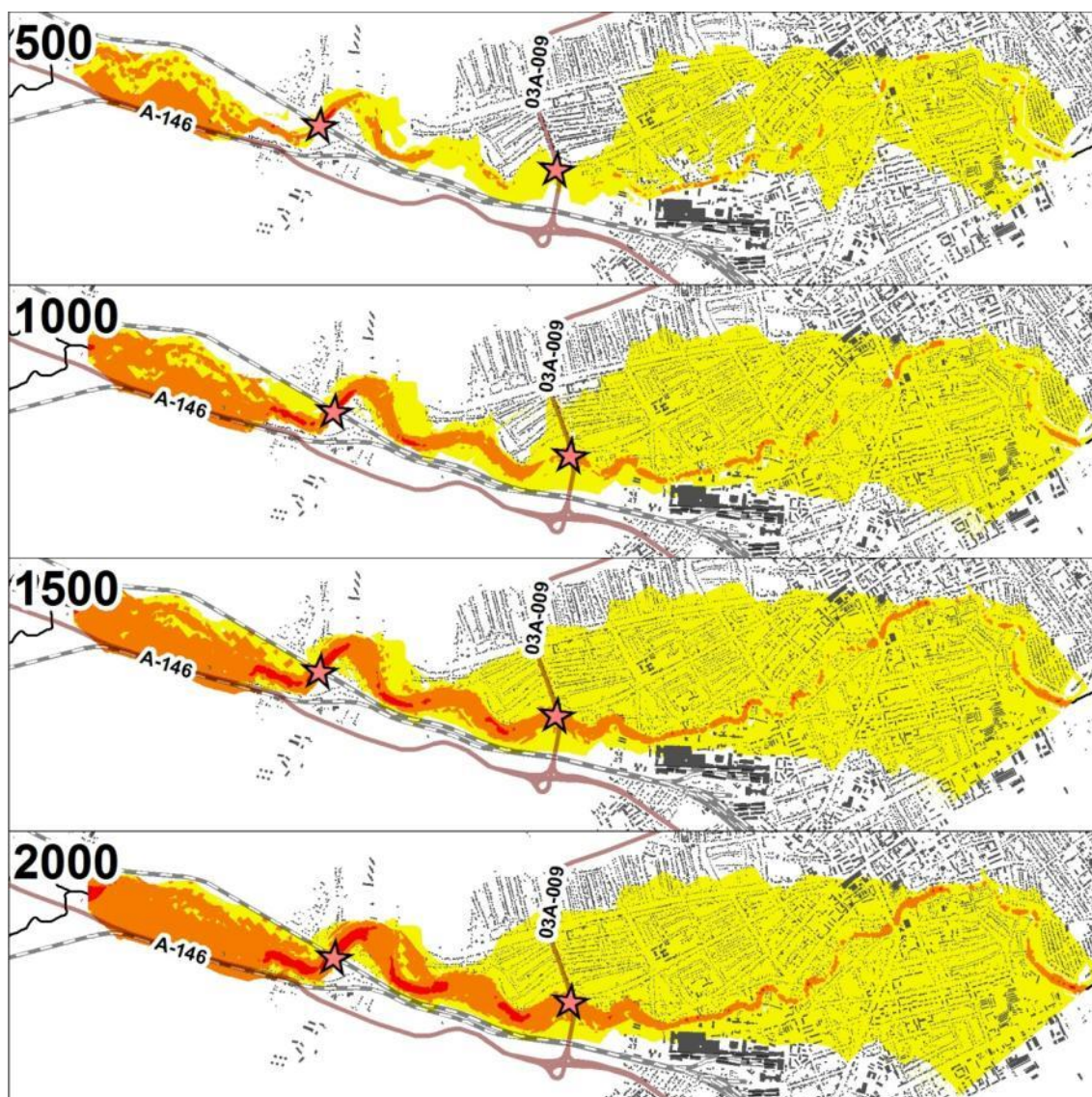


Рисунок 3.19. Зоны опасности (малая – жёлтая, средняя – оранжевая и сильная – красная) по кинетической энергии в Крымске в условиях естественного русла.

