

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
**имени М.В. Ломоносова**

---

**ГЕОГРАФИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

*На правах рукописи*

*Белякова Пелагия Алексеевна*

**ПАВОДКОВЫЙ СТОК РОССИЙСКИХ РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО  
ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА**

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Научный руководитель: проф., д.г.н.  
Христофоров А.В.

**Москва – 2015**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ГЛАВА 1. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РОССИЙСКИХ РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА .....	10
1.1 Общая характеристика региона.....	10
1.2 Рельеф и геологическое строение .....	12
1.3 Почвенный и растительный покров.....	14
1.4 Климат региона .....	15
1.5 Гидрография и гидрологический режим рек .....	20
1.6 Климатические изменения водного режима рек .....	28
ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА .....	35
2.1 Процессы формирования стока горных рек.....	35
2.2 Модели формирования стока горных рек .....	43
2.3 Используемая прогностическая модель формирования стока рассматриваемых рек .....	54
ГЛАВА 3. ПРОГНОЗ СТОКА РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА .....	66
3.1 Исходная гидрометеорологическая информация.....	66
3.2 Методика прогнозирования расходов воды на реках Черноморского побережья Кавказа.....	73
3.3 Прогнозирование уровней и максимальных расходов воды.....	81
3.4 Оценка погрешности и эффективности предлагаемой методики прогноза .....	85
ГЛАВА 4. ВЕРОЯТНОСТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАВОДКОВ НА РЕКАХ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА .....	95
4.1 Постановка задачи вероятностного прогноза.....	95
4.2 Статистический анализ ошибок прогноза максимальных и среднесуточных расходов воды .....	100

4.3 Вероятностное прогнозирование максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки .....	108
4.4 Вероятностное прогнозирование критических осадков с заблаговременностью одни сутки .....	112
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	120
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	138
1. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Вулан – с. Архипо-Осиповка. ....	138
2. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Туапсе – г. Туапсе.....	145
3. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Куапсе – с. Мамедова Щель. ....	153
4. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс.....	161
5. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Сочи – с. Пластунка. ....	169
6. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Сочи – г. Сочи.....	177
7. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Мзымта – п. Красная Поляна. ....	185
8. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Мзымта – п. Казачий Брод. ....	193

## ВВЕДЕНИЕ

Темой исследования является прогнозирование паводков на российских реках Черноморского побережья Кавказа.

### Актуальность исследования.

Вызванные дождями и снеготаянием паводки характеризуются интенсивным увеличением расходов и уровней воды и могут создавать угрозу наводнения и разрушения объектов в поймах рек. Территория Черноморского побережья Кавказа (ЧПК) является одним из наиболее неблагоприятных регионов Российской Федерации с точки зрения ущерба, причиняемого паводками. По удельному ущербу от наводнений на единицу площади он на порядок превышает подобный показатель для рек России в целом, поэтому проблема защиты населения и хозяйственных объектов от опасных паводков в данном регионе стоит особенно актуально [4, 11, 81, 102, 113]. Наблюдающиеся практически в течение всего года паводки являются характерной особенностью водного режима рек ЧПК. Эту особенность необходимо учитывать при решении задач рационального использования водных ресурсов этого региона, развитие которого было ускорено подготовкой к XXII Зимним Олимпийским играм в г. Сочи и созданием спортивно-оздоровительных комплексов [5, 8, 50].

Необходимость принятия своевременных мер по снижению негативных социальных и экономических последствий от прохождения опасных паводков и особенность водного режима рек Черноморского побережья Кавказа делают особенно актуальной разработку методик ежедневного прогнозирования расходов и уровней воды. Эта необходимость отражена в техническом проекте «Система раннего предупреждения об опасных явлениях на территории Северокавказского Федерального округа, подсистема гидрологических наблюдений и прогнозирования», который выполнялся при участии автора отделом речных гидрологических прогнозов Гидрометцентра России в рамках ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020».

### Состояние изученности проблемы.

В настоящее время процессы формирования паводкового стока горных рек изучены достаточно хорошо. Их наиболее полный анализ содержится в работах А.Н. Бефани [16], А.Н. Важнова [27], S.L. Dingman [124] и в монографии *Studies in Mountain Hydrology* [137].

Различные варианты описания этих процессов содержатся в многочисленных работах, посвященных моделированию речного стока. Накопленный в этой области опыт обобщен в монографии Л.С. Кучмента [62], в Руководстве по гидрологической практике Всемирной Метеорологической Организации [143] и в подготовленной под редакцией Н.И. Алексеевского монографии «Закономерности гидрологических процессов» [46].

Современная теория и практика гидрологических прогнозов располагает достаточно обширным арсеналом средств, необходимых для разработки методик краткосрочного прогнозирования паводков на горных реках в различных природных условиях и уровнях гидрометеорологической изученности их водосборов. Они изложены во втором выпуске Руководства по гидрологическим прогнозам [95] и в подготовленном ВМО руководстве *Manual on Flood Forecasting and Warning* [145].

Природные условия, процессы формирования стока, водный режим и наиболее выдающиеся паводки на реках Черноморского побережья Кавказа достаточно подробно рассмотрены в монографии П.М. Лурье [65] и монографии В.Д. Панова, А.А. Базелюка и П.М. Лурье [81]. Эти монографии дополняются приведенными в списке использованных источников работами, посвященными почвенному и растительному покрову, пространственному распределению и режиму осадков, снежному покрову, стоку рек данного региона.

Несмотря на достаточно высокую степень изученности проблемы, для российских рек ЧПК еще не были разработаны достаточно надежные методики краткосрочного прогнозирования расходов и уровней воды. Это и определило цели и задачи настоящего исследования.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является разработка методик получения ежедневного прогноза стока российских рек Черноморского побережья Кавказа.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- изучение процессов формирования паводков на реках исследуемого региона;
- создание базы гидрометеорологической информации по шести водосборам;
- выбор модели формирования талого и дождевого стока, соответствующей природным условиям данного региона и уровню его гидрометеорологической изученности;
- поиск оптимальной формулы получения ежедневного прогноза расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки;
- разработка методики прогнозирования максимальных расходов и уровней воды для створов, не оборудованных самописцами;
- проверка методик с целью определения их точности и эффективности;
- разработка схемы оценки риска превышения критических значений уровней и расходов воды, соответствующих различной степени опасности для каждого речного створа.

Объект исследования – реки российской территории ЧПК: Вулан, Туапсе, Куапсе, Западный Дагомыс, Сочи, Мзымта.

Предмет исследования – процессы формирования и прохождения паводков на реках Черноморского побережья Кавказа.

Теоретическую и методологическую основу исследования составляют: комплексный географический анализ закономерностей водного режима горных рек, моделирование процессов формирования паводков и методы статистического анализа данных гидрологических и метеорологических наблюдений.

Информационную базу исследования составляют: содержащиеся в справочнике «Ресурсы поверхностных вод СССР» данные о водосборах шести рек ЧПК; предоставленные Гидрометцентром России ежедневные данные гидрометрических наблюдений на восьми постах; ежедневные данные наблюдений на метеорологических станциях, расположенных на соответствующих или соседних водосборах; результаты ежедневных прогнозов осадков и приземной температуры воздуха на сутки вперед по моделям «РЕГИОН», UKMO, NCEP и COSMO-RU07 для этих метеостанций; данные гидрологических ежегодников о срочных максимумах расходов воды и их среднесуточных значениях за весь период наблюдений.

Предмет защиты состоит в том, что на основе анализа закономерностей формирования паводков на реках ЧПК и с учетом уровня гидрометеорологической изученности данного региона разработана система методик их краткосрочного прогнозирования.

Вклад в науку состоит в том, что выполненное исследование демонстрирует возможность получения полезных для практики результатов даже на основе крайне ограниченной исходной информации при условии ее физически обоснованного и статистически корректного использования.

Научную новизну составляют выносимые на защиту положения.

1. Созданная база гидрометеорологической информации по шести водосборам Черноморского побережья Кавказа может быть использована для решения задач, связанных с защитой населения от опасных паводков и научным обоснованием мероприятий по использованию и охране водных ресурсов данного региона.

2. Быстрое формирование талого и дождевого стока, отсутствие снегомерных съемок и ограниченные возможности предсказания осадков приводят к тому, что заблаговременность достаточно надежного прогнозирования паводков на реках ЧПК не превышает одни сутки.

3. Полученная зависимость ожидаемого расхода воды от текущей и предшествующей водности реки, текущих и ожидаемых осадков и температуры

воздуха является достаточно тесной и отражает особенности формирования паводков на реках данного региона. Оценка параметров формулы получения прогноза для каждого месяца в отдельности обеспечивает учет изменения состояния снежного, почвенного и растительного покрова в течение года.

4. Разработанные методики позволяют получать достаточно надежные прогнозы среднесуточных и максимальных расходов и уровней воды в восьми речных створах на шести реках ЧПК с заблаговременностью одни сутки.

5. Предлагаемая схема получения прогноза речного стока в вероятностной форме позволяет оценивать риск превышения критических значений уровней и расходов воды, соответствующих различной степени опасности для каждого речного створа.

6. Разработана методика определения суточного слоя осадков на метеостанции, при выпадении которых в течение ожидаемых суток критические значения расходов и уровней воды могут быть превышены с заданной вероятностью.

Практическая значимость результатов исследования обусловлена тем, что предлагаемые методики краткосрочного прогнозирования расходов и уровней воды в детерминированной и вероятностной форме успешно прошли проверку в оперативном режиме и применяются в рамках автоматизированной системы предупреждения об опасных наводнениях на реках ЧПК в системе оперативных гидрологических прогнозов Росгидромета.

Собранные материалы используются студентами кафедры гидрологии суши МГУ на практических занятиях и при выполнении курсовых и дипломных работ. Полученные результаты могут использоваться в качестве примеров при чтении учебных курсов по гидрологии рек и гидрологическим прогнозам.

Апробация работы. Результаты диссертационного исследования докладывались на VII Гидрологическом съезде (Санкт-Петербург, 2013); на межрегиональной научно-практической конференции студентов, магистров и аспирантов «Вопросы гидрологии, геоэкологии и охраны водных объектов» (Пермь, 2014); на третьей открытой конференции Научно-образовательного

центра «Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления» (Москва, 2014) и на научном семинаре кафедры гидрологии суши МГУ (Москва, 2015 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 работ, из которых 2 – в рецензируемых журналах, утвержденных ВАК, и 2 – тезисы докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и приложения. Основной текст изложен на 137 страницах машинописного текста и включает 21 рисунок и 26 таблиц. Список использованных источников включает 111 отечественных, 33 зарубежных публикации и 3 Интернет-источника. Приложение содержит 63 страницы, 24 рисунка и 56 таблиц.

Пользуясь случаем, автор выражает благодарность сотруднику кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ Н.М. Юминой, сотрудникам отдела речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» С.В. Борщу, Ю.А. Симонову и Е.А. Леонтьевой за неоценимую помощь в работе над диссертацией и моральную поддержку, а также всей семье и друзьям, верящим в меня.

## ГЛАВА 1. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РОССИЙСКИХ РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА

### 1.1 Общая характеристика региона

Черноморское побережье Кавказа в пределах России – географический регион, занимающий южный склон Большого Кавказа в его северо-западной части. Территория его протянулась сравнительно узкой полосой на 410 км вдоль берега моря. Регион простирается от Таманского полуострова до южной государственной границы, занимая площадь около 8000 км<sup>2</sup>. На севере он ограничен Главным Кавказским хребтом, служащим основным водоразделом рек Черного, Азовского и Каспийского морей, на юге – рекой Псоу и Гагрским хребтом. На западе границей служит береговая линия Чёрного моря [67].

Причерноморская часть Краснодарского края хорошо освоена. Здесь постоянно проживает свыше 1,1 млн чел. Около 90% постоянного населения сосредоточено в прибрежной полосе шириной от 0,5 до 8 км, а 80% – в городах (Анапа, Новороссийск, Геленджик, Туапсе, Сочи, Адлер и др.) и городских поселениях. Это крупнейшая рекреационная зона России и важный сельскохозяйственный регион, активно развивающийся горнолыжный кластер и центр по переработке нефти, перевалке сухих и наливных грузов [67, 68, 99].

Водные ресурсы рек Черноморского побережья Кавказа используются в основном для водоснабжения, к юго-востоку от р. Туапсе также для орошения, обводнения и ведения рыбного хозяйства. Единственная ГЭС с деривационной компоновкой гидроузла расположена на р. Мзымте и почти не оказывает влияние на ее водный режим [5, 9, 81]. Исследованию возможного негативного воздействия рек на Олимпийские объекты посвящены работы [9, 49], а оценка влияния объектов строительства на водные объекты приведена в [9, 50].

Причерноморье отличается пестротой природных ландшафтов и условий формирования стока, обусловленная контрастным рельефом и особенностями распределения атмосферных осадков [67, 81, 93, 99]. В гидрологическом

отношении Черноморское побережье – обособленный специфический район, со множеством малых рек, впадающих в Черное море, отличающихся паводочным режимом стока, на реках которого часто формируются опасные паводки, приводящие к наводнениям [11, 67, 68, 102, 103].

На Черноморском побережье регулярные наблюдения Росгидромета проводятся на 14 гидрометрических постах на 12 реках [81]. После наводнений лета 2012 г. была создана автоматизированная система мониторинга паводковой ситуации Краснодарского края под управлением МЧС [70, 88, 103]. В настоящее время в регионе работает более 190 автоматических гидрологических комплексов, из них 97 на реках Черноморского побережья.

В данной работе основное внимание уделено бассейнам рек Вулан, Туапсе, Куапсе, Западный Дагомыс, Сочи и Мзымта, для которых в рамках обеспечения «Системы раннего предупреждения об опасных явлениях на территории Северо-Кавказского федерального округа, подсистемы гидрологических наблюдений и прогнозирования» разрабатывается система методик прогноза расходов и уровней воды в створах 8 гидрологических постов.

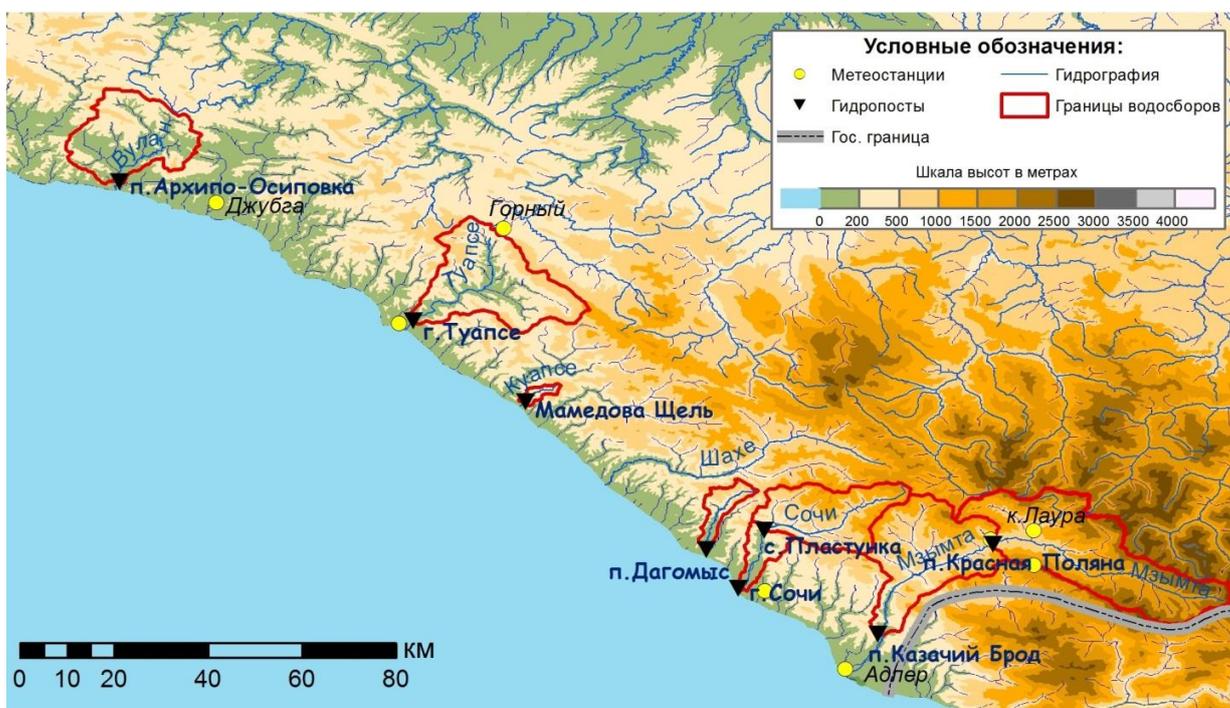


Рисунок 1.1. Физико-географическое положение изучаемых рек Черноморского побережья Кавказа

Основными факторами, определяющими характер формирования речного стока, являются климат и такие свойства водосборов, как рельеф и геологическое строение территории, мощность, механический состав и структура почвенного покрова под различными типами растительности. Они рассмотрены ниже.