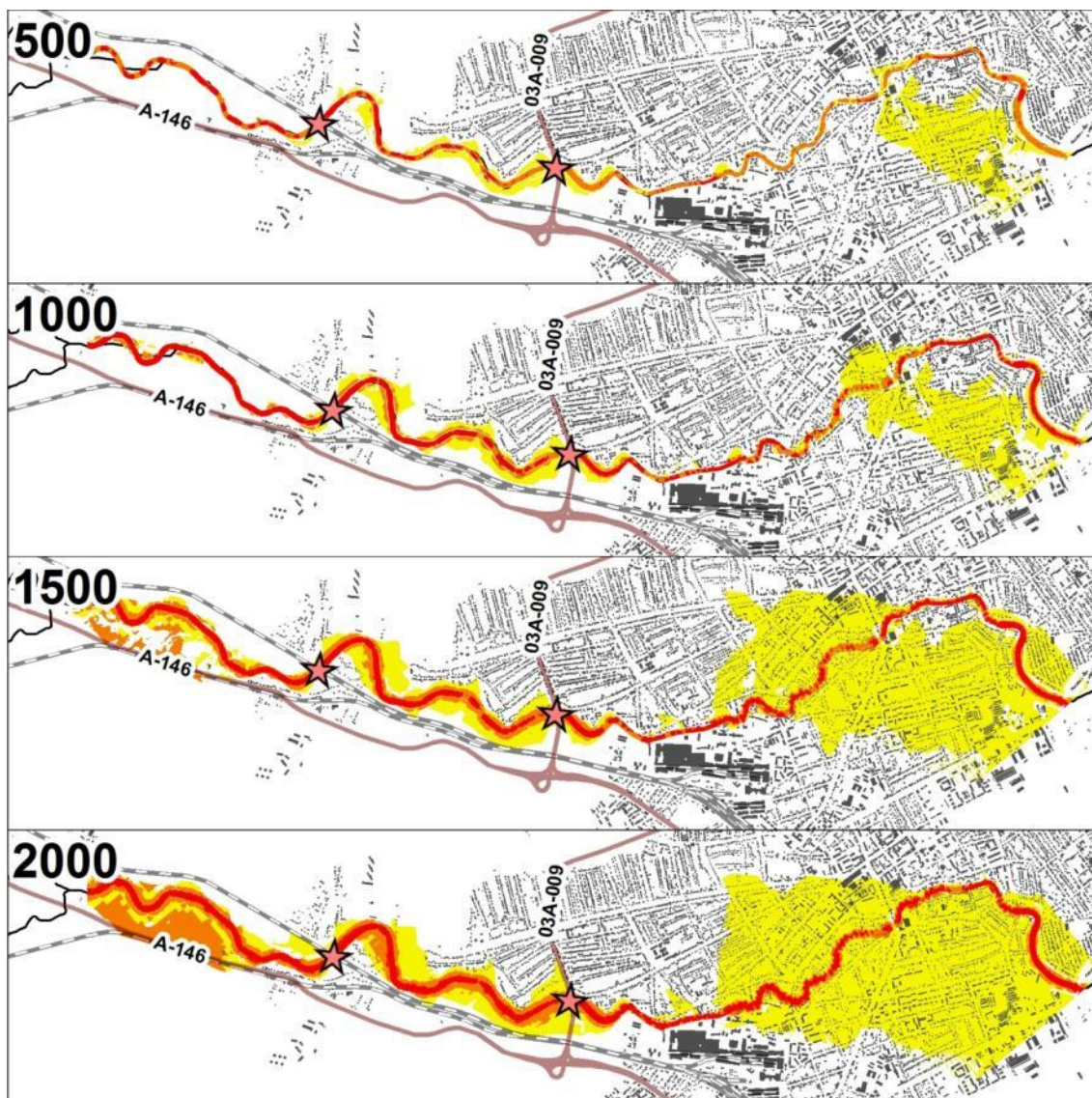


Рисунок 3.20. Зоны опасности (малая – жёлтая, средняя – оранжевая и сильная – красная) по кинетической энергии в Крымске в условиях трансформированного русла.

Глубины затопления, максимальные скорости и кинетическая энергия водных потоков в отдельности не дают полного представления об опасности прохождения паводков в Крымске. Вследствие этого были построены интегральные схемы опасности прохождения паводков. Различные растры опасности классифицировались по трём выделенным классам. Их значения для каждого сценария складывались, и было получено распределение опасности прохождения паводков по 9-ти классам. Суммированные классы были переклассифицированы в три класса опасности по 8-ми сценариям (рисунки 3.21 и 3.22).

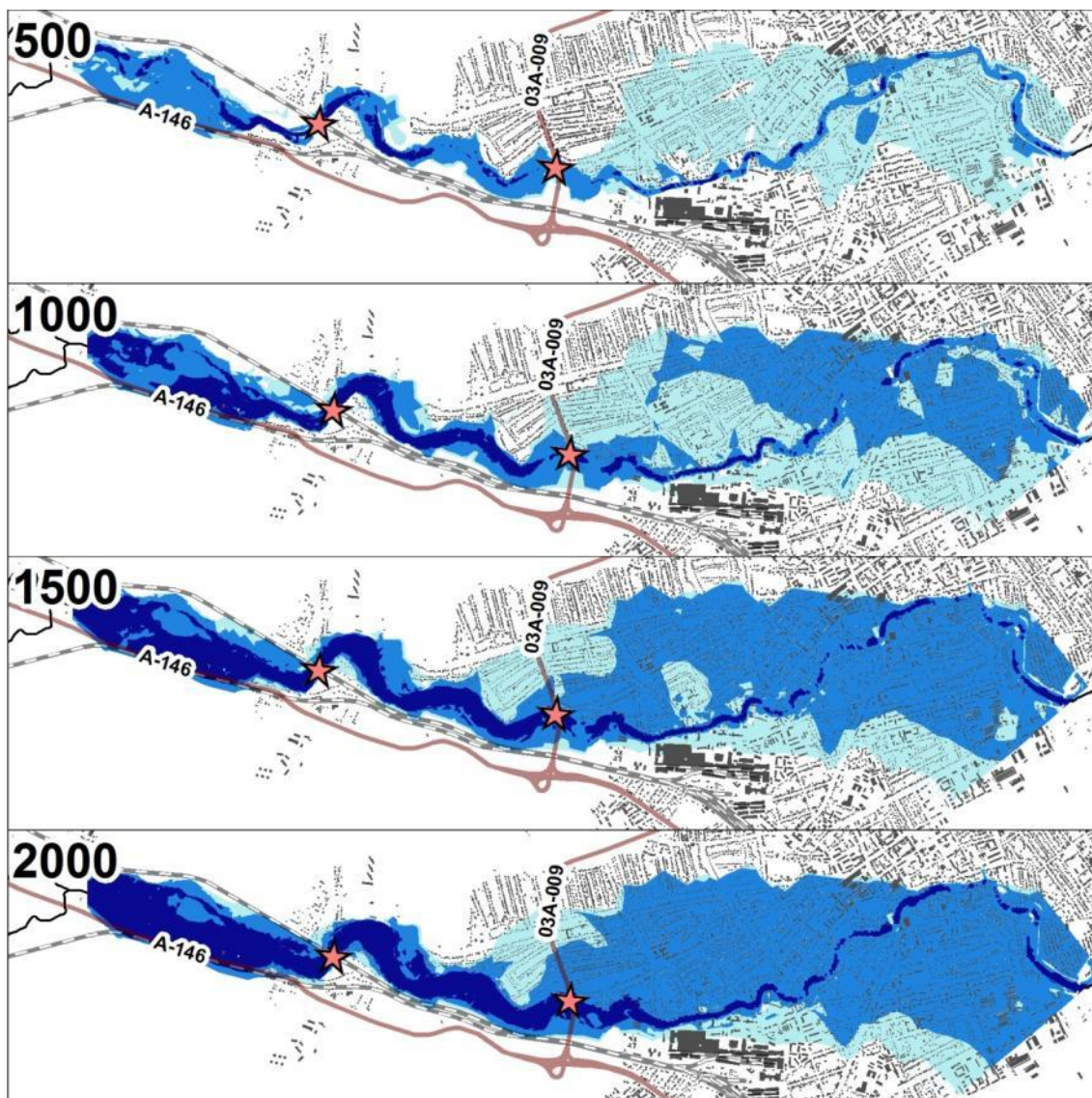


Рисунок 3.21. Интегральные зоны опасности в Крымске в условиях естественного русла.

В условиях естественного русла и существующей городской застройки зона затопления при всех сценариях прохождения паводка охватывает примерно одинаковую площадь города – сначала левой части долины, затем правой. Застроенная территория находится в слабой и средней зонах опасности, их соотношение изменяется в зависимости от интенсивности паводка. Наиболее опасными во время прохождения паводка являются прирусловые территории выше первого автомобильного моста в Крымске. На этих территориях располагается х. Верхнеадагум, а также железная дорога, которая пересекает долину Адагума.

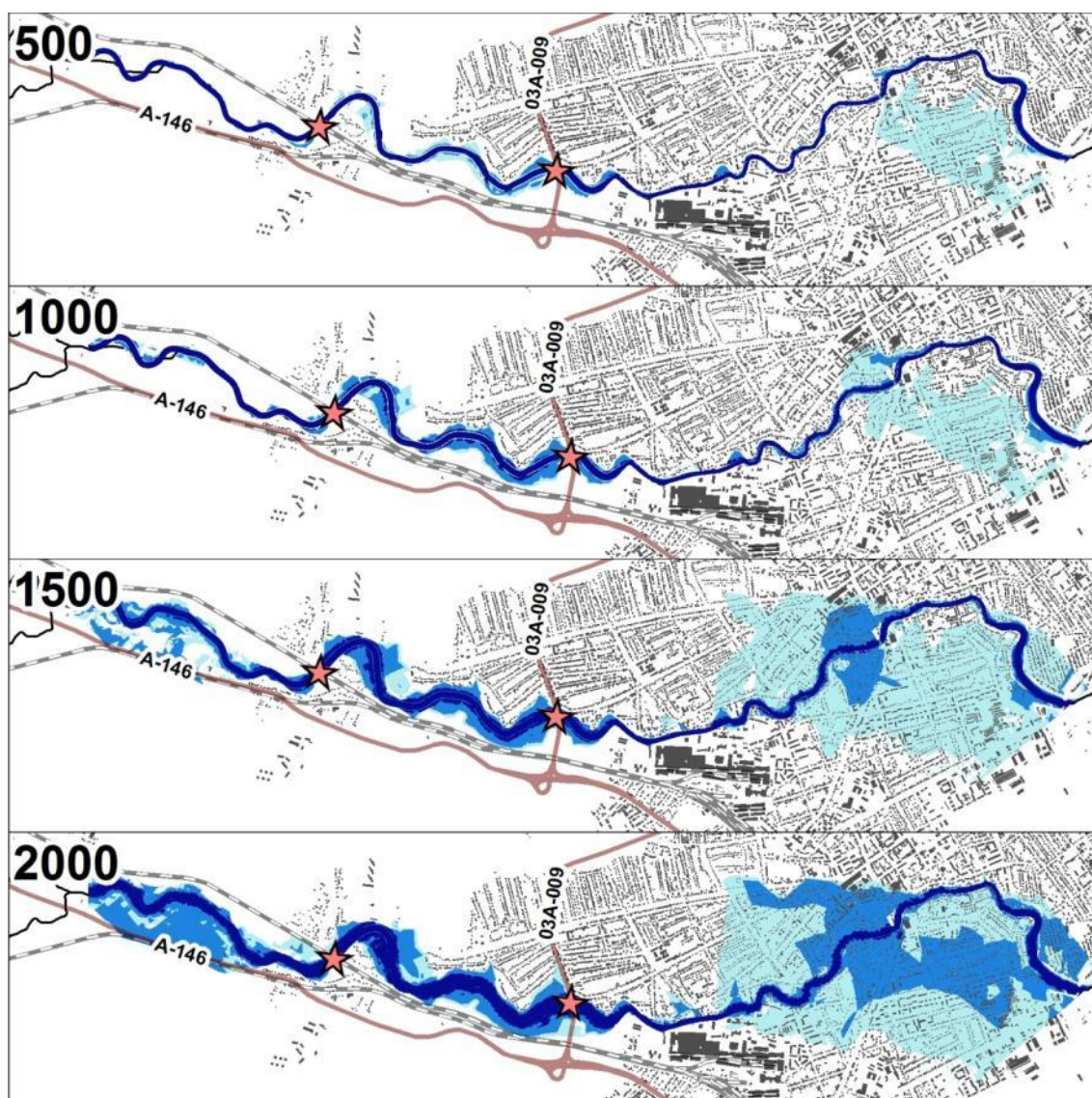


Рисунок 3.22. Интегральные зоны опасности в Крымске в условиях трансформированного русла.

Прохождение паводков с максимальным расходом менее $1040 \text{ м}^3/\text{с}$ в условиях трансформированного русла не формирует в городе значительного затопления. Однако высокие уровни и особенно скорости в русле представляют очень высокую опасность для жизни. При прохождении более сильных паводков (с максимальным расходом 1500 и $2000 \text{ м}^3/\text{с}$) русло не вмещает паводковые воды, которые затопливают территорию в центральной части города в районе моста по ул. Синева и формируют здесь зону средней опасности паводка. Рассчитанные зоны опасности сведены в таблице 3.1.

С помощью гидрологической модели прохождения паводка в окрестностях Крымска были рассчитаны сценарии паводков различного масштаба. Расчётные

паводки достигают максимальных расходов 500 м³/с (соответствует среднему расходу таких рек как Кубань, Одер или Сена), 1000 м³/с (рр. Висла, Тигр, Уссури), 1500 м³/с (рр. Днепр, По) и 2000 м³/с (рр. Рейн и Анадырь) для естественного и канализованного русла. Согласно [16] расход 1% обеспеченности р.Адагум составлял 640 м³/с, в то время, как на современном этапе, по расчётам ИВП он составляет 1040 м³/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 3.1. Полученные площади классов паводковой опасности 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, км ²		5,0	1,4	6,9	1,8	7,5	4,2	7,9	5,4

3.4. Возможности краткосрочного прогнозирования

В ходе работы была построена ГИС для оперативного прогнозирования паводков в бассейне р.Адагум в рамках проекта ФЦП «Разработка компьютерной системы оперативного прогнозирования опасных природных явлений в бассейне, береговой зоне и акватории Азовского моря» [110]. В составе экспериментального образца программного комплекса «EX-MARE» разработанная ГИС представлена в компоненте «Дождевые паводки».

Компонент «Дождевые паводки» предназначен для реализации методов прогнозирования и оценки риска опасных гидрологических явлений на реках Западного Кавказа на примере р. Адагум в качестве типичной реки региона, подвергающейся сильным наводнениям, вызванным интенсивными осадками. Компонент на основе данных о динамике осадков (и прогнозной динамики осадков) рассчитывает прогноз изменения гидрологической обстановки в различных частях, на притоках бассейна р.Адагум. Назначение компонента сводится к расчёту прогнозных уровней воды в точках установки АГК АС МПСКК по прогнозным осадкам и построению зон затопления в случае выхода воды из русла (при превышении «критических» расходов). Результаты – рассчитанная динамика расходов, уровней, поверхности затопления – записываются в файлы формата HDF4. Содержание этих файлов визуализируется с помощью ПО ArcGIS на разработанных картографических шаблонах и в виде графиков.