## 1.2 Рельеф и геологическое строение

Рельеф бассейнов рек Черноморского побережья Кавказа преимущественно горный, образован сложной системой хребтов, постепенно повышающейся к юго-востоку территории [81, 112]. В том же направлении увеличивается ширина южного склона Большого Кавказа от 10–15 км в районе р. Гастогайки до 35–40 км в районе долины р. Мзымты.

В тектоническом отношении территория приурочена к юго-западному борту мегаантиклинория Большого Кавказа. Высочайшей осью антиклинория является Главный Кавказский хребет с выходами на поверхность кристаллических и метаморфических пород (гранитоидов, кристаллических сланцев, гнейсов). Отметки вершин Главного Кавказского хребта достигают 400-600 м в северо-западной части и порядка 4000 м в юго-восточной.

В складчатой системе южного склона Кавказа преобладают осадочные породы различного возраста – мергели, сланцы, известняки и песчаники. Эти коренные породы обнажаются на склонах гор или неглубоко залегают под чехлом элювиальных, делювиальных или пролювиальных отложений [37, 65].

Параллельно Главному хребту на расстоянии 10-20 км исследователи выделяют Южный Боковой хребет [81, 82]. Он состоит из хребтов различной длины, основными являются Маркотхский, Пшада, Бзыч, Ачишхо, Аибга-Агепста. Южный Боковой хребет и Главный хребет соединяются между собой многочисленными короткими перемычками (Аутль, Ахцу и др.), которые на 500-1000 м ниже Главного и Южного Бокового хребтов [81]. Эти поперечные отроги являются водоразделами между верховьями рек южного склона.

К западу от горы Фишт (водораздел р. Шахе) и прибрежные части всех хребтов имеют среднегорный и низкогорный рельеф. Здесь широко развиты карстовые формы рельефа. К востоку от горы Фишт рельеф приобретает высокогорный характер с широким проявлением гляциальных форм [82]. Высота основных хребтов влияет на продвижение воздушных масс и, следовательно, на климатические и гидрологические особенности территории. Так, к востоку от горы Фишт холодные воздушные массы с севера весьма редко переваливают через Главный Кавказский хребет, хотя к западу от Туапсе это нормальное явление, сопровождающееся сильным ветром борой. В дальнейшем водосбор реки Туапсе будет служить разделом климатических условий территории и режима водного стока рек.

Долины основных рек (Пшада, Вулан, Туапсе, Сочи, Мзымта), берущих начало на Главном или Южном Боковом хребте, состоят из длинных продольных отрезков и коротких поперечных, которые прорезают хребты южного склона Большого Кавказа. Реки в этих местах протекают в глубоких эрозионных ущельях, имеющих вид каньонов с отвесными стенками.

Долины и окаймляющие их хребты превращают Черноморское побережье Кавказа в цепь относительно обособленных речных бассейнов. Внутри каждой бассейновой «ячейки» формируются потоки морского воздуха в горы и горного – к морю и осуществляется сток поверхностных и подземных вод [99].

Большая крутизна склонов, достигающих часто 40-60°, и сильная расчлененность рельефа способствуют быстрому стеканию дождевых и талых вод в русла рек [93, 104].

По мере продвижения с северо-запада на юго-восток увеличивается перепад высот в бассейнах исследуемых рек и их средняя высота водосборов. Для рек северо-запада Черноморского побережья (реки Вулан и Туапсе), а также небольших приморских рек, водосборы которых не достигают Главного Кавказского хребта (реки Куапсе, Западный Дагомыс) средние высоты водосборов не превышают 400 м над уровнем моря. Водосборы рек Сочи и Мзымта лежат в диапазонах высот от 0 до 2250 м (г. Бол. Чура) и 3257 м

(г. Агепста) соответственно. Средняя высота бассейна Сочи в створе с. Пластунка составляет 840 м и уменьшается до 720 м в г. Сочи. Средняя высота бассейна Мзымты в пос. Красная Поляна превышает 1650 м и к створу нижнего поста в п. Казачий Брод составляет 1340 м [92, 93].

### 1.3 Почвенный и растительный покров

Почвенный покров в горных условиях Причерноморья отличается большой пестротой. Наиболее распространены бурые горные лесные почвы. Они занимают склоны разной экспозиции и крутизны, но чаще встречаются на средних и нижних частях склонов и во влажных балках, заросших лесом. Также распространены перегнойно-карбонатные почвы, формирующиеся на глинистых сланцах, мергелях и песчаниках. Лесные почвы имеют высокую скважность, что способствует формированию внутрипочвенного стока по контакту с водоупором и уменьшению поверхностной составляющей стока [112].

В прибрежной зоне к юго-востоку от устья р. Туапсе распространены почвы влажных субтропиков – красноземы и желтоземы [93].

Аллювиальные почвы связаны с пойменными террасами горных рек и ручьев и встречаются в виде прерывистых полос. Делювиальные почвы образуются у подножий склонов в результате смыва почв со склонов и отложения смытой массы на нижних элементах рельефа.

Выше 2000 м преобладают дерновые и слабоподзоленные луговые почвы. Они отличаются малой мощностью (30–40 см) и легким механическим составом. На склонах северной экспозиции, под густыми зарослями рододендрона, формируются торфянистые горно-луговые почвы. В самой верхней части альпийской зоны почвы имеют весьма примитивный характер с малой долей мелкозема и органического вещества. Маломощные почвы крутых склонов встречаются на обрывистых склонах под изреженной растительностью. К нижним частям обрывистых склонов приурочены осыпи [16, 65, 112].

Для данной территории характерны следующие пояса растительности: лиственных лесов, темнохвойных лесов, субальпийский, альпийский. Леса занимают более 80% площади [19, 99]. В северной части побережья между р. Гастогайка на северо-западе и р. Шапсухо на юго-востоке в зоне лиственных лесов произрастает аридное редколесье и леса из дуба скального, дуба черешчатого, бука и граба. При продвижении на юго-восток леса произрастают на высоте до 1300-1400 м, представленные смешанными субтропическими лесами из дуба Гартвиса, дуба имеретинского, клена красивого, ясеня и др. Значительная площадь из-под субтропических смешанных лесов используется под сельскохозяйственные культуры.

Выше зоны смешанных субтропических лесов расположены зоны каштановых (от 500-600 м до 1000-1100 м) и буковых лесов (от 1000-1100 м до 1500-1600 м). Буковые леса сохранились хорошо. Они играют большую водорегулирующую и почвозащитную роль. Высокогорный пояс темнохвойных буково-пихтовых лесов приурочен к высотам от 1300-1400 м до 1900-2000 м. Субальпийская растительность в виде криволесья, редколесья, высокогорных стелющихся кустарников, высокотравья и лугов встречается до высот 2300-2400 м. Высокогорную часть южного склона Большого Кавказа занимает альпийский пояс. Широко распространены альпийские ковры и плотнодерновые луга со злаковыми или осоковыми компонентами [81, 112].

#### 1.4 Климат региона

Циркуляционные условия Черноморского побережья Кавказа определяются сезонными смещениями умеренной зоны западного переноса и субтропической зоны повышенного давления с разделяющим их полярным (умеренным фронтом). Специфика региона – пограничное положение с зоной умеренного климата. Поэтому в основном преобладают подвижные циклоны и антициклоны, а обширные области подвышенного давления наблюдаются лишь эпизодически [99, 101].

Разнообразие климатических условий объясняется сложным строением рельефа, под влиянием которого видоизменяется циркуляция воздушных масс. Черноморское побережье – наиболее увлажненный регион Кавказа благодаря влиянию Черного моря и преобладающим в теплый период западным ветрам. Особенно много атмосферных осадков выпадает на юго-западных, наветренных склонах Большого Кавказа [93].

Из-за закрытости с трех сторон хребтами, способствующими стационарированию средиземноморских циклонов, Черноморское побережье Кавказа отличается ровным и мягким климатом и с положительными январскими температурами до высоты 500–600 м. При этом в горах возникает сложная местная циркуляция, приводящая к перераспределению как жидких, так и особенно твердых осадков. Здесь имеют место почти все известные типы местной циркуляции, но наиболее развиты бризы, бора, горно-долинная и фёны [6, 18, 81].

В прибрежной зоне региона среднегодовая температура воздуха в целом увеличивается с северо-запада на юго-восток главным образом за счет потепления в этом направлении зимнего сезона. В районе Анапы и Новороссийска среднегодовая температура воздуха составляет 10-12°C, а в районе Сочи – 14°C [81, 99]. В среднегорной и высокогорной зоне также происходит рост средней температуры воздуха в направлении с северо-запада на юго-восток [81, 101].

С увеличением высот местности месячные и годовые температуры воздуха снижаются из-за проявления высотной климатической поясности.

Продолжительность периода с положительными температурами воздуха зависит от района, а также от высоты над уровнем моря. Непосредственно на побережье температуры воздуха редко опускаются ниже 0°C. В предгорьях на высотах 200-1000 м длительность безморозного периода составляет от 260-280 дней, в среднегорье на высоте 2000 м она уменьшается до 220 -240 дней и до 140-160 дней – на высоте 3000м [81, 84].

Довольно типичным погодным явлением для рассматриваемой территории являются оттепели. Наиболее часты и продолжительны адвективные оттепели при юго-западных и западных процессах. Оттепели влияют на гидрологический режим, вызывая зимние паводки. Паводки могут быть чисто снеговые и смешанные. Отмечаются зимние паводки на высотах до 600-800 м, причем в северо-западной части (до бассейна р. Туапсе) они охватывают весь водосбор реки, а к юго-востоку – как правило, только нижнее течение рек, истоки которых лежат на высотах более 600-800 м (реки Шахе, Сочи, Мзымта, Псоу) [81].

Режим осадков рассматриваемой территории обусловлен общей циркуляцией атмосферы и сложной орографией местности. Осадки в основном определяются циклонической деятельностью, но роль внутримассовых процессов тоже велика [101]. В условиях горных стран количество осадков зависит от высоты местности, ориентации хребтов по отношению к влагонесущим массам воздуха, доступности их этим массам (можно выразить через азимут направленности речных долин) и от особенностей синоптических процессов [6, 12, 97].

В прибрежной зоне южного склона Большого Кавказа годовое количество осадков увеличивается с северо-запада на юго-восток от 460 мм в Анапе до 1430 в Туапсе и 1660 мм в Сочи. В горных районах южного склона Большого Кавказа количество осадков резко возрастает, достигая (наблюденного) максимума в бассейне Мзымты на хребте Ачишхо (более 3200 мм/год).

В целом с увеличением высоты местности возрастает количество осадков. Однако рост осадков происходит до определенной высоты, обусловленной высотой уровня конденсации [12, 18, 65]. Максимальное количество осадков на Западном Кавказе выпадает по разным оценкам в диапазоне высот 1800–3200 м [18]. Большое значение имеет и простирающиеся хребты и возникающий от них барьерный эффект, ограничивающий количество осадков в так называемой зоне «дождевой тени» непосредственно за хребтами.

Наиболее явное и инструментально подтверждённое наличие «дождевой тени» прослеживается в бассейне Мзымты, характеризующемся сложным рельефом. При преобладающем южном и юго-западном направлении воздушных масс хребты Аибга-Ацетука затрудняют их проникновение к Главному хребту. Зона «дождевой тени» распространяется на Краснополянскую котловину и частично на южный склон Главного хребта (табл. 1.1).

Таблица 1.1. Количество атмосферных осадков по долине р. Мзымта [81]

Станция	Высота над ур.м., м	Количество осадков, мм		
		XI-III	IV-X	год
Адлер	13	676	701	1377
Молдованское	73	772	772	1544
Кепш	199	1144	1055	2199
Красная Поляна	566	893	902	1795
Пслух	930	866	895	1761
Ачишхо	1880	1820	1422	3242

Наибольшие вертикальные градиенты осадков отмечаются в зонах восхождения (Адлер – Кепш, Красная Поляна – Ачишхо). На южном склоне Главного хребта и на хребтах Ачишхо, Псехоко и Грушевый выпадает максимальное количество осадков (на Ачишхо в среднем 3242 мм). В «дождевой тени» отмечаются отрицательные градиенты осадков (Кепш – Красная Поляна, Красная Поляна - Пслух).

В пределах Черноморского побережья Кавказа внутригодовое распределение осадков характеризуется зимним максимумом осадков, а минимум приходится либо на весну (в прибрежной зоне), либо на лето (в горной части) (рис. 1.2). В зимние месяцы норма осадков вдвое превосходит норму осадков весенне-летних месяцев. Соотношение жидких и твердых

осадков сильно колеблется в зависимости от высоты местности: на побережье доля твердых осадков не превышает 5 – 15%, а на хр. Ачишхо превышает 50%.

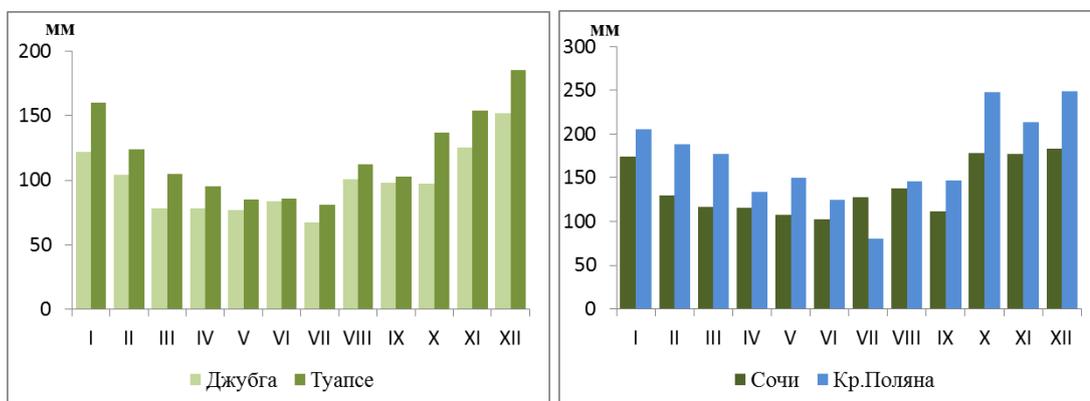


Рисунок 1.2. Годовой ход атмосферных осадков

По условиям залегания снежного покрова на Кавказе выделяют 3 зоны: неустойчивого, переменного и постоянного снежного покрова [65, 85, 86]. Зона неустойчивого снежного покрова распространена в прибрежной полосе Чёрного моря и в предгорьях Западного Кавказа до высот 500-800 м. Продолжительность залегания снега не превышает 50-70 дней, в отдельные зимы снежный покров не образуется. Зона переменного снежного покрова располагается выше зоны неустойчивого покрова. Бесснежных зим здесь не бывает. Продолжительность и высота снежного покрова сильно варьируют в зависимости от высоты, экспозиции склона, растительности. Сплошная зона постоянного снежного покрова в пределах рассматриваемой территории не формируется, т.е. большая часть водосборов лежит ниже орографической снеговой линии. Отдельные снежники присутствуют в бассейне Мзымты (на склонах хр. Ачишхо, Аибга-Ацетука и проч.), и имеется несколько ледников на склонах хр. Ацетука и Псеашха (водосборы рек Тихая и Пслух) [48, 80, 83].

На южном склоне Большого Кавказа значительное количество осадков обусловлено не только их высокой частотой, но и высокой интенсивностью выпадения. Так максимальное суточное количество осадков на м/с Красная Поляна было зафиксировано в августе 1977 г. и составляло 188 мм, а на м/с

Ачишхо – в июне 1956 г. (298 мм). Эти дожди стали причиной наиболее высоких паводков за соответствующие месяцы. В 1991 г. с 31 июля по 1 августа в бассейне р.Туапсе и на юго-восток до р.Хосты выпало 50,2-240,7 мм осадков. В результате на реках сформировались катастрофические паводки, исторический максимум расхода воды был отмечен на рр. Туапсе ( $2300 \text{ м}^3/\text{с}$ ), Псекупс и Куапсе ( $110 \text{ м}^3/\text{с}$ ) [65, 67, 68, 81].

### 1.5 Гидрография и гидрологический режим рек

Согласно гидрологическому районированию Черноморское побережье Кавказа в пределах России делится на Северо-Черноморский и Южно-Черноморский сектор Южного склона Большого Кавказа [81]. К первому сектору относятся реки на участке от р. Гастогайка до р. Туапсе, ко второму – реки, протекающие к юго-западу от р. Туапсе.

Основные реки Северо-Черноморского сектора – Гастогайка, Мезыб, Пшада, Вулан, Джубга, Шапсухо, Агой, Туапсе с площадью бассейнов до  $352 \text{ км}^2$  и длиной рек до 35 км. Густота речной сети изменяется от  $0,31 \text{ км}/\text{км}^2$  на севере (р.Анапка) до  $0,8\text{--}1,0 \text{ км}/\text{км}^2$  (рр.Туапсе, Джубга).

Основные реки Южно-Черноморского сектора – Аше, Псезупсе, Шахе, Сочи, Мзымта. Они характеризуются большими перепадами высот на водосборах и большей водностью. Густота речной сети изменяется от  $0,84 \text{ км}/\text{км}^2$  в бассейне р.Псезуапсе до  $1,04 \text{ км}/\text{км}^2$  в бассейне Мзымты. Из-за небольшой ширины южного склона Большого Кавказа длины наиболее крупных рек составляют 40–89 км, а площадь водосборов не превышает  $885 \text{ км}^2$ . Истоки наиболее крупных рек находятся на южном склоне Главного хребта. Средние высоты водосборов увеличиваются от 570 м (р.Аше) до 1309 м (р.Мзымта).

В целом для рассматриваемой территории дождевое питание рек составляет 60%, подземное – 22%, снеговое – 16%. Доля ледникового питания близка к нулю и достигает 2% на самых высокогорных участках рек Южно-

Черноморского сектора. Доля источников питания изменяется с увеличением высоты: дождевое уменьшается, снеговое и подземное увеличиваются. В Северо-Черноморском секторе доля дождевого питания выше и колеблется в пределах 60 – 90% (68% для р. Туапсе и 89% для р. Вулан). Доля снегового питания в этом секторе варьирует от 2 до 10% в зависимости от высоты водосбора. В Южно-Черноморском секторе доля дождевого питания меньше и колеблется в пределах 30 – 75% (36% для р. Мзымта). В зависимости от высоты водосбора доля снегового питания в этом секторе варьирует от 7 до 40% (39% для р. Мзымта).

За исключением высокогорных верховий малых рек с летним половодьем, в пределах российской части Черноморского побережья Кавказа выделяется два типа водного режима: реки с паводочным режимом и реки с половодьем, обусловленным снеготаянием, и дождевыми паводками [65, 81].

Реки с паводочным режимом располагаются в прибрежной полосе Черноморского побережья и берут своё начало в предгорьях. Для них характерен гребенчатый вид гидрографа с частым прохождением паводков с резко выраженными подъемами и спадами воды. Преобладают паводки, проходящие с ноября по март. За этот период на северо-западе территории проходит до 80% объема годового стока, к югу доля снижается до 65 – 70%.

Среди исследуемых рек тип водного режима с весенне-летним половодьем и дождевыми паводками имеют реки Сочи и Мзымта. На р. Сочи весеннее половодье имеет смешанное тало-дождевое происхождение. В течение всего года доля снегового питания составляет 17%, дождевого – 60%. Дождевые паводки формируют второй, менее высокий осенне-зимний максимум водности этой реки.

Для самых верхних высокогорных участков р. Мзымта и ее притоков характерно летнее снеговое половодье, на эту фазу режима приходится более 70% годового водного стока [65]. Половодье начинается в начале апреля, заканчивается конце сентября. Из-за малой мощности оледенения (менее 1,7 км<sup>2</sup>) доля ледникового стока составляет всего 0,1%. Доля снегового питания

Мзымты в створе г/п Красная Поляна составляет 39%, а к нижележащему посту сокращается до 30%. Дождевой поверхностный сток формирует в среднем 31% и 42% соответственно. Подземный сток составляет около 29% питания реки [81]. Весенне-летнее половодье проходит с апреля по июль (49-59% годового стока). У п. Красная Поляна с декабря по февраль, март на Мзымте наблюдается устойчивая зимняя межень, а в нижнем течении (в п. Казачий Брод – Адлер) паводки наблюдаются в любой сезон года и соответственно увеличивается доля дождевого питания.

Максимальные расходы воды на реках Северо-Черноморского сектора в 90% случаев формируются в период максимальной паводковой активности, т.е. с ноября по февраль. В Южно-Черноморском секторе максимальные за год расходы возможны во все месяцы, наиболее высокие – в период с июля по сентябрь. На Мзымте половина максимальных расходов воды приходится на период половодья, но зачастую они имеют смешанное тало-дождевое происхождение. Довольно опасными могут быть осенние паводки. Общая продолжительность паводков составляет 1–20 дней, а время подъема составляет от нескольких часов до нескольких суток.

В работе исследовался речной сток в 8 речных створах, расположенных на 6 реках Черноморского побережья Кавказа. Морфометрические характеристики водосборов и среднеголетние расходы воды приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. Основные характеристики исследуемых водосборов

река	пост	площадь водосбора, км <sup>2</sup>	длина реки, км	средняя высота водосбора, м	средний расход воды, м <sup>3</sup> /с
Вулан	с. Архипо - Осиповка	265	27	240	5,71
Туапсе	г. Туапсе	350	29	90	13,1
Куапсе	с. Мамедова Щель	14	6,2	380	0,72
Зап. Дагомыс	п. Дагомыс	48	20	365	2,44
Сочи	с. Пластунка	238	30	840	15,4
Сочи	г. Сочи	296	44	720	16,5
Мзымта	п. Красная Поляна	510	48	1670	33,8
Мзымта	п. Казачий Брод	839	75	1340	55,3

Строение водосборов исследуемых рек имеет следующие особенности [65, 93].

Река Вулан берет начало на южном склоне Главного хребта на высоте 520 м. Основными притоками являются Левая Щель и Текос. Густота речной сети 0,78 км/км<sup>2</sup>. Бассейн имеет асимметричную форму – около 74% приходится на правобережную часть. Склоны долины в верховьях выпуклые, ниже – прямые, часто ступенчатые. Русло реки умеренно извилистое, неразветвленное. Река протекает по галечному, почти плоскому дну. После прохождения высоких паводков русло часто меняет форму. Берега высокие в верхнем течении и низкие в нижнем. Годовая амплитуда колебаний уровня воды у с. Архипо-Осиповка может достигать 7,6 м. Минимальные расходы воды варьируют от 0,032 до 0,73 м<sup>3</sup>/с, максимальные – от 83,8 до 1050 м<sup>3</sup>/с.

В водном режиме р. Вулан выделяются два периода. В зимний период с ноября по февраль характерны высокие быстро сменяющиеся паводки, вызываемые дождями и таянием снега в верховьях. Объем стока реки за этот период значителен и может достигать до 80% годового стока. В летне-осенний период с июня по октябрь устойчивая межень редко прерывается дождевыми паводками. В августе-сентябре, когда дождей выпадает немного, наблюдается

наименьший сток. Среднегодовой расход воды равен  $5,71 \text{ м}^3/\text{с}$ . Представление о колебаниях водности реки и влиянии на него хода метеорологических элементов демонстрирует рисунок 1.3, на котором представлены графики колебаний ежедневных среднесуточных расходов воды, суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха в 2001 г.

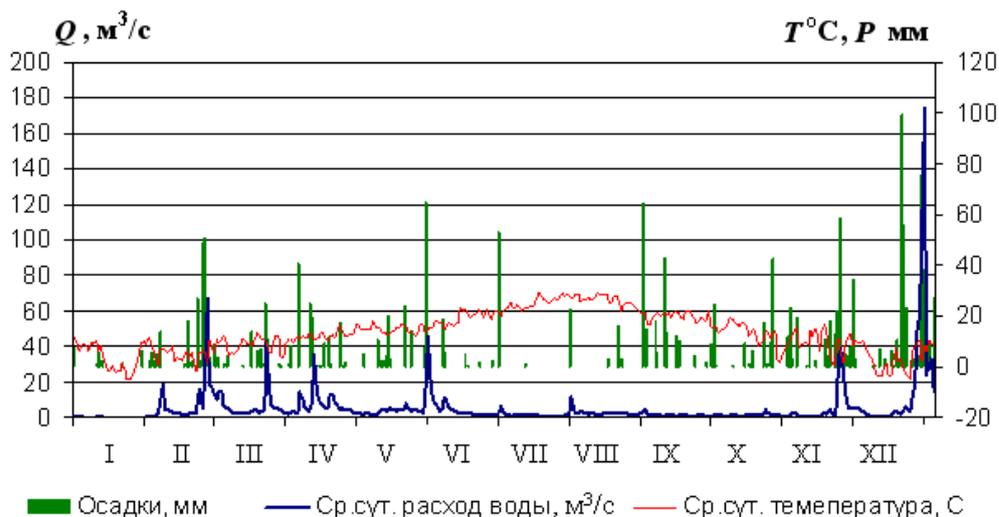


Рисунок 1.3. Гидрограф р. Вулан – с. Архипо-Осиповка и ход осадков и температуры воздуха на м/с Джубга в 2001 г.

Река Туапсе берет начало на южном склоне Главного хребта на высоте 540 м. Основными притоками являются Пшенахо, Пшияхо и Цыпка. Густота речной сети  $0,81 \text{ км}/\text{км}^2$ . Длина бассейна 27 км, средняя ширина 13 км. Рельеф бассейна горный с высотами 500–1000 м, сильно расчлененный. Склоны долины сливаются со склонами хребтов, сильно расчлененные, в основном выпуклые, реже прямые. Встречаются террасы высотой 5–7 м. Русло реки умеренно извилистое, неразветвленное. Вдоль правого берега реки в г. Туапсе построена дамба высотой до 8 м. Глубина потока в межень от 10 – 20 см на перекатах до 40 – 50 см на плесах.

Для водного режима р. Туапсе свойственны паводки, которые проходят в любой сезон года. Наиболее высокие паводки формируются, как правило, с декабря по март, но возможны и летом. С декабря по март проходит порядка

60% годового стока. Период относительно устойчивых низких уровней обычно начинается в мае и продолжается до середины-конца октября. Летний межень часто нарушается 2-4 невысокими паводками. В нижнем течении река периодически пересыхает (в среднем один раз в 7-10 лет). Среднемноголетний расход воды составляет  $13,1 \text{ м}^3/\text{с}$ . Наиболее высокие расходы были равны  $610 \text{ м}^3/\text{с}$  (28 ноября 1984 г.) и  $2300 \text{ м}^3/\text{с}$  (1 августа 1991 г.) и  $1625 \text{ м}^3/\text{с}$  (16 октября 2010 г.). Подъем уровня воды в створе г. Туапсе может превышать 5,4 м, а при катастрофических паводках – 7 и более метров. Представление о колебаниях водности реки и влиянии на него хода метеорологических элементов демонстрирует рисунок 1.4, на котором представлены графики колебаний ежедневных среднесуточных расходов воды, суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха в 1985 г.

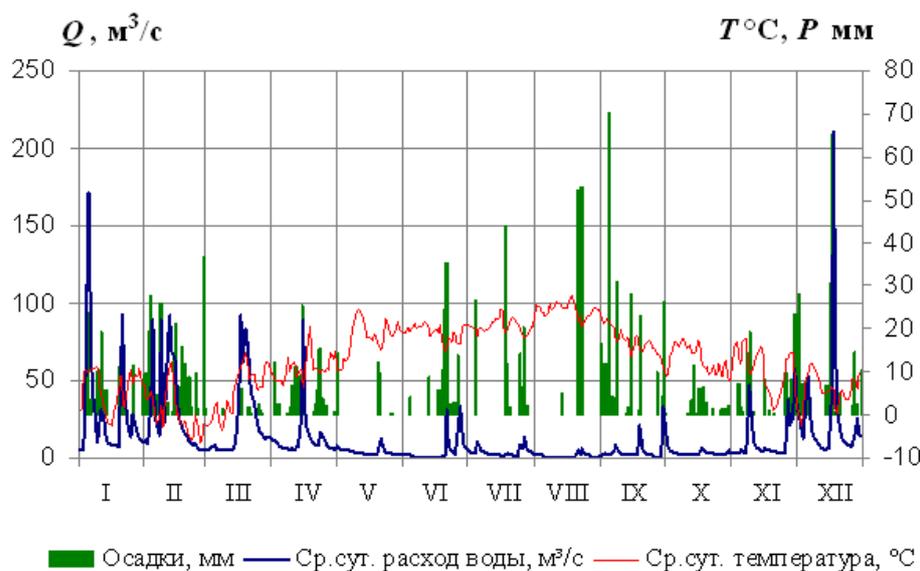


Рисунок 1.4. Гидрограф р. Туапсе в г. Туапсе, внутригодовой ход осадков и температуры воздуха на м/с Туапсе в 1985 г.

Река Сочи берет начало на высоте 1880 м. Основными притоками являются Ушха, Ац и Агва. Густота речной сети  $0,87 \text{ км}/\text{км}^2$ . Длина бассейна 35 км, средняя ширина 8,4 км. Рельеф бассейна горный с высотами в верховьях до 1000–2300 м, сильно расчлененный. Склоны крутые, местами отвесные. Русло

реки умеренно извилистое и умеренно разветвленное. Ширина русла растет от верховьев к устью до 40 м. В межень глубины меняются от 0,1–0,5 м на перекатах до 0,6–2,0 м на плесах. В пределах г. Сочи установлены берегоукрепительные дамбы. Многолетняя амплитуда уровня воды составляет 227 см у с. Пластунка и 327 см у г. Сочи. Минимальный расход воды в этих створах равен соответственно 0,11 и 0,20 м<sup>3</sup>/с, максимальный - 719 и 990 м<sup>3</sup>/с.

В течение года на р. Сочи формируется до 25 паводков (в среднем 18) чаще они проходят зимой (ноябрь–март). Наибольший расход воды был зафиксирован 22 августа 1997 г. и оценён в 990 м<sup>3</sup>/с. Среднегодовой расход воды в г. Сочи составляет 16,5 м<sup>3</sup>/с. Представление о колебаниях водности реки и влиянии на него хода метеорологических элементов демонстрирует рисунок 1.5, на котором представлены графики колебаний ежедневных среднесуточных расходов воды, суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха в 2003 г.

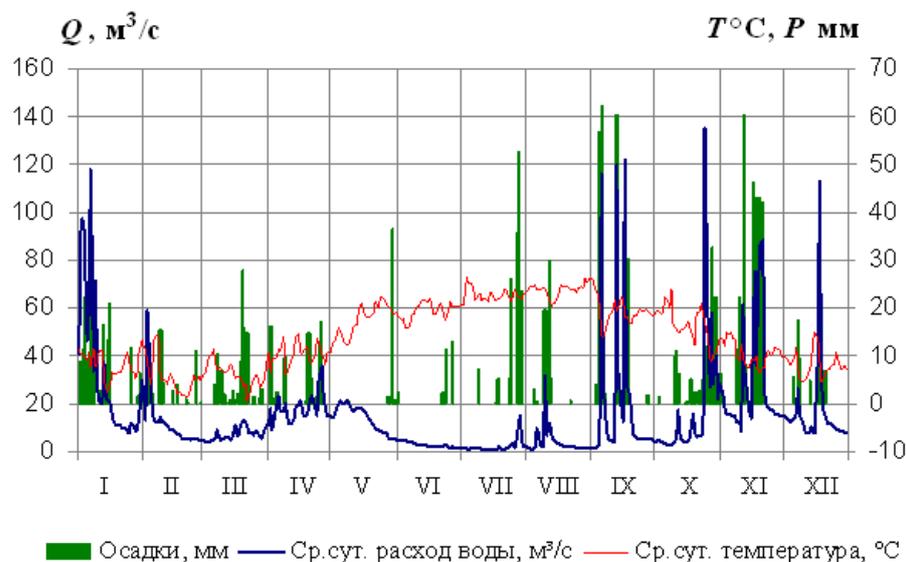


Рисунок 1.5. Гидрограф р. Сочи у г. Сочи и ход осадков и температуры воздуха на м/с Сочи в 2003 г.

Река Мзымта вытекает из озера Верхний Кардывач на высоте 2240 м. Основными притоками являются Пслух, Лаура, Ачипсе, Чвежипсе и Кепш. Густота речной сети 1,04 км/км<sup>2</sup>. Длина бассейна 88,5 км, средняя ширина 10

км. Бассейн имеет асимметричную форму – его правобережная часть вдвое шире левобережной. Рельеф бассейна горный с высотами в верховьях до 2970 – 3257 м, сильно расчлененный. На северных склонах горы Агепста залегают снежники и ледники общей площадью 1,7 км<sup>2</sup>. Склоны покрыты густыми лесами и кустарниками, крутые, местами отвесные. В верховьях река протекает в узком ущелье, которое заканчивается водопадом Изумрудный. В 46 км от истока река входит в обширную котловину, где расположен п. Красная Поляна. Ниже река прорезает несколько хребтов и ближе к устью приобретает равнинный характер. Русло реки в верхнем течении прямое, ниже - умеренно извилистое и умеренно разветвленное. Ширина русла растет от верховьев к устью до 67 м. В межень глубины меняются от 0,2 – 0,6 м на перекатах до 1,5 – 2,0 м на плесах. Многолетняя амплитуда уровня воды составляет 162 см у п. Красная Поляна и 277 см у с. Казачий Брод. Минимальный расход воды в этих створах равен соответственно 4,81 м<sup>3</sup>/с и 5,48 м<sup>3</sup>/с, максимальный – 360 (520) м<sup>3</sup>/с и 730 м<sup>3</sup>/с.