В рамках всего программного комплекса также разработан компонент составления метеорологических прогнозов, который используется компонентом «Дождевые паводки», в частности для распределения осадков. Предусмотрен вспомогательный модуль для визуализации результатов на картографических шаблонах и графиках.

Исходные данные представляют собой прогнозы динамики осадков в точках бассейна в формате .csv, поверхность ЦММ бассейна р. Адагум с различной шероховатостью в формате .tif и уровни воды с АГК АС МПСКК.

Параметры элементарных бассейнов, используемые в рамках ГИС в компоненте «Дождевые паводки»:

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 ($\text{м}^3/\text{с}/\text{км}^2$), константа рецессии.
6. Параметры водотоков – длина (м), уклон (в долях от единицы), коэффициент Маннинга.
7. Параметры площади, подвергаемой затоплению (в HEC-RAS), – шероховатость поверхности (безразмерный коэффициент).

Динамика расходов в узлах графа водотоков бассейна, динамика уровней в точках установки АГК АС МПСКК, зоны затопления – все данные записываются файл с расширением .hdf, который потом будет использоваться в качестве источника данных в картографических шаблонах.

Структура компонента «Дождевые паводки» представлена на рисунке 3.23.

Компонент “Дождевые паводки” функционирует в постоянном автономном режиме имитируя сток воды (расходы и уровни) в речной системе бассейна р.Адагум. Основным источником воды для паводков являются атмосферные осадки в виде дождя. В связи с этим в качестве исходных данных для компонента служат данные об осадках – об их интенсивности и продолжительности – динамика интенсивности выпадения осадков. В рамках экспериментального образца программного комплекса «EX-MARE» проводилась экспериментальная проверка его отдельных компонентов, в том числе и «Дождевые паводки». Так как компонент

функционирует в постоянном режиме, то экспериментальная проверка должна была проходить в режиме нормальных осадков (неэкстремальных), в режиме экстремальных осадков и в режиме отсутствия осадков. Для экспериментальной проверки работы компонента необходимо было использовать данные об осадках для региона бассейна р.Адагум – архивные данных метеостанций Крымск и Новороссийск, архивные метеорологические прогнозы выпадения осадков.

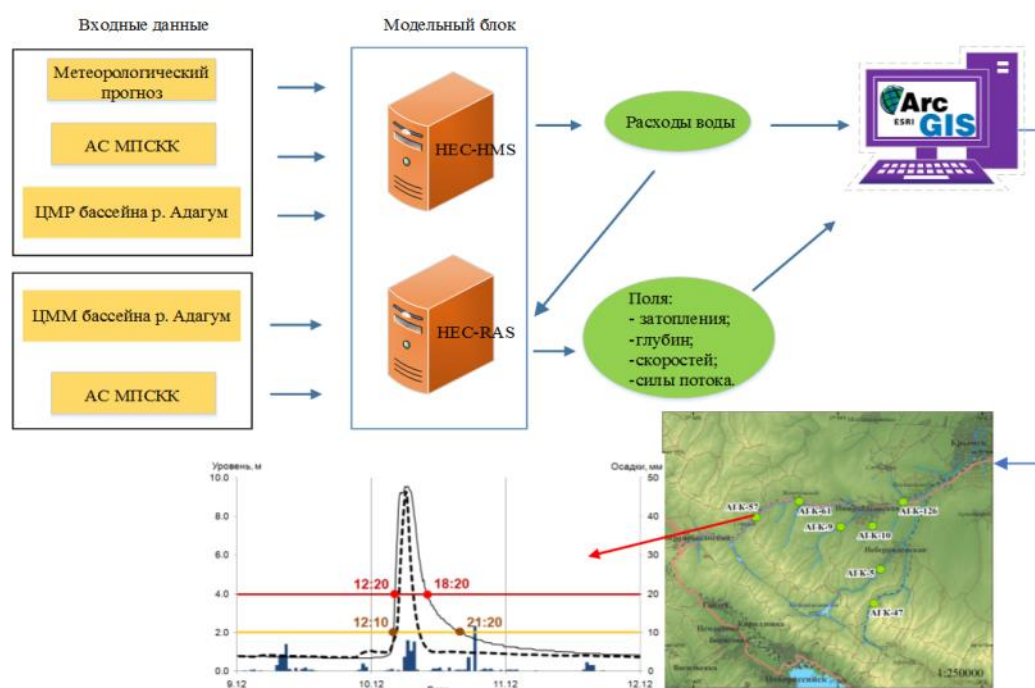


Рисунок 3.23. ГИС для краткосрочного прогнозирования опасных паводков в бассейне р. Адагум.

Также для экспериментальной проверки компонента необходимо было в качестве исходных данных использовать данные об уровне воды в местах установки АГК. Так как гидрологические расчёты в модели дают в результате расходы воды, то необходимо было установить связь между расходами и уровнями в местах установки АГК. Для этого были построены поперечные профили в местах установки АГК, определены локальные уклоны русла и шероховатость его поверхности.

При окончании подготовки исходных данных для экспериментальной проверки были получены: ход интенсивности осадков в бассейне р. Адагум за определённые периоды (без осадков, с обычными осадками и с экстремальными осадками), динамика уровней в местах установки АГК в те же периоды, поперечные

профили поймы (долины) в местах установки АГК, локальные уклоны русла и шероховатость его поверхностей.

Для расчёта зон затопления использовались рассчитанные данные о динамике расходов и ЦМР подвергаемых затоплению территорий бассейна р.Адагум. ЦМР ограничивается поверхностью земли, ограниченной уровнем 15-тиметрового превышения над руслом водотоков в верхнем и среднем течении и застроенной площадью г. Крымск в нижней части бассейна. Для подготовки к экспериментальным исследованиям проводились:

1. Сбор срочных данных об осадках на метеостанциях Крымск и Новороссийск за 2012-2015 гг.

2. Сбор данных о динамике уровня в местах установки АГК за 2012-2015 гг.

3. Выделение периодов наличия данных об осадках и уровнях:

а) период с повышением уровня на более чем 1 м хотя бы на 1 АГК,

б) с наличием осадков, но повышением уровня менее чем на 1 м на всех АГК,

в) с отсутствием осадков

4. Построение поперечных профилей долин в местах установки АГК.

Этапы проведения экспериментальной проверки:

1. Запуск компонента «Дождевые паводки»

2. Установка источника прогноза осадков

3. Задание периода работы

4. Задание пути файла с результатами

5. Запуск моделирования

В файл результатов моделирования записывается рассчитанная динамика расходов, уровней (полученных с помощью зависимости уровень-расход, рассчитанной по поперечным профилям долины), а также динамика уровней по данным АГК. Сравнение динамики уровней является главным критерием работы компонента “Дождевые паводки”.

Результаты работы компонента “Дождевые паводки” записываются в файл формата HDF5. Для отображения результатов необходимо воспользоваться дополнительным программным модулем. Отображаться результаты должны в виде

растров глубины затопления и графиков динамики уровней, расходов и осадков в точках установки АГК АС МПСКК.

В результате работы НЕС-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 (рисунок 3.24)
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.

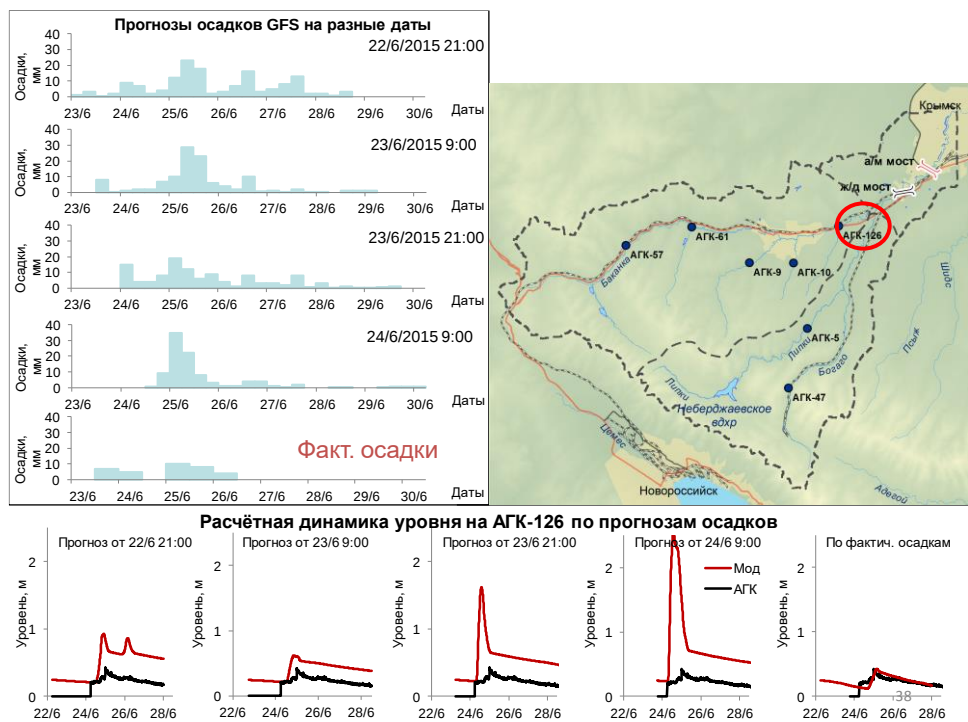


Рисунок 3.24. Пример зависимости гидрологического прогноза от прогноза осадков

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Географическое положение на границе умеренного и субтропического поясов и наличие низкогорья, вытянувшегося вдоль морского побережья, определяют особенности циркуляции воздушных масс региона. Перемещение циклонов с моря на сушу способствует выпадению интенсивных осадков, особенно в горной части. Геология и тектоника региона формируют орографическую основу, определяющую пространственные, геометрические и некоторые гидрологические особенности водосборов местных рек. Растительный и почвенный покров определяют условия распределения элементов водного баланса на территории. Обширный лесной покров и большая часть почвенного покрова обладают хорошими водорегулирующими способностями (водоудержанием, водопроницаемостью). Природные условия региона 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, на равнинных участках вдоль автомобильной трассы и железной дороги Краснодар – Крымск – Темрюк и вдоль транспортных путей соединяющих равнинную часть с побережьем (Крымск – Новороссийск, Краснодар – Горячий Ключ – Туапсе, Анапа – Новороссийск). Основными препятствиями являются обширный лесной массив (в западных водосборах он покрывает 20–50% водосборов, в восточных – 70–95%) и сложный рельеф большей части региона. При этом, по данным ДЗЗ за 14 лет (2000–2014 гг.), наблюдается незначительное сокращение лесного покрова, принимающее максимальные масштабы в окрестностях городов (до 1–2% на водосборах Яшамбы, Озерейки, Джубги и Дооба). Наибольшее антропогенное изменение ландшафтов наблюдается в западных, более равнинных, водосборах и на территории зоны расселения Анапа–Новороссийск–Геленджик – рр. Анапка, Гостагайка, Цемес, Дооб, Яшамба. Верховья и среднее течение крупнейших водосборов региона испытывают на себе слабое антропогенное влияние на условия формирования паводков.

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 м³/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. м³ 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 м³/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.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Assessing the Environmental Impacts of Consumption and Production: Priority Products and Materials, UNEP, Hertwich, E., van der Voet, E. and others, 2010.
2. EM-DAT. The International Disaster Database. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.emdat.be (дата обращения 02.06.2016).
3. 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.
4. Котляков В.М. и др. Наводнение 6–7 июля 2012 года в городе Крымске // Изв. РАН. Сер. геогр. 2012. № 6. С. 80–88.
5. Численное гидродинамическое моделирование наводнения в г. Крымске 6-7 июля 2012 г. / Н. И. Алексеевский и др.// Гидротехническое строительство. - 2014. - № 3. - С. 29-35.
6. Матишов Г.Г., Клещенко А.В. Кубанский паводковый кризис. Климат, геоморфология, прогноз. Крымск, июль 2012 г. Ростов-н/Д.: Изд. ЮНЦ РАН, 2012. 128 с.
7. Department of The Army Corps of Engineers Institute for Water Resources Hydrologic Engineering Center. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hes.usace.army.mil/> (дата обращения 02.06.2016).
8. Евстигнеев, В. М. Речной сток и гидрологические расчёты. Москва: Изд-во МГУ, 1990. 304 с.
9. Режим ветра над побережьем и шельфом северо-восточной части Черного моря / Л.Н. Репетин, В.Н. Белокопытов // Наукові праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту: Зб. наук. пр. — 2008. — Вип. 257. — С. 84-105.
10. Савицкий Г. А., Ветровая нагрузка на здания и сооружения, Изд-во лит. по строительству, М., 1972. 111 с.