На р. Мзымта половодье с преобладанием талого и тало-дождевого стока начинается в конце марта – начале апреля и длится до начала июля или августа. В самой верхней части водосбора половодье может продолжаться до октября. На спаде половодья начинается паводочный период с преобладанием дождевого стока, который длится по декабрь. Короткая зимняя межень длится с января по февраль. Среднемноголетний расход воды равен 33,8 м<sup>3</sup>/с. Представление о колебаниях водности реки и влиянии на него хода метеорологических элементов демонстрирует рисунок 1.6, на котором представлены графики колебаний ежедневных среднесуточных расходов воды, суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха в 1994 г.

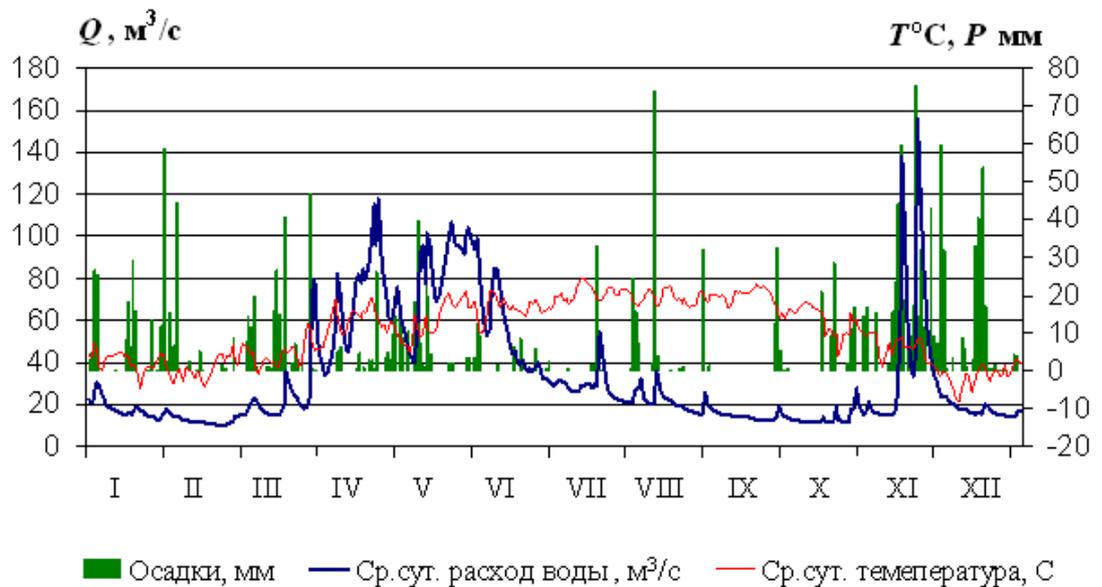


Рисунок 1.6. Гидрограф р. Мзымта – п. Красная Поляна, внутригодовой ход осадков и температуры воздуха на м/с Красная Поляна в 1994 г.

#### 1.6 Климатические изменения водного режима рек

С 70-х годов XX века отмечается рост глобальной температуры воздуха, в том числе на юге России проявляется устойчивое изменение климатических условий [81]. Температура воздуха повысилась на всех пунктах наблюдений на территории Черноморского побережья Кавказа. В целом за период 1971-2010 среднегодовая температура возросла на 1,24-1,44°C, наибольший рост отмечается для летних температур. В работе [103] отмечается наиболее теплый период с 1998 г., когда все среднегодовые температуры были выше нормы.

Количество атмосферных осадков с 1971 г. увеличилось на 32-164 мм. Однозначный рост осадков в течение последних 40 лет выявлен для холодного периода, а в тёплый период отмечаются разнонаправленные тенденции [81]. Наиболее заметное увеличение количества осадков фиксируется с середины 1980-х гг. [103]. Вместе с ростом температуры воздуха и атмосферных осадков сокращается продолжительность залегания снежного покрова (на 0,54 дн/год в районе п. Красная Поляна за период 1971-2010) [18, 30, 78].

Климатические изменения сопровождаются ростом количества случаев выпадения локальных, очень сильных дождей (100 мм и более за период менее

12 часов), приводящих к формированию высоких паводков с превышением опасных отметок на ряде рек. Авторы работы [103] отмечают, что последние 5 лет такие интенсивные осадки выпадают ежегодно, а в 2011-2013 гг. даже 2-4 раза в год, хотя ранее их частота составляла 1 раз в 3-5 лет.

В соответствии с результатами климатического моделирования ожидается, что интенсивная фронтальная зона (один из синоптических предикторов обильных осадков) на Черноморском побережье Кавказа будет возникать летом почти в 2 раза чаще по сравнению с периодом 1981–2000 гг., и в 3 раза – по сравнению с периодом 1961–1980 гг.. Для зимнего периода выявлена обратная закономерность [69].

Изменение климатических условий, обозначившееся с начала 70-х годов XX века, находит свое отражение в изменении характеристик речного стока во многих районах страны [35, 36, 114]. На Черноморском побережья также отмечается изменение величин годового, сезонного и месячного стока. Однако наиболее значимо и проблематично увеличение максимального паводкового стока, которое отмечается на всех реках Черноморского побережья Кавказа.

Наблюдаются разные тенденции в изменении годового стока рек после 1970 г.: на реках Вулан, Куапсе и Западный Дагомыс отмечается отрицательный тренд с коэффициентом  $-0,02 - -0,06 \text{ м}^3/\text{с}$  в год [81, 91]. Для стока р. Мзымта, наоборот, характерен устойчивый рост, который подтверждается статистическими критериями Питмена и Спирмена [90]. По сравнению с периодом 1947-1970 гг. за период 1971-2003 гг. годовой сток этой реки увеличился на 10%. На рис. 1.7 отчетливо виден положительный тренд многолетних колебаний годового стока, который хорошо согласуется с увеличением атмосферных осадков в бассейне р. Мзымта [81, 90].

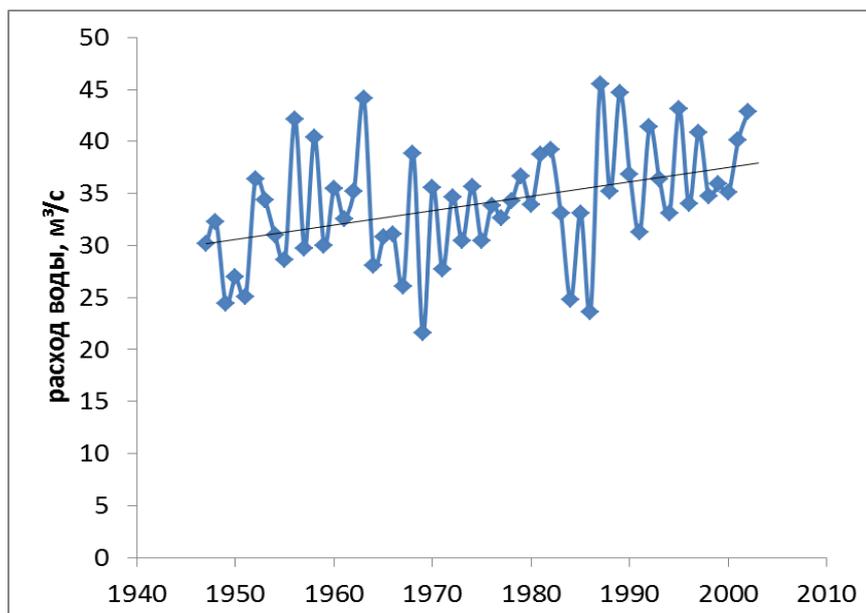


Рисунок 1.7. Многолетние колебания среднегодовых расходов воды р. Мзымты у п.Красная Поляна

В табл. 1.3 помещены оценки математического ожидания  $M_1$ ,  $M_2$  и среднего квадратического отклонения  $S_1$ ,  $S_2$  средних за год, за период половодья (IV – VIII) и за каждый месяц расходов воды в данном створе для обоих отрезков исходного ряда (1947–1970 и 1971–2003 гг.). Жирным шрифтом в таблице выделены статистически достоверно различающиеся оценки. Статистическая достоверность изменения математического ожидания расходов воды оценивалась с помощью критерия Стьюдента. Статистическая достоверность изменения среднеквадратического отклонения, то есть амплитуды многолетних колебаний каждого характерного расхода воды, оценивалась с помощью критерия Фишера [21, 55, 106]. Уровень значимости (риска) принимался равным 5% [90, 105].

Таблица 1.3 Результаты анализа статистической однородности рядов среднегодовых и среднемесячных расходов воды в створе р. Мзымта - п. Красная Поляна

Период	$M_1$	$M_2$	$S_1$	$S_2$
Год	<b>32,1</b>	<b>35,4</b>	5,68	5,18
Половодье IV-VIII	<b>50,9</b>	<b>55,1</b>	10,7	9,91
I	16,1	15,42	6,71	6,51
II	15,3	14,3	6,41	5,35
III	20,9	22,7	6,93	8,31
IV	<b>47,7</b>	<b>53,1</b>	11,6	15,1
V	76,2	78,6	17,2	14,8
VI	66,2	72,3	20,7	19,3
VII	40,9	45,2	12,6	13,5
VIII	23,6	26,2	6,94	7,31
IX	17,8	21,1	<b>4,93</b>	<b>7,66</b>
X	18,5	24,7	<b>7,66</b>	<b>13,9</b>
XI	21,5	29,0	12,8	11,7
XII	20,8	22,5	8,20	9,05

Для р. Мзымты рост стока воды, сопровождающийся нарушением статистической однородности рядов стока, отмечается почти во все месяцы, кроме января и февраля. В основе роста годового стока – увеличение объемов половодья, вызванное, видимо, повышением количества атмосферных осадков в холодный период. Также произошел заметный рост осеннего паводкового стока (сентябрь–ноябрь) и статистически значимо увеличилась его изменчивость от года к году (сентябрь, октябрь).

Аналогичная картина имеет место для годовых максимумов расхода воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна (рис. 1.8).

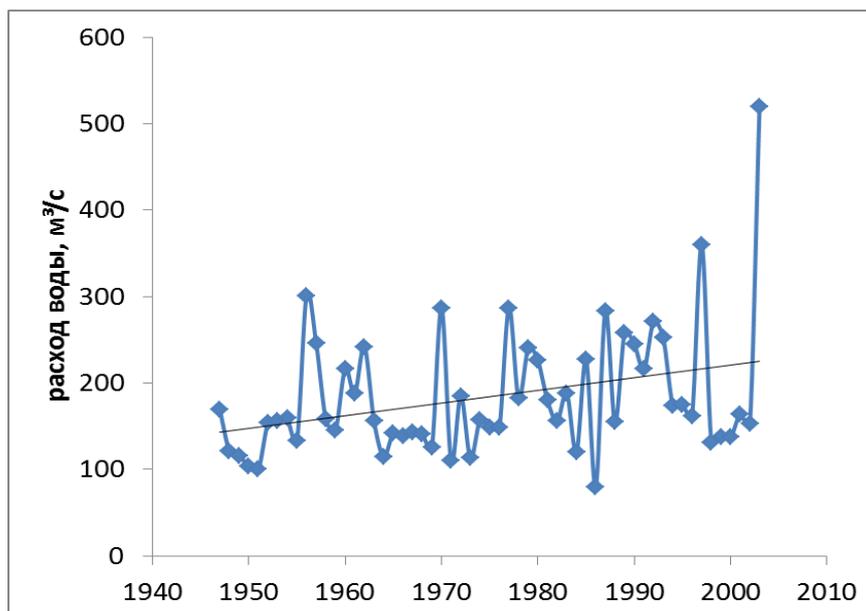


Рисунок 1.8. Многолетние колебания годовых максимумов расхода воды р. Мзымты у п.Красная Поляна

Результаты анализа статистической однородности многолетних колебаний годовых и месячных максимумов расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна приведены в табл. 1.4, в которой помещены оценки математического ожидания  $M_1$ ,  $M_2$  и среднего квадратического отклонения  $S_1$ ,  $S_2$  за периоды 1947-1970 гг. и 1971-2003 гг.

Таблица 1.4. Результаты анализа статистической однородности рядов годовых и месячных максимумов расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

Период	$M_1$	$M_2$	$S_1$	$S_2$
год	<b>162</b>	<b>195</b>	52,8	62,6
I	33,1	37,0	26,8	35,2
II	31,6	30,9	28,9	20,1
III	57,5	49,8	<b>50,7</b>	<b>21,3</b>
IV	94,7	116	34,6	45,0
V	123	133	28,2	37,6
VI	115	135	49,4	39,9
VII	91,8	91,5	35,5	34,2
VIII	68,0	84,7	44,4	61,6
IX	63,9	75,7	<b>25,4</b>	<b>49,0</b>
X	<b>57,9</b>	<b>107</b>	<b>39,3</b>	<b>91,1</b>
XI	63,0	91,2	44,1	65,0
XII	66,3	64,9	62,1	50,2

Статистическая достоверность нарушений однородности колебаний годовых и месячных максимумов расхода воды оценивалась с помощью критериев Стьюдента и Фишера с уровнем значимости 5%. Жирным шрифтом в таблице выделены статистически достоверно различающиеся оценки. Данные табл. 1.4 указывают на статистически достоверный рост годовых максимумов расхода воды. Максимальные месячные расходы воды в основном статистически неизменны по математическому ожиданию и дисперсии. Максимальные расходы марта отличаются уменьшением дисперсии. Для некоторых месяцев (июнь, октябрь) критерий Спирмена фиксирует положительный тренд максимальных расходов. В осенние месяцы (сентябрь–ноябрь) статистически достоверный рост дисперсии обусловлен за счет усиления паводковой активности и высоты паводков [90].

Для соседних рек также имеет место увеличение максимальных за год расходов воды (рис.1.9). Для рек Туапсе, Сочи и Мзымты отмечается нарушение однородности рядов максимального стока по дисперсии и математическому ожиданию.

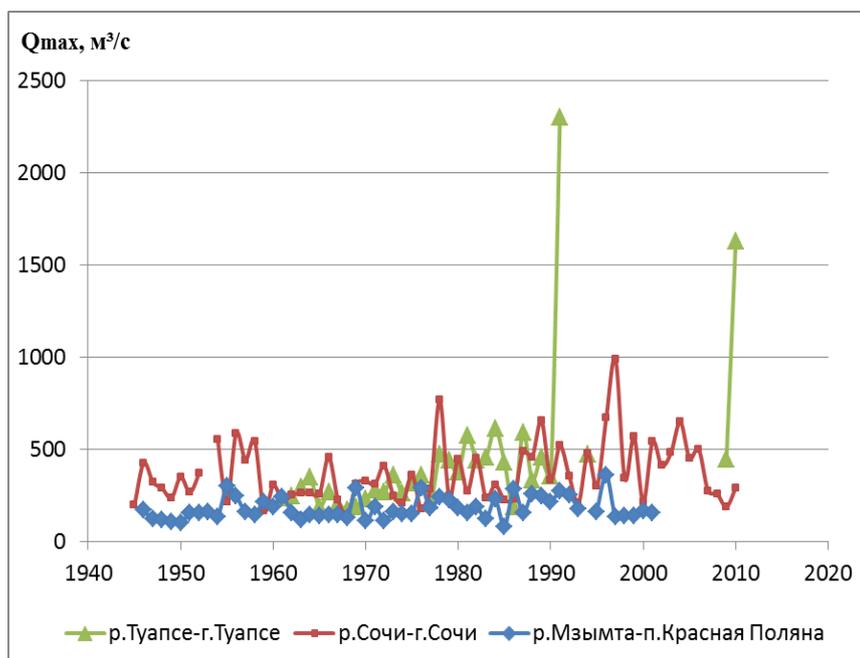


Рисунок 1.9. Многолетние колебания годовых максимумов расхода воды на реках Туапсе, Сочи и Мзымта

Как показывает рис. 1.9 за период наблюдений с 1927 г. наибольшие значения максимального стока были отмечены в 1980-2010 гг., когда они превысили предшествующие наибольшие значения в 1,5-4,5 раза. Так на реке Туапсе до 1991 г. максимальный расход воды из наблюдавшихся был равен 515 м<sup>3</sup>/с, а на 1.08.1991 он составил 2300 м<sup>3</sup>/с, т.е. превысил предыдущий в 4,5 раза. 22 августа 1997 г. наибольшие за весь период наблюдений расходы воды наблюдались одновременно в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс (511 м<sup>3</sup>/с), р. Сочи – с. Пластунка (719 м<sup>3</sup>/с), р. Сочи – г. Сочи (990 м<sup>3</sup>/с). На р. Мзымта в створе п. Красная Поляна за период наблюдений с 1947 г. наиболее высокие расходы отмечены 26 октября 1997 г. (360 м<sup>3</sup>/с) и 25 октября 2003 г. (510 м<sup>3</sup>/с). Полученные результаты подтверждают выводы других авторов об увеличении максимального стока и частоты опасных наводнений в исследуемом регионе в последние годы [4, 68, 81, 113]. Исследования авторов работы [69] показали возможный рост числа экстремально обильных осадков в связи с ожидаемым увеличением возникновения интенсивной фронтальной зоны над Черноморским побережьем Кавказа.

## ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА

### 2.1 Процессы формирования стока горных рек

Главными особенностями формирования речного стока горных рек является вертикальная зональность физико-географических условий на водосборе и пространственная неоднородность его рельефа и геологического строения [10, 27, 61].

Горный характер рельефа обуславливает особое развитие гидрометеорологических процессов на водосборах. Как и в других горных регионах, на Черноморском побережье Кавказа отмечается тенденция увеличения осадков с высотой местности вследствие поднятия воздушных масс, в процессе которого происходит достижение уровня конденсации. В зависимости от распределения температуры вдоль склонов и стратификации воздуха осадки выпадают в жидком, твердом или смешанном виде. Соответственно формирование талого, тало-дождевого и дождевого стока приурочено к разным высотным зонам, а соотношение этих видов стока зависит от сезона года, синоптической ситуации и высотного положения речного створа, к которому поступает сток. Высота местности – один из ключевых факторов (вместе с удаленностью от моря, экспозицией, наличием «дождевой тени»), который определяет величины водного баланса в пределах высотной зоны.

Распределение площадей по высотным зонам (табл. 2.1), рассчитанное по цифровой модели рельефа на основе спутниковой радарной интерферометрической съемки SRTM, демонстрирует степень дифференцированности гидрометеорологических процессов, протекающих на водосборе.

Таблица 2.1. Распределение площадей бассейнов по высотным зонам

Река – пост	0-500	500-1000	1000-1500	1500-2000	2000-2500	>2500	Средняя высота, м	Макс. высота, м
р. Вулан – с. Архипо - Осиповка	95%	5%	-	-	-	-	240	740
р. Туапсе – г. Туапсе	74,5%	25%	0,5%	-	-	-	335	995
р. Куапсе – с. Мамедова Щель	73%	27%	-	-	-	-	380	922
р. Зап. Дагомыс – п. Дагомыс	64,5%	35,5%	-	-	-	-	365	920
р. Сочи – с. Пластунка	21,5%	42,5%	28%	7,5%	0,5%	-	840	2250
р. Сочи – г. Сочи	35,5%	36%	22,5%	6,75%	0,25%	-	720	2250
р. Мзымта – п. Красная Поляна	0,5%	13,5%	23%	32%	24,5%	6,5%	1670	3257
р. Мзымта – п. Казачий Брод	10,5%	26%	23,5%	21,5%	15%	3,5%	1340	3257

На реках, у которых в общей площади водосбора отсутствуют или занимают незначительную долю высотные пояса с отметками более 1200 м, не формируется устойчивый снежный покров, отсутствует волна снегового половодья. Водный режим таких рек – паводочный, с паводками в любое время года. Из исследуемых рек волна половодья характерна для р. Сочи и для Мзымты. Постепенное включение высотных поясов в процесс снеготаяния приводит к затяжному характеру половодья в весенние месяцы на р.Сочи (март–май) и весенне-летние месяцы на р. Мзымте (март, апрель – июль, август).

Указанное изменение климатических характеристик с высотой вызывает необходимость деления горных рек на зональные и полизональные в зависимости от количества и доли высотных поясов, в пределах которых формируется сток реки [38, 56]. Так у р. Мзымты водосбор в значительной степени среднегорный и высокогорный, но по мере продвижения к побережью Черного моря ее сток накапливает свойства различных высотных поясов, в итоге водный режим Мзымты в низовьях не отражает условий формирования стока предгорий или высокогорий [51].

Исследованию и моделированию процессов формирования стока горных рек посвящено большое количество работ [17, 23, 24, 31, 100, 137]. Формированию стока рассматриваемых рек Черноморского побережья Кавказа посвящены работы [34, 63, 65, 81, 103, 112]. В настоящее время эти процессы достаточно хорошо изучены и описаны с помощью различных моделей, предназначенных, в том числе для использования в краткосрочных гидрологических прогнозах. Отдельные блоки моделей формирования речного стока содержат математическое описание следующих процессов:

- поступление дождевых или талых вод на поверхность водосбора;
- поверхностное задержание и испарение воды;
- промерзания и оттаивания почвы, впитывание воды в почву и отток влаги в нижележащие слои грунта;
- стекание воды по склонам;
- формирование и трансформация стока в речной сети [10].

Согласно генетической классификации склонового дождевого стока А.Н. Бефани в условиях горных водосборов формируются следующие виды стока:

- подвешенный поверхностный сток, возникающий при превышении интенсивности дождя над интенсивностью впитывания воды в почву;
- контактный (приповерхностный) сток, формирующийся в чехле рыхлых отложений по контакту с подстилающим относительным водоупором;
- подпертый поверхностный сток, образующийся после насыщения рыхлых отложений, лежащих на относительном водоупоре коренных пород [16, 63].

Для рек рассматриваемого региона большие уклоны местности снижают роль поверхностного задержания, а быстрое (несколько часов) формирование склонового стока снижает роль испарения даже в теплое время года. При сильных ливнях на покрытых луговой растительностью склонах быстро и практически без потерь формируется подвешенный поверхностный сток. На участках с толщами моренных отложений и на прилегающих к русловой сети участках формируется подповерхностный сток с меньшими скоростями.

Благодаря большим уклонам и мощным толщам легко проницаемых рыхлых отложений грунтовые воды достигают русловой сети и замыкающего створа достаточно быстро и в большом количестве [63, 112].

Ведущими метеорологическими факторами являются атмосферные осадки, запасы воды в снежном покрове и приземная температура воздуха. Эти факторы определяют не только текущие условия формирования речного стока в течение конкретного интервала времени, но и увлажненность водосбора в предшествующий этому интервалу период – подземные и русловые запасы воды, запасы воды в понижениях рельефа, запасы почвенной влаги и возможные потери стока на их восполнение.

Представление о процессе формирования дождевого стока дают результаты расчетов, выполненных по данным самописца уровней воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна и плювиографа на метеостанции п. Красная Поляна. Расчеты выполнены для наиболее высоких дождевых паводков за июль-октябрь 1992, 1994–1997 и 1999–2002 гг. Из анализа исключены паводки, накладывающиеся на половодье, в которых заметную роль могло играть снеговое питание, поскольку их рассмотрение потребовало бы оценки площади снежного покрова. В табл. 2.2 приведены следующие характеристики: дата начала паводка, расход воды к началу паводка, слой осадков, продолжительность осадков, их средняя и максимальная интенсивность, слой дождевого стока, индекс увлажнения водосбора, продолжительность подъема уровней и расходов воды и максимальный расход воды паводка. Индекс увлажнения водосбора к началу формирования паводка  $I_w$  рассчитывался в виде суммы  $\sum k_i P_i$  осадков за предшествующие паводку дни с коэффициентами, которые определялись в зависимости от среднесуточной температуры воздуха по таблицам, содержащимся в работах [17, 95].

Таблица 2.2. Характеристики дождевых паводков  
на р. Мзымта – п. Красная Поляна

Дата начала паводка	Нач. расход воды, м <sup>3</sup> /с	Слой осадков, мм	Прод-ть дождя, часы	Ср. интенс. дождя, мм/ч	Макс. интенс. дождя, мм/ч	Слой стока, мм	Индекс увл., мм	Время подъема, часы	Макс. расход воды, м <sup>3</sup> /с
02.07.92	85,9	81,9	32	2,6	14	19,7	107	3	118
02.10.92	19,9	58,2	37	1,5	3,8	20,2	38	30	85,4
12.10.92	30,0	97,1	32	4,3	7,9	48,0	62	35	269
23.10.92	23,4	67,8	31	2,1	7,6	40,8	98	25	219
25.10.92	69,5	66,1	26	2,5	8,4	20,0	127	25	120
27.10.92	72,5	43,1	23	1,8	5,8	19,4	180	25	103
19.07.94	27,9	32,6	11	2,7	7,3	9,5	14	12	88,9
10.08.94	20,6	74,6	5	10,0	57,9	5,0	23	19	53,1
05.08.95	41,2	60	5	8,6	24,3	4,1	25	5	86,0
12.08.95	34,7	39,3	14	2,5	9,25	7,6	44	7	82,8
23.08.95	19,3	24,2	9	2,4	8,2	4,4	32	5	44,3
02.10.95	22,2	173,4	87	2,0	7,1	80,4	38	18	179
19.10.96	19,9	37,2	6,5	5,3	11,9	4,3	22	7	56,8
29.09.96	20,4	89,9	22	3,9	14,5	29,9	63	15	146
03.10.96	34,0	19,6	5	3,9	5,9	6,6	94	5	57,1
04.10.96	34,7	20	2,5	5,0	15,1	9,2	111	7	63,9
22.10.96	22,0	99,9	46	2,1	10,6	33,6	57	20	99,3
26.10.96	54,5	37,9	17	1,5	4,7	21,0	108	18	74,1
29.07.97	35,8	54,8	5	9,1	28,7	5,9	26	4	134
02.08.97	37,9	9,8	4,5	1,6	6,5	1,9	45	5	62,1
09.08.97	37,9	25,1	5,5	4,2	9	4,8	50	5	81,6
10.08.97	34,8	35,7	5,2	6,0	17,8	10,9	55	8	86,5
12.08.97	55,4	26	4,4	4,3	14,8	9,1	63	4	110
13.08.97	70,7	23,6	14	1,5	4,2	19,9	69	7	149
01.08.97	31,0	38,5	21	1,4	11,6	5,3	24	2	52,8

## Продолжение таблицы 2.2

Дата начала паводка	Нач. расход воды, м <sup>3</sup> /с	Слой осадков, мм	Прод-ть дождя, часы	Ср. интенс. дождя, мм/ч	Макс. интенс. дождя, мм/ч	Слой стока, мм	Индекс увл., мм	Время подъема, часы	Макс. расход воды, м <sup>3</sup> /с
11.09.97	20,0	53,8	14	4,2	9,6	6,9	26	4	55,4
21.09.97	18,7	38,5	16	2,3	7,8	15,0	40	7,7	95,1
04.10.97	50,6	49,1	22	1,9	7,2	35,2	97	16	182
19.10.97	70,0	29,3	10	2,7	10	11,0	95	2	90,8
25.10.97	50,6	115,6	42	1,8	9,16	91,1	102	20	363
28.09.99	36,6	33,5	17	1,9	8,2	3,9	29	6	57,8
10.10.99	11,2	84,4	20	4,0	17,8	7,7	4	14	63,0
11.10.99	31,5	53,6	21	2,4	8,9	7,3	49	5	52,1
15.10.99	29,5	85,7	21	3,7	12,1	15,6	94	14	86,3
21.10.99	45,9	34,3	8,0	4,3	11,6	21,0	151	17	88,0
28.10.99	30,5	69,9	29	2,3	9,9	15,0	149	20	53,4
27.08.00	20,4	71,7	24	2,9	10,2	6,0	8	33	51,5
04.09.01	15,7	62,9	11	4,6	13,7	3,7	29	5	47,6
28.09.01	18,6	45,5	15	1,6	6,4	11,1	46	12	79,8
24.10.01	18,5	66,2	22	2,6	11,4	13,4	57	15	78,3
15.08.02	29,8	47,4	5,4	7,9	14,1	4,3	9	4	55,1
22.08.02	33,2	145,8	14	9,7	30,6	16,7	31	8	144
17.09.02	26,2	68,3	12	3,1	16,3	14,7	47	17	78,7
20.10.02	22,0	29,2	8,2	3,2	11,4	4,2	66	3	49,7
26.10.02	23,8	57,9	18,5	2,4	5,7	9,6	68	11	51,1
29.10.02	32,5	102,8	26,3	3,2	7,5	13,6	94	12	55,3

Приведенные данные показывают, что наибольший рост расходов воды может быть вызван либо летними ливнями, даже непродолжительными, но достаточно интенсивными (например, 29 июля 1997 г. слой осадков составил 54,8 мм за 5 часов и вызвал рост расходов почти на 100 м<sup>3</sup>/с; аналогично 22 августа 2002 г.), либо (что более характерно) длительными ливневыми

осадками со средней интенсивностью 2-4 мм/час (25 окт. 1997 г., 12 и 23 окт. 1992 г., 2 окт. 1995 г.) (рис. 2.1). При достаточно увлажненных почвах за счет большого количества осенних осадков и менее интенсивного испарения за счет сравнительно низких температур осенние паводки на Мзымте формируются наиболее высокими. Но с другой стороны, угрозу могут представлять высокие ливневые паводки, накладывающиеся на волну половодья (как например, 25-26 июня 1956 г.).

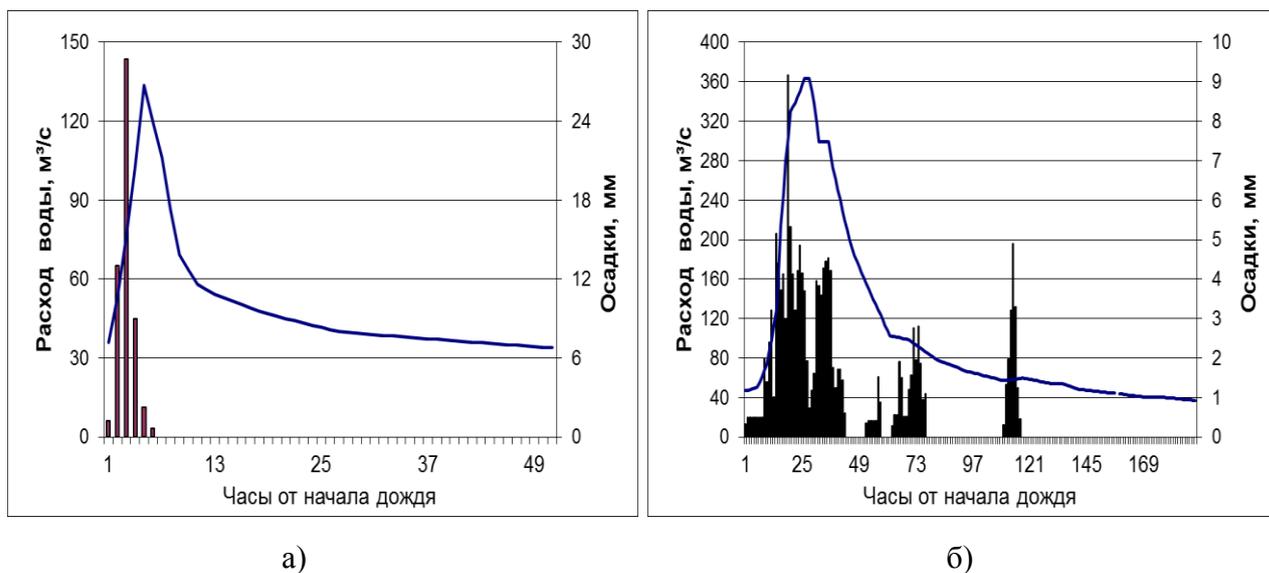


Рисунок 2.1. Совмещенные график хода расходов воды и осадков р. Мзымты – п. Красная Поляна 29 июля 1997 г. (а) и 25-27 окт.1997 г. (б)

Продолжительность подъема паводков меняется от 3 до 35 часов и определяется в первую очередь продолжительностью, ходом интенсивности дождя и увлажненностью бассейна, которая представлена в таблице через индекс увлажнения и начальный расход. В июле и августе продолжительность подъема уровня в высокие паводки составляет 3–8 часов. В сентябре-октябре более продолжительные и, как правило, менее интенсивные осадки приводят к более долгому подъему [81]. Коэффициент стока (отношение слоя дождевого стока к слою осадков при предположении, что слой осадков в Красной Поляне отражает средний слой осадков на водосборе) меняется от 0,11 при низких

одиноким паводкам и резко увеличивается до 0,4 - 0,8, когда водосбор хорошо увлажнен и паводок накладывается на спад предшествующего.