11. Лыткина И. И. Климатические особенности Новороссийской боры // Метеорология и гидрология. 1984. №3. С. 105-107.
12. Трихунков, Я.И. Морфоструктурное районирование Северо-Западного Кавказа // Геоморфология. 2008. № 2. С. 97- 107.
13. Муратов В.М. Неотектоника и рельеф Северо-Западного Кавказа: дис. канд. геогр. наук. М.: Ин-т географии АН СССР, 1964. 304 с.
14. Трихунков Я.И. Морфоструктура и опасные геоморфологические процессы Северо-Западного Кавказа: Дис. канд. геогр. наук: М.: ИГРАН, 2009. 213 с.
15. Реки черноморского побережья Кавказа: Гидрография и режим стока /В.Д. Панов, А. А. Базелюк., П. М. Лурье. – Ростов-на-Дону: Донской издательский дом, 2012. – 606 с.
16. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.8 Северный Кавказ Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. 450 с.
17. Маринин А.В., Расцветаев Л.М. Структурные парагенезы Северо-Западного Кавказа // Проблемы тектонофизики. М.: Изд-во ИФЗ РАН, 2008. С. 191-224.
18. Середин М.Р. Флора и растительность Северного Кавказа. Краснодар: Кубан.госуниверситет, 1979. 89 с.
19. Гроссгейм А.А. Растительный покров Кавказа. – М.: Изд-во АН СССР, 1948. 268 с.
20. Битюков Н.А. Гидрологическая роль горных лесов Северо-Западного Кавказа: Автореферат дисс. докт. биол. наук (спец. 0603 экология). М. 1996. 35 с.
21. Климентов П.П. Общая гидрогеология. Издание 4. – М.: Высшая школа, 1971. - 303 с.
22. Марчик Т.П. Почвоведение с основами растениеводства: учебное пособие / Т.П. Марчик, А.Л. Ефремов. – Гродно : Изд-во ГрГУ, 2006. – 322 с.
23. Почвенная карта Краснодарского края. Масштаб 1:400000. Волгоград 1990.
24. Вальков В.Ф., Штомпель Ю.А., Трубилин И.Т. и др. Почвы Краснодарского края, их использование и охрана / СКНЦ ВШ. Ростов н/Д, 1995. 192 с.
25. Кириченко К С. Почвы Краснодарского края. Краснодар: Крайгосиздат, 1952. 236 с.

26. Крицкий С. Н., Менкель М. Ф. Расчеты речного стока. -Л.: Госстройиздат, 1934. 260 с.
27. Поляков Б.В. Гидрологический анализ и расчеты. -Л.: Гидрометеиздат, 1946. - 480 с.
28. Аполлов Б. А. Учение о реках. Москва: Издательство МГУ, 1963. 424 с.
29. Огиевский А. В. Гидрология суши. Москва: Сельхозгиз, 1951. 516 с.
30. Чеботарёв А. И. Общая гидрология. Ленинград: Гидрометеиздат, 1975. 544 с.
31. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 9 Закавказье и Дагестан. Выпуск 1. Западное Закавказье, Ленинград: Гидрометеиздат, 1969. 312 с.
32. Лурье П.М. Водные ресурсы и водный баланс Кавказа. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2002. 500 с.
33. Мельникова Т.М. Максимальный сток дождевых паводков рек Северо-Западного Кавказа // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки . 2011. №3. С.28-34.
34. Таратуни А.А. Наводнения на территории Российской Федерации. – Екатеринбург, 2008. – 432 с.
35. Магрицкий Д.В., Самохин М.А., Юмина Н.М. Наводнения в Краснодарском крае и республике Адыгея // Наука. Техника. Технология. 2013. № 4. С. 44-63.
36. Вишневская И.А., Десинов Л.В., Долгов С.В., Коронкевич Н.И., Шапоренко С.И., Киреева М.Б., Фролова Н.Л., Рец Е.П., Голубчиков С.Н. Географо-гидрологическая оценка наводнений в российском Причерноморье // Известия Российской академии наук. Серия географическая. 2016. № 1. С. 131-146.
37. Zhang X, Zwiers FW, Hegerl GC, Lambert FH, Gillett NP, Solomon S, Stott PA, Nozawa T (2007) Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends. *Nature* 448:461–465.
38. Shankman, D. and Liang, Q. (2003), Landscape Changes and Increasing Flood Frequency in China's Poyang Lake Region. *The Professional Geographer*, 55: 434–445.
39. Волосухин В. А., Щурский О. М. Наводнения на ,Кубани. Проблемы и задачи. // Гидротехника, № 4. 2012. с. 6-9.

40. Сушко К.С. Деградация каштановых почв сухих степей в долине Маныча под влиянием хозяйственной деятельности: диссертация канд. геогр. наук: 25.00.23 / Сушко Кирилл Сергеевич. – Ростов-на-Дону, 2015. – 175 с.
41. Коронкевич Н.И., Мельник К.С. Антропогенные воздействия на сток реки Москвы. М.: МАКС Пресс, 2015. – 168 с.
42. Георгиади А.Г., Коронкевич Н.И., Барабанова Е.А., Вишневская И.А., Зайцева И.С., Долгов С.В., Кашутина Е.А., Ясинский С.В. Особенности многолетних изменений речного стока Волги и Дона под влиянием климатических и антропогенных факторов // Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г.». Сборник научных трудов. Т. 1. Петрозаводск, Карельский научный центр РАН, 2015. С. 109-115.
43. Закруткин В.Е., Шишкина Д.Ю., Долгов С.В.. Закономерности антропогенного преобразования малых водосборов степной зоны юга России (на примере Ростовской области). Ростов-на-Дону, изд-во РостовГУ, 2004. 252 с.
44. M.L. Chua, J.H. Knoufta, A. Ghulama, A. Guzman, Z. Pane Impacts of urbanization on river flow frequency: A controlled experimental modeling-based evaluation approach // Journal of Hydrology V 495, 12 July 2013, Pages 1–12.
45. Ken Eng, David M. Wolock, Daren M. Carlisle River flow changes related to land and water management practices across the conterminous United States // Science of the Total Environment 463–464 (2013) 414–422.
46. Andrew S. Goudie The Human Impact on the Natural Environment: Past, Present, and Future John Wiley & Sons, 2013, pp. 424.
47. Hansen, M. C., P. V. Potapov, R. Moore, M. Hancher, S. A. Turubanova, A. Tyukavina, D. Thau, S. V. Stehman, S. J. Goetz, T. R. Loveland, A. Kommareddy, A. Egorov, L. Chini, C. O. Justice, and J. R. G. Townshend. 2013. “High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change.” Science 342 (15 November): 850–53. Data available on-line from: <http://earthenginepartners.appspot.com/science-2013-global-forest>.
48. СП 33-101-2003. Определение основных гидрологических характеристик. Госстрой РФ. 2004. 73 с.