На других, более мелких реках Черноморского побережья Кавказа высокие паводки, приводящие к ущербу для населения, в большей степени вызваны летними ливнями [4, 54, 103] и для них характерно более быстрое формирование высоких паводков, вплоть до достижения опасных отметок. К сожалению, режимные наблюдения за уровнями и осадками пока не позволяют провести анализ паводочных ситуаций на других реках Черноморского побережья из-за низкого временного разрешения данных. Но известно, что при катастрофическом паводке на р. Туапсе в г. Туапсе 1 августа 1991 г. уровень воды поднялся на 7 м, а расход воды вырос от 0,82 до 2300 м<sup>3</sup>/с всего лишь за 5 часов [81]. Спад паводка продолжался 3 суток.

Величина паводка на реках зависит от охвата территории дождевыми осадками. Благодаря развитию сети автоматических уровнемеров [70] можно охарактеризовать наводнение 25 июня 2015 г., наблюдавшееся в районе Большого Сочи. Сильнейшие за историю наблюдений на метеостанции Сочи/Адлер ливневые осадки (до 175 мм в течение 12 часов) спровоцировали высокие паводки с превышением отметок категории опасных явлений на ряде небольших рек (с площадью водосборов менее 50 км<sup>2</sup>), впадающих в Черное море в 2 этапа. Сначала сформировался опасный паводок на рр. Херота, Кудепста, Хоста и на притоке Псоу, с 5 до 10 часов утра уровень достиг отметки неблагоприятного явления, а пик пришелся на 12-13 часов. Позднее сформировался паводок к северо-западу от Адлера с началом подъема уровней в 9 утра и с достижением опасных отметок на р. Западный Дагомыс в 15 часов. Поскольку максимум осадков выпал в приморской полосе, на более крупных реках (Мзымта, Сочи) с большой долей горной территории водосбора паводки были незначительные. В долине Мзымты дождь слоем 42-56 мм выпал на следующие сутки и не вызвал высокого паводка.

Таким образом, при оценке условий формирования речного стока на горных и предгорных водосборах желательно учитывать не только ход этих

метеорологических факторов во времени, но и их распределение по территории водосбора [6, 12, 46, 71, 95, 143]. Для рассматриваемых водосборов характерны значительные вертикальные градиенты приземной температуры воздуха, осадков и запасов воды в снежном покрове. Вертикальный градиент температуры может достигать  $-2^{\circ}\text{C}/100\text{ м}$ , а осадков  $150\text{ мм}/100\text{ м}$  [81]. Эти градиенты меняются в течение года, достигая максимума зимой и минимума летом [8, 12, 95].

Помимо быстро изменяющихся во времени и в пространстве метеорологических элементов подлежат учету пространственное распределение и сезонные изменения почвенного и растительного покрова, определяющие трансформацию талых и дождевых вод на водосборе, формирование потерь стока и соотношение между его поверхностной, внутрипочвенной и подземной составляющими. Достаточно подробные сведения о ландшафтных условиях формирования стока рассматриваемых рек содержатся в работах [65, 81, 99, 112].

## 2.2 Модели формирования стока горных рек

Под моделью понимается упрощенное описание объекта, которое служит средством для получения информации об объекте. Цель моделирования – воспроизводить и прогнозировать поведение сложного объекта с помощью более простой модели. Для описания процессов формирования стока на водосборе в основном пользуются математическими моделями (в отличие от физических или материальных моделей, как например, при лабораторных гидравлических исследованиях). Существует множество классификаций гидрологических моделей в зависимости от характера описания процессов формирования речного стока.

Физически обоснованные модели используют физические законы для количественного описания процессов формирования речного стока.

Наряду с физически обоснованными моделями, требующими большого объема информации о свойствах водосбора и использующими различные представления о процессах стокообразования, ведутся поиски эмпирических связей между стоком и факторами его формирования. Хотя высказывается мнение об их меньшей состоятельности [26, 33], это направление моделирования активно развивается и такие модели успешно применяются в прогностической практике [143]. Существует большой спектр эмпирических (data-based) моделей, основанных на различных способах обработки данных. Эти модели используют эмпирические связи между входной и выходной информацией (модели типа «чёрного ящика»), которые выявляются с помощью статистических методов или методов теории случайных процессов, с помощью искусственных нейронных сетей либо генетического программирования [145].

Технология построения и обучения искусственных нейронных сетей находит все большее применение для гидрологических задач, даже для описания системы отношений осадки - сток. Преимуществом нейронных сетей является способность отражать как линейные, так и нелинейные связи и выявлять эти связи непосредственно из моделируемых данных. На примере горной реки Киргизии были успешно апробированы нейросетевые технологии для прогноза с заблаговременностью 1-3 суток с использованием шестидневной истории осадков, максимальных и среднесуточных температур, среднесуточных и максимальных расходов и прогнозных значений осадков и температур воздуха [29]. Аналогичная работа была проведена для рек Адыгеи с суточным шагом моделирования [28].

Ряд моделей используют аппарат множественной линейной регрессии [42, 109] для ежесуточного расчета стока горных рек. Такие модели апробированы на водосборах горных рек Средней Азии со снегово-ледниковым питанием [20, 44]. Основным предиктором стока предполагается температура воздуха и его скользящее среднее за 3-5 суток для описания хода водоотдачи. К абсолютной величине стока авторы переходят с использованием фактического расхода воды на момент составления прогноза, который характеризует состояние водосбора и

накопленные снеготопы. Прогностические зависимости были получены отдельно для первой и второй половины половодья (май-июль и август-сентябрь).

При прогнозе дождевых паводков применяются физико-статистические методы, основанные на упрощенном уравнении водного баланса [74]. В оперативной практике Гидрометцентра России по физико-статистическим зависимостям паводочного стока от факторов формирования паводков выпускается прогноз стока для ряда низкогорных и равнинных рек в бассейне Кубани [24, 73, 89].

Процессы формирования стока могут быть описаны уравнениями в частных производных, системы которых образуют физико-математические модели формирования речного стока с распределенными параметрами [33, 39, 62]. Наиболее существенным признаком физико-математических моделей является схема поверхностного стекания, основанная на гипотезе сплошного слоя воды на склоне. Основными входными данными в таких моделях являются ряды величин атмосферных осадков, но могут использоваться данные о запасах воды в снежном покрове, температуре воздуха, солнечной радиации, испаряемости и информация о подстилающей поверхности.

Реализация моделей с распределенными параметрами требует большого количества исходных данных, которые не всегда есть в наличии. Для насыщения таких моделей необходимо использование данных оперативного дистанционного зондирования, которое пока не достаточно распространено, хотя все активнее применяются спутниковые данные о состоянии снежного покрова.

Пример разработки пространственной модели формирования тало-дождевого стока горной реки показан в работе [61]. На основе конечно-разностной схематизации водосбора (площадью 16900 км<sup>2</sup>) и речной сети была реализована и верифицирована модель стока за теплый период года и выполнен расчет катастрофического паводка июня 2002 г.

Модели с распределенными параметрами обеспечивают основу для полного использования разнообразной информации о физических процессах, происходящих на водосборе. Наиболее известным примером обоснованной модели с распределенными параметрами является Европейская гидрологическая система (SHE) [115]. Модель широко используется для гидрологических расчетов и предпринимаются попытки для ее внедрения в практику прогноза стока.

В настоящее время такие модели не могут быть использованы при разработке методики краткосрочного прогнозирования стока рассматриваемых горных рек в виду отсутствия необходимой информации о пространственном распределении факторов его формирования. Упрощение полных уравнений гидродинамики и термодинамики, а также частичное или полное осреднение характеристик условий формирования талого и дождевого стока по площади водосбора приводит к более простым и применимым в практике гидрологического прогнозирования концептуальным моделям с сосредоточенными или частично распределенными параметрами [26, 53, 61, 143, 145]. Общей чертой для моделей формирования стока горных рек с большой долей снегового питания является – деление водосбора на высотные зоны, температурный режим и условия протекания процессов снеготаяния внутри которых считаются однородными [142, 144, 147]. Для рек предгорий с паводочным режимом стока наличие блока описания снеготаяния не столь принципиально.

Для горных рек рассматриваемого региона вполне подходящей является модель формирования стока горных рек Гидрометцентра СССР, которая учитывает особенности горных водосборов с высотной поясностью и преобладанием внутриводосборного подпертого и подвешенного склонового стока и контактного стока с горных склонов в слое рыхлых отложений.

Разработка модели стока горных рек в Гидрометцентре велась параллельно с учеными Среднеазиатского научно-исследовательского гидрометеорологического института под руководством Ю.М. Денисова [22, 23,

40, 43, 110], где эта модель по-прежнему модифицируется и используется в оперативной практике [41]. Большой вклад в развитие представлений о гидрологии горных бассейнов дало детальное опытное изучение процессов снеготаяния и распределения стока в бассейне р. Варзоб [1, 31].

В концептуальной модели стока горных рек Гидрометцентра достаточно детально учитываются распределение метеорологических элементов по высоте водосбора и влияние высоты горных склонов на условия формирования и потерь талого и дождевого стока, процессы таяния и схода снега [2, 8, 52, 75, 87]. Для описания распределения температуры используется среднемесячные значения температурного градиента, а для распределения осадков применяются квадратичные зависимости. Снеготаяние описывается традиционным способом через коэффициент стаивания [47, 52, 59], параллельно оценивается испарение с каждой высотной зоны. Расчет притока к русловой сети осуществляется с предположением о двух регулирующих емкостях [75].

В качестве метеорологического входа в модели используются ежесуточные данные о жидких и твердых осадках, температуре и дефиците влажности воздуха, запасах воды в снежном покрове и распределении площади снежного покрова по высотным зонам на начало половодья [24, 41, 95]. Для некоторых водосборов северного склона Ферганской долины использовались данные спутникового зондирования для описания площадей и границ снежного покрова при моделировании стока этой моделью [71].

В настоящее время данная модель используется для прогноза стока с горной части бассейна Кубани с суточным шагом [24, 25].

В среднегорной и высокогорной зоне Северо-Западного Кавказа отмечается недостаток наблюдений за осадками [66, 111], поэтому для насыщения модели формирования стока привлекаются данные с соседних водосборов [24]. В условиях неоднородного рельефа и сложного режима увлажнения территории при недостатке данных наблюдений за осадками качество моделирования и прогноза стока горных рек заведомо снижается [24].

На водосборе Верхней Роны в швейцарских Альпах со схожими с водосбором Мзымты условиями формирования стока сток моделируется с помощью модели GSM-SOCONT [136, 138, 131]. Модель с полураспределенными параметрами, каждый частный водосбор делится на 2 части: ледниковую и неледниковую, каждая из которых разделена на высотные зоны, внутри которых ведутся расчеты снегонакопления, таяния и водоотдачи. Для каждой высотной зоны оцениваются часовые осадки и температуры воздуха. Моделью описывается инфильтрация и сток по русловой сети. Специальная схема трансформации стока учитывает расположение водохранилищ и работу гидротехнических сооружений.

GSM-SOCONT используется в рамках модели прогностической гидрологической модели MINERVE [128, 130], которая интегрирует данные ансамблевого метеорологического прогноза COSMO-LEPS [79] и, таким образом, решает проблему вероятностного гидрологического прогноза [132]. В работе [138] обсуждаются варианты улучшения прогноза стока альпийских рек на основе поиска наиболее подходящего метода интерполяции метеорологических данных наблюдений для более точного описания снеготаяния, а также усовершенствования технологии калибровки гидрологической модели на основе анализа погрешностей и неопределенностей с помощью методологии GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation). Основы этой методологии изложены в исследованиях [118, 125].

Следующие модели применяются и для равнинных, и для горных рек.

Модель HBV Шведского метеорологического и гидрологического института представляет собой концептуальную модель водосбора, которая преобразует осадки, температуру воздуха и потенциальное суммарное испарение либо в снеготаяние, либо в сток. Модель была неоднократно модифицирована, и ее различные версии существуют во многих странах [145]. Модель HBV можно рассматривать как модель с частично распределенными параметрами; водосбор разбивается на частные водосборы, также применяется метод высотного районирования. Эта модель включает в себя подпрограммы

для метеорологической интерполяции, расчета накопления снега и снеготаяния, суммарного испарения, влажности почвы, образования стока и, наконец, для расчета трансформации движения воды по руслам рек. Для горных водосборов есть возможность дополнительного деления на высотные зоны. Каждую высотную зону можно подразделить на подзоны по типу растительности, например лесные и не лесные территории.

Необходимой входной информацией для модели являются количество осадков (суточные суммы), температура воздуха (среднесуточные значения) и оценки возможного суммарного испарения. Стандартная модель действует на основе месячных данных об усредненной по большому промежутку времени суммарном испаряемости, рассчитанной на формуле Пенмана. Современные версии модели HBV могут работать с данными более высокого временного разрешения, т. е. ежечасными данными [123, 143]. Модель HBV используется для гидрологических прогнозов в рамках Европейской системы прогнозирования паводков EFFS [123].

Одной из наиболее распространенных прогностических моделей является Сакраменто. Она была разработана в Центре речных прогнозов Национальной службы погоды США в Сакраменто, штат Калифорния [121]. Эта модель включает сложный алгоритм расчета влажности почвы, предназначенный для получения значений объемов нескольких компонентов речного стока. В то же время для преобразований этих входных данных в гидрограф используется достаточно простой и почти полностью эмпирический подход. Почвенная толща разделена на две части — верхнюю зону и нижнюю зону, каждая из которых имеет емкости для капиллярной и свободной воды. Капиллярная вода тесно связана с почвенными частицами и извлекается из почвы только в процессе испарения. Гравитационная вода, согласно принятому условию, стекает в процессе дренирования вертикально вниз и в горизонтальном направлении. Размеры емкостей для капиллярной и гравитационной воды в каждой зоне рассматриваются в качестве модельных параметров. Вода, поступившая в зону, суммируется с запасом капиллярной влаги до тех пор,

пока не превысит капиллярную влагоемкость; излишек воды в этом случае идет на пополнение запаса свободной воды [143]. Рисунок 2.2 иллюстрирует основные блоки этой модели.

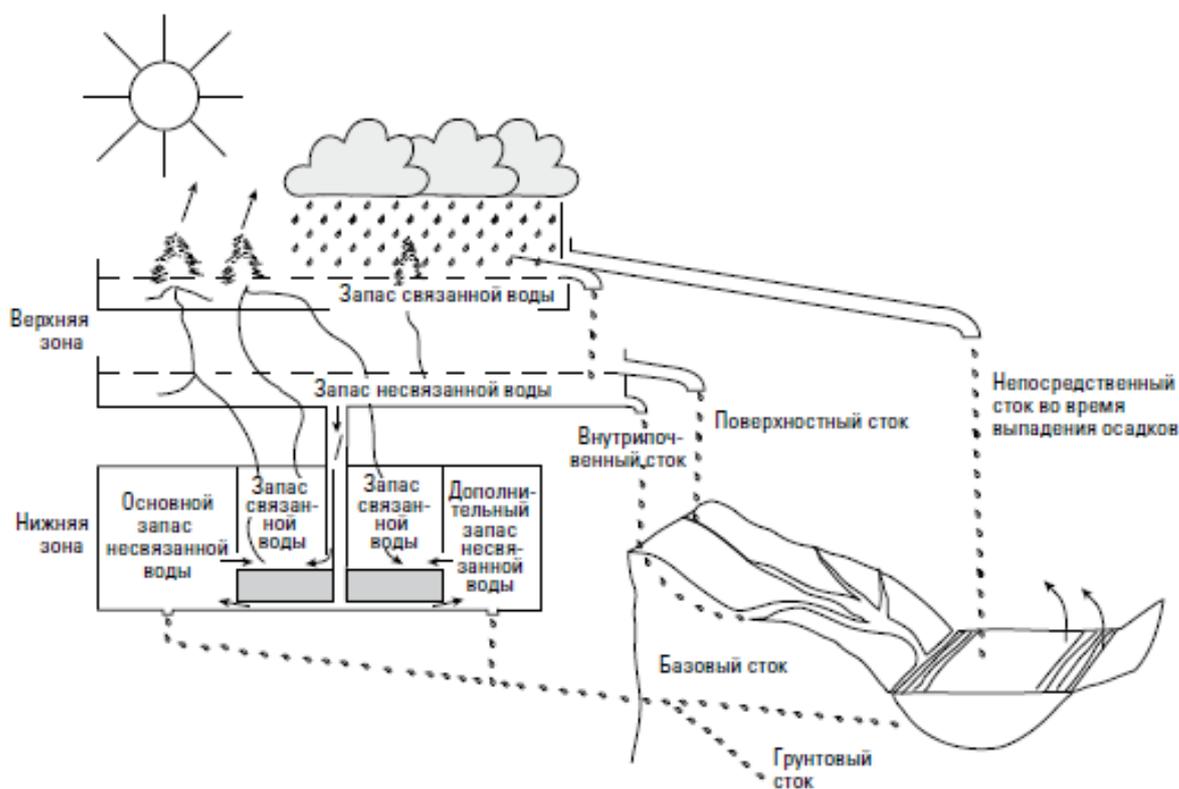


Рисунок 2.2. Структура модели Сакраменто [143]

Модель Сакраменто – одна из ключевых гидрологических моделей Национальной службы погоды (NWS) США и служит для анализа и прогноза паводков в режиме реального времени [145]. Шаг моделирования – от 1 часа. Одним из преимуществ модели для массового использования стал разработанный четкий алгоритм автоматической калибровки ее параметров с использованием мультимасштабных целевых функций группы MSOF [57].

Для описания дождевых паводков довольно часто используется резервуарная модель Национального исследовательского центра по предотвращению стихийных бедствий (Токио, Япония). Как следует из названия модели, почвенная толща представляется в виде системы резервуаров,

расположенных один над другим. Предполагается, что все дождевые осадки и талые воды поступают в самый верхний резервуар. Каждый резервуар имеет одно выпускное отверстие в дне и одно или два боковых отверстия, расположенных на некотором расстоянии от дна. Вода, вытекающая через донное отверстие любого из резервуаров, поступает в следующий нижележащий резервуар; исключение составляет самый нижний резервуар, т. к. поступившая в него вода является потерей для системы. Вода, вытекающая из любого резервуара через боковое отверстие (боковой сток), рассматривается как входной импульс по отношению к русловой системе. Количество и размер резервуаров, а также расположение выходных отверстий являются параметрами модели [53, 96, 143].

Описанная конфигурация резервуаров применяется для моделирования процесса «осадки–сток» во влажных районах. Для бассейнов, расположенных в аридных и полуаридных районах, требуется более сложное расположение резервуаров. Если для каких-либо водосборов характерны продолжительные засушливые периоды, то в модель включаются два или более параллельно расположенных рядов резервуаров. Сток из самого нижнего резервуара каждого ряда соответствует стоку из отдельного резервуара в простой резервуарной модели. Из каждого резервуара определенная доля воды поступает в виде бокового стока в соответствующий резервуар соседнего ряда, а из последнего ряда резервуаров боковой сток поступает непосредственно в русловую сеть. Из самых верхних резервуаров каждого ряда дополнительно предусмотрен боковой сток непосредственно в русловую сеть. Предполагается, что каждый ряд резервуаров представляет определенную зону водосбора, причем самый нижний соответствует зоне, ближайшей к русловой сети. По мере изменения гидрологических условий от влажных к засушливым в зависимости от сезона, зона, ближайшая к русловой сети, может оставаться относительно влажной, в то время как более удаленная зона становится достаточно сухой. Разработчики модели не считают, что представленное описание ёмкостных элементов модели является совершенно реалистичным,

скорее принятое расположение резервуаров является приближением к методу конечных разностей. Более того, математические выражения, описывающие движение воды через резервуары, имеют сходство с классическими концепциями гидрологии [143]. Резервуарная модель используется в прогнозах стока рек Китая и некоторых восточно-европейских стран [145].

Перечисленные выше гидрологические модели при наличии необходимой информации могут быть использованы для расчета стока горных рек. Для эффективного прогноза необходим блок автоматической корректировки смоделированных значений стока по наблюдаемым величинам [53, 129], а также желателен малый шаг моделирования (менее суток). Увеличение точности прогноза при уменьшенной заблаговременности может быть достигнуто за счет и расширения автоматической сети осадкомерных наблюдений и привлечения радарных данных об осадках [117]. Однако в условиях горного рельефа видимость радара резко снижается и поэтому в практике гидрологического моделирования их данные дают положительный эффект при получении полей осадков только в предгорьях [133]. Дополнительное повышение надежности гидрологического прогноза возможно при использовании нескольких моделей формирования стока [126].

В связи с малыми размерами водосборов и большими уклонами склонов скорости формирования паводков на реках Черноморского побережья очень велики. Это подтверждается анализом дождевых паводков р. Мзымты, приведенным в табл. 2.2 и обзором чрезвычайных паводочных ситуаций на других реках. Такие паводки можно отнести к категории внезапных, быстроразвивающихся паводков (flash flood), которые, по определению ВМО, имеют короткую продолжительность (несколько часов) и сравнительно высокий пиковый расход воды [143, 145] и, как правило, являются результатом выпадения интенсивных дождей. Прогноз таких явлений отличается от гидрологического прогноза для крупных рек тем, что важен сам прогноз события паводка, нежели всего гидрографа, и крайне ценна локальная гидрометеорологическая информация. Из-за исключительной важности

прогноза осадков прогноз быстроразвивающихся паводков становится комплексной гидрометеорологической задачей.

Во многих странах мира, где формируются быстроразвивающиеся паводки, разработаны специальные системы прогноза таких паводков для дальнейшего предупреждения и эвакуации жителей. Ниже приводятся их основные черты по материалам совместного доклада ВМО и Гидрологического исследовательского центра (HRC), Сан-Диего, США, по внедрению системы прогноза внезапных паводков [146].

Для прогноза необходима высокая частота поступления гидрометеорологических данных (с сети радаров, осадкомеров, гидропостов) и высокое временное разрешение гидрологической модели. Это принципиальный момент для развития прогнозирования чрезвычайных паводочных ситуаций в регионах, подобных Черноморскому побережью Кавказа. К примеру, в Центральной Америке система прогнозирования быстроразвивающихся «CAFFG» выпуск прогноза о возможности внезапных паводков производится с заблаговременностью 1–6 часов для водосборов площадью 100–300 км<sup>2</sup>. Для этого с помощью физически обоснованной модели оценивается влажность почвы водосбора и рассчитывается необходимое (критическое) количество осадков определенной продолжительности для формирования на водосборе быстроразвивающегося паводка. С использованием численного метеорологического прогноза и наукастинга (экстраполяции последних тенденций в колебаниях метеорологических элементов) оценивается угроза внезапного паводка как превышение количества прогнозируемых осадков той же продолжительности над величиной критических осадков для формирования внезапного паводка [146]. В основе прогноза могут лежать различные гидрологические модели формирования стока с различной схематизацией водосбора и методами учета трансформации волны паводка.

### 2.3 Используемая прогностическая модель формирования стока рассматриваемых рек

Предлагаемая методика краткосрочного прогнозирования стока рек Черноморского побережья Кавказа основана на модели его формирования, разработанной под руководством А.В. Христофорова в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России». В этой модели используется опыт построения некоторых блоков модели Гидрометцентра СССР и других, более современных моделей, в частности, модели Сакраменто. При этом имеется ряд отличий, обусловленных следующими обстоятельствами.

1. Для каждого водосбора могут использоваться только один гидрометрический пост и одна метеостанция. Данные регулярных снегомерных съемок отсутствуют. В результате возможно только достаточно приблизительное описание процессов формирования речного стока, а результатом моделирования может быть не сама методика прогноза, а физическое обоснование некоторых полуэмпирических зависимостей прогнозируемой величины от ее предикторов.

2. Осреднение по пространственному распределению переменных, входящих в физически обоснованные формулы, и по случайному распределению во времени не учитываемых факторов формирования речного стока приводит к значительной трансформации этих формул. Сохраняются только линейные относительно входящих в них переменных формулы. Все иные формулы могут преобразовываться различными способами в зависимости от используемых распределений вероятностей, которые не имеют достаточного теоретического обоснования и имеют лишь частичное статистическое подтверждение [91, 106, 118]. Следовательно, происходит достаточно произвольная аппроксимация физически обоснованных формул, описывающих процессы формирования речного стока.

3. Среди возможных аппроксимаций рядом преимуществ обладают формулы полиномиального вида. При полиномиальном виде зависимости

прогнозируемая величина выражается в виде линейной комбинации заранее заданных функций от используемых предикторов. Входящие в нее коэффициенты и свободный член являются параметрами формулы получения прогноза. Такой вид формулы получения прогноза существенно упрощает и делает более надежной статистическую оценку входящих в нее параметров, поиск оптимального ее варианта и определение погрешности прогноза.

4. Любая, в том числе полиномиальная аппроксимация прогностической зависимости приводит к систематическим ошибкам, которые будут возрастать по мере увеличения диапазона изменения входящих в нее переменных и характеристик неучтенных факторов формирования речного стока. Уменьшить этот диапазон и, следовательно, повысить точность прогноза можно путем разбиения всего года на несколько расчетных периодов и оценки параметров прогностической зависимости для них в отдельности. При разработке предлагаемой методики в качестве такого периода с относительно постоянными условиями формирования речного стока рассматривались интервалы от недели до квартала.

5. С учетом сроков метеорологических и гидрологических наблюдений процесс формирования речного стока может описываться для расчетного интервала времени продолжительностью 12 часов. Для исследуемых речных бассейнов время формирования стока сопоставимо с интервалами между сроками гидрологических и метеорологических наблюдений и заблаговременностью прогноза. Статистический анализ данных наблюдений для всех шести водосборов показал целесообразность использования в качестве расчетного интервал в одни сутки, что вполне соответствует использованию данных гидрологических ежегодников.

6. Использование для всех рассматриваемых речных створов формулы общего вида для получения прогноза расхода воды с заблаговременностью одни сутки существенно облегчает разработку и оперативное использование автоматизированной системы прогнозирования стока рек Черноморского побережья Кавказа. Специфика условий формирования стока и водного режима

каждой реки, а также конкретного расчетного периода года могут учитываться при использовании достаточно большого числа параметров, входящих в прогностическую зависимость.

Как и в большинстве других моделей формирования стока горных рек предполагается линейное уменьшение температуры воздуха и линейное или квадратичное увеличение осадков с высотой местности [8, 10, 22, 23]. Данное предположение означает, что благодаря малым размерам рассматриваемых водосборов для указанных метеорологических характеристик имеет место достаточно высокая корреляция между их колебаниями в разных точках водосбора. Это подтверждается тем, что для расположенных в бассейне р. Мзымта на разных высотах метеостанций Красная Поляна и Лаура коэффициент корреляции между среднесуточными температурами воздуха равен 0,99, а между значениями суточного слоя осадков 0,95. Для метеостанций Красная Поляна и Ачишхо аналогичные коэффициенты равны 0,92 и 0,86. Для расположенных в бассейне р. Туапсе метеостанций г. Туапсе и п. Горный аналогичные коэффициенты равны 0,98 и 0,77. На этом основании значения приземной температуры воздуха и количества атмосферных осадков на разных высотах описывались в виде линейной функции от значения той же метеорологической характеристики на метеостанции. Для расчетного периода времени предполагалось постоянство вертикальных градиентов для каждого метеорологического фактора.

#### Поступление дождевых вод на поверхность водосбора

Поступление дождевых вод на поверхность речного бассейна происходит ниже высоты изотермы 2°C [8, 22, 95]. С учетом линейного убывания температуры с высотой для метеостанции определялась минимальная температура  $T_{min,P}$ , при которой изотерма 2°C проходит через самую нижнюю точку водосбора и, следовательно, еще не происходит поступления дождевых вод на его поверхность. Высота изотермы 2°C является линейной функцией от температуры на метеостанции.

В прогнозах талого стока принято считать, что выпадающие на снег жидкие осадки приравниваются к поступлению воды непосредственно на поверхность бассейна за исключением той их части, которая может быть удержана снежным покровом [2, 8, 10]. Удержание воды в снеге отдельно учитывалось при расчете поступления талых вод. Средний слой поступления дождевых вод  $h_p(t+1)$  за ожидаемые сутки  $t+1$  определяется для всей площади водосбора ниже изотермы  $2^\circ\text{C}$  и является линейной функцией от суточного слоя осадков  $P(t+1)$  на метеостанции.

С ростом температуры изотерма  $2^\circ\text{C}$  поднимается, и увеличиваются площадь поступления дождевых вод. Одновременно увеличивается средняя высота части водосбора, на которой формируется дождевой сток и, как результат, растет среднее для этой части водосбора значение слоя осадков. Для описания этого двойного эффекта при аппроксимации зависимости слоя  $h_p(t+1)$  от приземной температуры воздуха  $T(t+1)$  используется квадратичная парабола.

С учетом данных обстоятельств, слой поступления дождевых вод  $h_p(t+1)$  за ожидаемые сутки  $t+1$  предлагается определять в зависимости от приземной температуры воздуха  $T(t+1)$  и слоя осадков  $P(t+1)$  за сутки  $t+1$  на метеостанции с помощью формулы:

$$h_p(t+1) = P(t+1)[T(t+1) - T_{\min,P}][a_p T(t+1) + b_p], \quad (2.1)$$

где  $a_p$  и  $b_p$  - постоянные для каждого расчетного периода параметры модели.

Если на метеостанции температура меньше некоторого значения  $T_{\min,P}$ , то на всем водосборе приземная температура ниже  $2^\circ\text{C}$  и, следовательно, поступление дождевых вод отсутствует. Следовательно, в формуле (2.1) значения  $T(t+1) < T_{\min,P}$  должны заменяться числом  $T_{\min,P}$ , при этом правая часть формулы (3.3) обращается в нуль. Влияние температуры  $T(t+1)$  на слой поступления дождевых вод происходит до достижения ею некоторого максимума  $T_{\max}$ , при котором практически на всей территории водосбора

снежный покров отсутствует и может формироваться дождевой сток. Следовательно, в формуле (3.3) более высокие значения  $T(t+1) > T_{max}$  должны заменяться числом  $T_{max}$ .

#### Поступление талых вод на поверхность водосбора

Таяние снежного покрова происходит на территории водосбора, покрытой снегом и расположенной ниже нулевой изотермы. Линейное убывание температуры с высотой для метеостанции позволяет определить минимальную температуру  $T_{min,S}$  на метеостанции, при которой изотерма  $0^{\circ}\text{C}$  проходит через самую нижнюю точку водосбора и, следовательно, еще не происходит поступления талых вод на его поверхность. Высота, ниже которой происходит стаявание всех запасов воды в снеге, также является линейной функцией от температуры воздуха на метеостанции.

При положительной температуре слой стаявшей воды пропорционален ее величине. Максимальный слой удерживаемой в снеге воды, пропорционален имеющемуся запасу воды в снежном покрове. Слой поступления талых вод на поверхность бассейна равен разности между слоями стаявшей и удерживаемой в снеге воды, если эта разность положительна. В противном случае он равен нулю [10, 59, 95].

В виду отсутствия данных снегомерных съемок учитывалась только зависимость слоя поступления талых вод на поверхность водосбора от температуры воздуха на опорной метеостанции. С ростом температуры изотерма  $0^{\circ}\text{C}$  поднимается, и увеличивается площадь таяния снежного покрова. Одновременно увеличивается средняя высота части водосбора, на которой формируется талый сток и, как результат, растет среднее для этой части водосбора значение запаса воды в снеге. Таким образом, снова имеет место двойной эффект влияния температуры на слой талого стока.

Средний слой поступления талых вод на поверхность бассейна увеличивается с ростом температуры воздуха на метеостанции до ее определенного предела. Дальнейший рост температуры воздуха приводит к снижению площади части водосбора, на которой происходит таяние снежного

покрова. По мере ее приближения к температуре  $T_{max}$ , при которой снежный покров на водосборе практически отсутствует, слой талого стока уменьшается до нуля.

Простейшим вариантом аппроксимации описанного характера зависимости среднего для всего водосбора слоя поступления талых вод  $h_s(t+1)$  от приземной температуры воздуха  $T(t+1)$  на метеостанции также является формула параболического вида:

$$h_s(t+1) = [T(t+1) - T_{min,S}] [a_s T(t+1) + b_s], \quad (2.2)$$

где  $a_s$  и  $b_s$  - постоянные для каждого расчетного периода параметры модели.

Если на метеостанции температура меньше  $T_{min,S}$ , то на всем водосборе приземная температура ниже  $0^\circ\text{C}$  и поступление талых вод отсутствует. Следовательно, значения  $T(t+1) < T_{min,S}$  должны заменяться числом  $T_{min,S}$ , при этом правая часть формулы (2.2) обращается в нуль. Если температура на метеостанции  $T(t+1)$  превышает  $T_{max}$ , то в формуле (2.2) ее следует заменять числом  $T_{max}$ .