49. О времени добегания и гидроморфометрических характеристиках при расчетах ливневых паводков на малых неизученных реках. Белоногова Н.А., Виноградов А.Ю., Коротыгина У.Е., Кузьмин Н.А., Минаев А.Н., Мотовилов Б.П., Никитина И.С., Салминен Э.О.// Региональная экология. 2016. №40.С. 68-80.
50. Георгиевский В. Ю., Ткаченко Ю. Ю. Катастрофический паводок в бассейне р.Адагум 6-7 июля 2012 г. и его причины. с. 42.
51. Consortium for Small-scale Modeling. URL: <http://www.cosmo-model.org/>.
52. Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR*, 113 pp. [doi:10.5065/D68S4MVH](https://doi.org/10.5065/D68S4MVH).
53. Норин С.В., Беликов В.В., Алексюк А.И. Моделирование движения паводковых вод по селитебным территориям // Гидротехническое строительство, №10, 2016. 28-34.
54. Матишов Г. Г., Клещенко А. В., Шевердяев И. В. Катастрофический паводок на Западном Кавказе в июле 2012 года: причины и последствия // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. Т.4, 2014, с. 291-303.
55. Горошков И. Ф. Гидрологические расчёты. Ленинград: Гидрометеиздат, 1979. 432 с.
56. Юрцев Б. А., Камелин Р. В. Программы флористических исследований разной степени детальности.— В кн.: Теоретические и методические проблемы сравнительной флористики. Л., 1987. С. 219—242.
57. Ермолаева, О Ю. К классификации растительных сообществ высокогорных ключей и ручьев Западного Кавказа// Материалы VIII междунар. конф. «Биологическое разнообразие Кавказа». Ч.1. Ботаника и микология. Нальчик, КБГСХ. 2006. с. 30-31.
58. Зернов А. С. Флора Северо-Западного Кавказа. Москва : Товарищество научн. изд. КМК, 2006. с. 664.

59. Шагаров Л.М. Геоэкологические особенности и рациональное использование буковых и дубовых лесов черноморского побережья Кавказа: автореферат дисс. канд. геогр. наук (спец. 25.00.36 геоэкология). Ростов-на-Дону. 2013. 24 с.
60. Карпачев С.П., Щербаков Е.Н. Количественная оценка ветровально-буреломной древесины// Лесопромышленник.-2010. №3. Т.55. С.23-26.
61. Мониторинг|Эмерсит. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.emercit.com/newmap (дата обращения 14.04.2016).
62. William Scharffenberg, Paul Ely, Steve Daly, Matthew Fleming, and Jay Pak Hydrologic modeling system (HEC-HMS): physically-based simulation components. 2nd Joint Federal Interagency Conference, Las Vegas, NV, June 27 - July 1, 2010.
63. HEC-RAS – Hydrologic Engineering Center URL: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/> [Online].
64. Reuter H.I, A. Nelson, A. Jarvis, 2007, An evaluation of void filling interpolation methods for SRTM data, International Journal of Geographic Information Science, 21:9, 983-1008. URL: <http://srtm.csi.cgiar.org/download/Reuteretal2007.pdf> [Online].
65. ASTER Global Digital Elevation Map Announcement. URL: <https://asterweb.jpl.nasa.gov/gdem.asp> [Online].
66. ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) URL: <http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/eng/index.E.html> [Online].
67. LP DAAC. Global Data Explorer. URL: <https://gdex.cr.usgs.gov/gdex/> [Online].
68. Reverb| ECHO. The Next Generation Earth Science Discovery Tool URL: <http://reverb.echo.nasa.gov/reverb/> [Online].
69. Terrain Processing and HMS-Model Development using GeoHMS URL: <https://web.ics.purdue.edu/~vmerwade/education/geohms.pdf> [Online].
70. HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension. User's Manual. Version 10.1. February 2013. URL: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf [Online].
71. Smith, R. E., and J.-Y. Parlange (1978), A parameter-efficient hydrologic infiltration model, Water Resour. Res., 14(3), 533–538.

72. Unsaturated zone Hydrology for Scientists and Engineers. James A. Tindall, James R. Kunkel, Dean E. Anderson. Upper Saddle River, N.J., Prentice Hall, 1999.
73. U.S. Department of Agriculture. Soil Texture Calculator. URL: http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/?cid=nrcs142p2_054167 [Online].
74. Feldman, Arlen D. Hydrologic modeling system HEC-HMS. Technical reference manual. Davis, CA : s.n., 2000.
75. Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W. Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York : s.n., 1988.
76. Miller, W. A., and Cunge, J. A. Simplified equations of unsteady flow. [book auth.] Yevjevich V. Mahmood K. Unsteady flow in open channels. Ft. Collins, CO : Water resources publications, 1975.
77. HEC-GeoHMS Geospatial Hydrologic Modeling Extension. User's Manual. Version 10.1. February 2013. URL: http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/documentation/HEC-GeoHMS_Users_Manual_10.1.pdf [Online].
78. Селекция и распознавание на основе локационной информации / А. Л. Горелик, Ю. Л. Барабаш, О. В. Кривошеев, С. С. Эпштейн; Под ред. А. Л. Горелика.—М.: Радио и связь, 1990.— 240 с.
79. Гидрометцентр России. Фактический уровень воды на реках бассейна Кубани [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.meteoinfo.ru/kuban>. (дата обращения 14.04.2016).
80. Mel'nikova, O.N., Pokazeev, K.V. & Rozhdestvensky, A.E. The laboratory modeling of the catastrophic flood in Krymsk // Moscow University Physics Bulletin September 2013, Volume 68, Issue 5, pp 426–430.
81. ГТС Неберджаевского водохранилища. Институт безопасности гидротехнических сооружений. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ibgts.ru/works/vodokhranilischa-menee-50/gts-neberdzhayevskogo-vodokhranilishcha/> (дата обращения 14.04.2016).
82. «Выполнение подрядных работ по объекту: «Защита территорий Крымского района Краснодарского края от негативного воздействия вод рек Адагум,

Неберджай, Баканка». Канализация русла реки Адагум (1-й этап. 1 пусковой комплекс).» Закупка №0318200063914002976 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea44/view/common-info.html?regNumber=0318200063914002976> (дата обращения 14.04.2016).

83. «Выполнение подрядных работ по объекту: «Защита территорий Крымского района Краснодарского края от негативного воздействия вод рек Адагум, Неберджай, Баканка». Канализация русла реки Адагум (1-й этап. 2 пусковой комплекс).» Закупка №0318200063914002974 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea44/view/common-info.html?regNumber=0318200063914002974> (дата обращения 14.04.2016).

84. «Выполнение подрядных работ по объекту: «Защита территорий Крымского района Краснодарского края от негативного воздействия вод рек Адагум, Неберджай, Баканка». Вынос инженерных коммуникаций» Закупка №0318200063914002445 [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

<http://zakupki.gov.ru/epz/order/notice/ea44/view/common-info.html?regNumber=0318200063914002445> (дата обращения 14.04.2016).

85. OpenStreetMap contributors. (2015) Planet dump [Data file from 21.04.2017]. URL: <https://planet.openstreetmap.org> [Online].

86. Integral and sustainable design of multifunctional flood defences. The Netherlands. Rotterdam. URL: <http://www.flooddefences.org/rotterdam.html> [Online].

87. Kanning, W., van Baars, S., van Gelder, P.H.A.J.M., & Vrijling, J.K., 2007. Lessons from New Orleans for the design and maintenance of flood defence systems. Submitted paper for ESREL2007, Stevanger June 2007, Norway. URL: http://www.citg.tudelft.nl/fileadmin/Faculteit/CiTG/Over_de_faculteit/Afdelingen/Afdeling_Waterbouwkunde/sectie_waterbouwkunde/people/personal/gelder/publications/papers/doc/paper174.pdf [Online].

88. EU – China River Basin Management Programme. Technical Report 073. No.1. Document Flood Security Analysis. Flood Risk Strategy Team. July 2012.

89. P. Sayers, Y. Li, G. Galloway, E. Penning-Rowsell, F. Shen, K. Wen, Y. Chen, and T. Le Quesne. 2013. Flood Risk Management: A Strategic Approach. Paris, UNESCO.

90. Bouchard, B., Goncalo, A., & Susienka, M et al. (2007, December 13) Improving flood risk management in informal settlements of Cape Town. An interactive qualifying project submitted to the faculty of Worcester Polytechnic Institute in partial fulfilment of the requirements for the degree of bachelor of science. City of Cape Town: Roads & Stormwater Department. URL: <https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-121307-110919/unrestricted/FinalReport.pdf> [Online].
91. Hossain, M. Z., Islam, M. T., Sakai, T. and Ishida, M. 2008. Impact of tropical cyclone on rural infrastructures in Bangladesh. *Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal*, 10(2): 1–13. URL: <http://www.cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/viewFile/1036/1029> [Online].
92. DEFRA (2005), Making Space for Water: Taking Forward a New Government Strategy for Flood and Coastal Erosion Risk Management in England, First Government Response to the Autumn 2004 Making Space for Water Consultation Exercise, Department for the Environment, Food and Rural Affairs, London. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/84317.pdf> [Online].
93. DIRECTIVE 2007/60/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks (Text with EEA relevance). URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2007:288:0027:0034:en:PDF> [Online].
94. Interagency Floodplain Management Review Committee (IFMRC). 1994. Sharing the Challenge: Floodplain Management into the 21st Century. Report of the Interagency Floodplain Management Review Committee to the Administration Floodplain Management Task Force. Washington DC, FEMA.
95. Galloway, G. 2005. Corps of Engineers responses to the changing national approach to floodplain management since the 1993 Midwest flood. *Journal of Contemporary Water Research and Education*, Vol. 1, No. 1, pp. 5–12.
96. Kahan, J. P., Wu, M., Hajiamiri, S. and Knopman, D. 2006. From Flood Control to Integrated Water Resource Management: Lessons for the Gulf Coast from Flooding in Other Places in the Last Sixty Years. Santa Monica, Calif., RAND Corporation.

96. Указ Президента Российской Федерации от 17 июля 2012 г. N 1015 "О мерах по ликвидации последствий стихийного бедствия - наводнения в Краснодарском крае" [Электронный ресурс]. Режим доступа. <https://rg.ru/2012/07/18/navodnenie-likvidacia-site-dok.html> (дата обращения 02.06.2016).
97. June floods of 2013 along the Austrian Danube. URL: http://www.ibs-technics.com/fileadmin/documents/EN_Projektblatt_Flut_A_2013_3.pdf [Online].
98. Machland-Damm GmbH und MDB Machland-Damm Betriebs GmbH URL: <http://www.machlanddamm.at/> [Online].
99. June floods of 2013 along the Austrian Danube IBS-ZENTRALE. URL: http://www.ibs-technics.com/fileadmin/documents/EN_Projektblatt_Flut_A_2013_3.pdf [Online].
100. Волосухин В. А., Чижов Е. А., Чижов А. Е., Новиков С. Г., Чижов М. Е. Наводнения: проблемы снижения ущербов. Обоснования защиты // Гидротехника. 2011. № 2 (23). С. 46–51.
101. Freiwillige Feuerwehr der Stadt Grein A-4360 Grein an der Donau. URL: <http://www.ff-grein.com/> [Online].
102. Machland-Damm. Unser neues sicheres Donauufer. URL: <http://www.machlanddamm.at/de/2/30.html> [Online].
103. Постановление Правительства РФ от 18.04.2014 N 360 (ред. от 17.05.2016) "Об определении границ зон затопления, подтопления" (вместе с "Правилами определения границ зон затопления, подтопления"). [Электронный ресурс]. Режим доступа. <http://government.ru/media/files/41d4d54d8c933969db75.pdf> (дата обращения 02.06.2016).
104. Федеральный закон от 30 декабря 2015 г. N 431-ФЗ "О геодезии, картографии и пространственных данных и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации".
105. "Градостроительный кодекс Российской Федерации" от 29.12.2004 N 190-ФЗ (ред. от 30.12.2015) (с изм. и доп., вступ. в силу с 10.01.2016). [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (дата обращения 02.06.2016).

106. Генеральный план Крымского городского поселения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.krymsk-city.ru/index.php/2013-03-19-10-18-18/2014-07-01-16-39-39/2015-08-12-17-06-21/1137-2014-07-02-06-16-08.html> (дата обращения 02.06.2016).
107. Tennakoon, K.B.M. Parameterisation of 2D Hydrodynamic Models and Flood Hazard Mapping for Naga City, Philippines. ITC, 2004.
108. Методическое пособие по изысканиям, проектированию и расчетам периодически затопляемых участков автомобильных дорог и искусственных сооружений в соответствии с особенностями их строительства, эксплуатации, содержания и воздействия на окружающую природу. – М.: Союздорпроект, 1998. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://standartgost.ru/base/1/id0-51438/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D1%81%D0%BE%D0%B1%D0%B8%D0%B5#texts (дата обращения 02.06.2016).
109. Перевозников Б.Ф. Водопропускные сооружения лоткового типа. - М.: Транспорт, 1978. - 204 с.
110. ПНИ RFMEFI60414X0050 «Разработка компьютерной системы оперативного прогнозирования опасных природных явлений в бассейне, береговой зоне и акватории Азовского моря» в рамках ФЦП «Разработка компьютерной системы оперативного прогнозирования опасных природных явлений в бассейне, береговой зоне и акватории Азовского моря».