Для ожидаемых суток  $t+1$  средний для всего водосбора суммарный слой поступления воды на его поверхность  $h(t+1)$  определяется формулой:

$$h(t+1) = b_0 + b_1 [T(t+1) - T_{min,S}]^2 + b_2 [T(t+1) - T_{min,S}] + b_3 P(t+1) [T(t+1) - T_{min,P}]^2 + b_4 P(t+1) [T(t+1) - T_{min,P}] + b_5 P(t+1). \quad (2.3)$$

При условии  $T(t+1) < T_{min,P}$  слой осадков  $P(t+1)$  должен заменяться нулем. При условии  $T(t+1) < T_{min,S}$  температура  $T(t+1)$  должна заменяться числом  $T_{min,S}$ . При условии  $T(t+1) > T_{max}$  температура  $T(t+1)$  должна заменяться числом  $T_{max}$ . Параметры формулы (2.3) легко выражаются, через параметры предыдущих формул и критические значения температуры  $T_{min,S}$ ,  $T_{min,P}$  и  $T_{max}$ .

### Формирование потерь склонового стока

Потери склонового стока складываются из потерь на поверхностное задержание, испарение и впитывание воды в почву. Последнее расходуется на восполнение запасов воды в почве, инфильтрацию воды в нижележащие слои

грунта и аккумуляцию воды в прирусловой делювиальной осыпи [16, 17, 23, 32]. Эти потери косвенно учитываются ходом осадков и температуры воздуха. Изменение свойств почвенного, растительного и снежного покрова, процессы замерзания и оттаивания почвы учитываются путем оценки параметров модели для каждого расчетного периода времени. В виду отсутствия данных наблюдений, которые могли бы характеризовать пространственную изменчивость потерь склонового стока, использовались средние для всего водосбора характеристики, приближенно определяемые данными метеостанции и замыкающего створа.

В течение ожидаемых суток  $t+1$  средний расход воды склонового стока  $q(t+1)$  складывается из расхода  $q_{nos}(t+1)$  поверхностного стока, расхода  $q_{noch}(t+1)$  внутрипочвенного стока и расхода  $q_{gp}(t+1)$  грунтового стока. Последний не играет заметной роли в формировании максимального стока и косвенно учитывается предшествующей водностью реки [74]. Все расчеты ведутся для конкретных суток расчетного периода, поэтому последующие водобалансовые уравнения необходимо относить не к среднесуточному расходу склонового стока и его составляющим, а к суточному слою соответствующего вида стока в конкретной точке водосбора. Это достигается умножением расхода  $q(t+1)$  на переходный коэффициент  $k$ , то есть  $kq(t+1)$  - слой склонового стока за сутки  $t$ .

Поверхностный склоновый сток формируется, если слой поступления воды на поверхность водосбора  $h(t+1)$  превышает слой воды  $i(t+1)$ , просочившейся в почву за сутки  $t$ . В этом случае слой поверхностного стока  $kq_{nos}(t+1)$  равен разности  $h(t+1) - i(t+1)$ .

Если обозначить через  $W(t+1)$  запас почвенной влаги к концу суток  $t+1$ , то уравнение водного баланса почвенного слоя приобретает вид:

$$W(t+1) = W(t) + i(t+1) - kq_{nos}(t+1) - kq_{gp}(t+1). \quad (2.4)$$

Последовательно повторяя эту процедуру для суток  $t, \dots, t-m+1$ , получаем выражение для запаса почвенной влаги  $W(t)$  к началу суток  $t+1$ :

$$W(t) = W_0 + I_w(t+1), \quad (2.5)$$

где  $W_0$  - запас почвенной влаги к началу первых учитываемых суток  $t-m$ . Величина  $I_w(t+1)$  определяет средний индекс увлажнения водосбора к началу суток  $t+1$  и является важнейшей характеристикой потерь склонового стока:

$$I_w(t+1) = \sum_{j=1}^m [h(t-j+1) - kq(t-j+1)]. \quad (2.6)$$

Смысл предлагаемого индекса увлажнения вполне очевиден - он определяется разностью между поступлением воды на поверхность водосбора и суммарным склоновым стоком за предыдущие сутки, число  $m$  которых зависит от скорости процессов формирования стока.

Суммарный слой внутрипочвенного и грунтового склонового стока предлагается выражать через средний запас почвенной влаги в течение суток  $t$  в виде:

$$kq_{ноч}(t) + kq_{зп}(t) = \beta \left[ \frac{W(t-1) + W(t)}{2} \right], \quad (2.7)$$

где коэффициент  $\beta$  принимается постоянным для расчетного периода времени.

С учетом формулы (2.4) запас почвенной влаги  $W(t+1)$  к концу суток  $t+1$  может быть выражен в виде:

$$W(t+1) = \left( \frac{2-\beta}{2+\beta} \right) W(t) + \left( \frac{2}{2+\beta} \right) i(t+1). \quad (2.8)$$

Своего максимального значения  $i_{max}(t+1)$  слой поступления влаги в почву достигает в случае, когда к концу суток  $t$  запас почвенной влаги  $W(t)$  достигает максимальной влагоемкости почвы  $W_{max}$ . Из уравнений (2.4), (2.5) и (2.8) следует формула:

$$i_{max}(t+1) = \left( 1 + \frac{\beta}{2} \right) W_{max} - \left( 1 - \frac{\beta}{2} \right) [W_0 + I_w(t+1)]. \quad (2.9)$$

При моделировании склонового стока необходимо выделить несколько вариантов его формирования.

На покрытых луговой растительностью склонах быстро и практически без потерь формируется подвешенный поверхностный сток. На участках с

толщами моренных отложений и на прилегающих к русловой сети участках также быстро и практически без потерь формируется подповерхностный сток [17, 33]. Исходя из этого, выделяется часть бассейна с относительной площадью  $\lambda$ , на которой быстро и практически без потерь формируется приток в русловую сеть со средним для всего водосбора расходом воды  $ch(t+1)$ .

На оставшейся части водосбора с относительной площадью  $1-\lambda$  происходят потери на пополнение запасов почвенной влаги, и формируется склоновый сток со средним для всего водосбора расходом воды  $\tilde{q}(t+1)$ .

При недостаточном слое поступления воды, когда выполняется условие  $h(t+1) < i_{max}(t+1)$ , вся она расходуется на увеличение запаса почвенной влаги. В этом случае поверхностный склоновый сток отсутствует и склоновый сток равен сумме почвенного и грунтового стока, а слой просочившейся в почву влаги  $i(t+1)$  равен слою поступления воды  $h(t+1)$ . В этом случае выражение для  $\tilde{q}(t+1)$  можно получить, приравняв формулы (2.4) и (2.8) и заменив  $i(t+1)$  на  $h(t+1)$ :

$$\tilde{q}(t+1) = \frac{2\gamma}{k} [W_0 + I_w(t+1)] + \frac{\gamma}{k} h(t+1), \quad (2.10)$$

где  $\gamma = \frac{\beta}{2+\beta}$ .

При избыточном слое поступления воды, когда выполняется условие  $h(t+1) \geq i_{max}(t+1)$  слой поступления влаги в почву достигает своего максимального значения  $i_{max}(t+1)$ . Средний расход поверхностного склонового стока равен  $h(t+1) - i_{max}(t+1)$ , а суммарный расход внутрипочвенного и грунтового стока определяется уравнением (2.7). Принимая во внимание формулу (2.8), получаем выражение для суммарного среднесуточного расхода воды склонового стока:

$$\tilde{q}(t+1) = \frac{1}{k} [h(t+1) + W_0 + I_w(t+1) - W_{max}]. \quad (2.11)$$

С учетом рассмотренных ситуаций средний расход склонового стока  $\tilde{q}(t+1)$  для рассматриваемой части бассейна с потерями воды на впитывание предлагается определять с помощью формулы:

$$\tilde{q}(t+1) = \begin{cases} \frac{2\gamma}{k} [W_0 + I_{\text{вк}}(t+1)] + \frac{\gamma}{k} h(t+1), & \text{если } h(t+1) < i_{\text{max}}(t+1); \\ \frac{1}{k} [h(t+1) + W_0 + I_{\text{вк}}(t+1) - W_{\text{max}}], & \text{если } h(t+1) \geq i_{\text{max}}(t+1). \end{cases} \quad (2.12)$$

Учитывая, что расход  $\tilde{q}(t+1)$  соответствует части водосбора с относительной площадью  $1 - \lambda$ , а расход  $ch(t+1)$  соответствует части водосбора с относительной площадью  $\lambda$ , получаем формулу для определения среднего для всего бассейна расхода воды склонового стока:

$$q(t+1) = (1 - \lambda)\tilde{q}(t+1) + \lambda ch(t+1). \quad (2.13)$$

#### Трансформация склонового и руслового стока

Для перехода от расходов склонового стока к расходу воды  $Q(t+1)$  в замыкающем створе использован интеграл Дюамеля. При переходе к средним за сутки значениям он трансформируется в выражение:

$$Q(t+1) = c_0 q(t+1) + c_1 q(t) + \dots + c_n q(t-n+1) + Q_{\text{сп}}(t+1), \quad (2.14)$$

где  $Q_{\text{сп}}(t+1)$  - близкий к константе расход грунтового стока,  $n$  - число учитываемых предыдущих суток [75, 95]. Благодаря малым размерам рассматриваемых водосборов и большим уклонам их поверхности время формирования расходов воды в замыкающих створах происходит достаточно быстро, поэтому число  $n$  не велико, а последовательность коэффициентов в формуле (2.14) - убывающая.

Во избежание неоправданного усложнения модели, значения расходов склонового стока  $q(t), \dots, q(t-n+1)$  в формуле (2.14) целесообразно выразить через наблюдавшиеся расходы воды в замыкающем створе  $Q(t), Q(t-1), \dots$ . Для этого необходимо составить систему уравнений, каждое из которых может быть получено путем замены  $t+1$  в формуле (2.14) на  $t, t-1$  и так далее. Решение такой линейной системы приводит к необходимости учета расходов воды в замыкающем створе за все предшествующие сутки. Однако, благодаря

быстрому снижению роли этих расходов воды по мере удаления от даты  $t$  сроков их прохождения, достаточную точность модели может обеспечить приближенное решение, в котором учитываются только расходы воды за  $l$  предшествующих суток. В результате формула (2.14) трансформируется в выражение:

$$Q(t+1) = c_0 q(t+1) + C_1 Q(t) + \dots + C_l Q(t-l+1) + d. \quad (2.15)$$

Расход грунтового стока не играет заметной роли в формировании максимального стока и косвенно учитывается свободным членом  $d$  и расходами воды за предшествующие дате  $t$  сутки.

При определении входящего в формулу (2.15) среднего расхода склонового стока  $q(t+1)$  необходим индекс увлажнения водосбора  $I_w(t+1)$  к началу суток  $t+1$ . Используемая для этого формула (2.6) содержит сумму расходов склонового стока за  $m$  предшествующих суток. Как и в предыдущем случае, достаточную точность модели может обеспечить приближенное решение, в котором эти расходы склонового стока выражаются через наблюдавшиеся расходы воды в замыкающем створе за  $M$  предшествующих суток. В этом случае индекс увлажнения  $I_w(t+1)$  определяется формулой:

$$I_w(t+1) = \sum_{j=1}^m h(t-j+1) - \sum_{j=1}^M b_j Q(t-j+1). \quad (2.16)$$

Подстановка этого выражения в формулу (2.9) определяет максимальный слой поступления влаги в почву  $i_{max}(t+1)$ . Полученные таким образом значения  $I_w(t+1)$  и  $i_{max}(t+1)$  должны быть подставлены в формулу (2.12). В сочетании с формулой (2.13) она определяет средний расход воды склонового стока  $q(t+1)$ , необходимый для определения расхода воды в замыкающем створе  $Q(t+1)$  по формуле (2.15).

Целесообразно рассмотреть использование предлагаемой модели в ситуации, отвечающей особенностям рассматриваемых водосборов и специфике задачи прогнозирования опасных паводков. Предположим, что благодаря малым размерам и большим уклонам поверхности водосбора,

процессы формирования склонового стока и его трансформации в расход воды в замыкающем створе протекают достаточно быстро.

Для дальнейшего изложения важно отдельно рассмотреть ситуацию формирования паводка на небольшой горной реке. Благодаря малым размерам и большим уклонам поверхности водосбора, параметры модели  $m$  и  $l$  могут достигать своего минимального значения:  $m = l = 1$ . В этом случае формулы (2.6) и (2.15) приобретают линейный вид с постоянными коэффициентами:

$$I_w(t+1) = h(t) - u_1 Q(t) - u_2 Q(t-1), \quad (2.17)$$

$$Q(t+1) = c_0 q(t+1) + C_1 Q(t) + d. \quad (2.18)$$

При характерном для формирования паводков избыточном слое поступления воды на поверхность водосбора средний расход воды склонового стока  $q(t+1)$  выражается формулами (2.12) и (2.13) и равен:

$$q(t+1) = \frac{(1-\lambda)}{k} [h(t+1) + W_0 + I_w(t+1) - W_{max}] + \lambda ch(t+1). \quad (2.19)$$

Учитывая последние три формулы и группируя коэффициенты при одинаковых предикторах, получаем выражение для ожидаемого среднесуточного расхода воды в замыкающем створе:

$$Q(t+1) = d + d_1 Q(t) + d_2 Q(t-1) + d_3 h(t+1) + d_4 h(t), \quad (2.20)$$

где  $h(t+1)$  и  $h(t)$  определяются формулой (2.3) в зависимости от известных на дату составления прогноза  $t$  и ожидаемых прогнозируемых на сутки  $t+1$  значений суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха. Параметры данной формулы выражаются через параметры модели формирования стока и также принимаются постоянными в течение расчетного периода времени. Ожидаемые значения суточных максимумов расхода воды в замыкающем створе можно получать, опираясь на отмеченную в предыдущем разделе достаточно тесную корреляцию между максимальными и среднесуточными расходами воды.

## ГЛАВА 3. ПРОГНОЗ СТОКА РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА

### 3.1 Исходная гидрометеорологическая информация

Для всех рассматриваемых речных створов Черноморского побережья Кавказа использовались данные гидрометрических наблюдений на соответствующих постах за период по 2011 г. Год начала наблюдений варьирует от 1928 г. для р. Сочи – с. Пластунка до 1968 г. для р. Мзымта – п. Казачий Брод. В гидрометрических наблюдениях имелись пропуски, поэтому число лет наблюдений колеблется от 35 до 80. Для обоих створов на р. Мзымта имелись данные самописцев уровня воды с 1992 г. по 2002 г. (с пропусками).

С целью определения возможной заблаговременности прогноза анализировалось время прохождения суточных максимумов уровней и расходов воды, определенное по данным самописца уровней воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна за 8 лет. Отдельно рассматривался период с апреля по август с преобладанием талого и тало-дождевого стока (половодье) и остальная часть года с преобладанием дождевых паводков. Для обоих периодов распределение частот прохождения максимумов в различные часы показано на рис. 3.1.

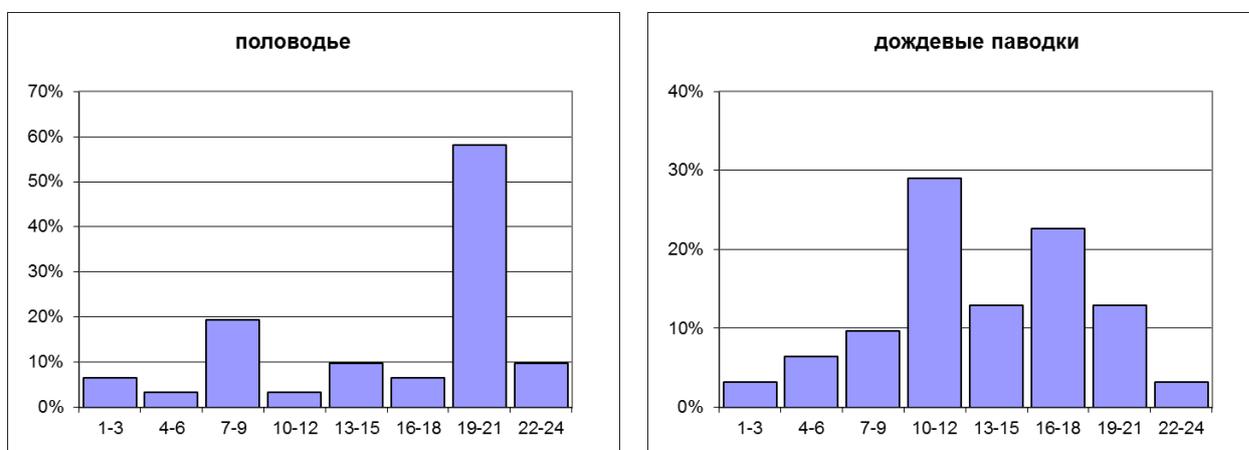


Рисунок 3.1. Время прохождения суточных максимальных расходов воды  
р. Мзымты – п. Красная Поляна

В период половодья прохождение пиков тало-дождевых паводков наиболее вероятно в вечерние часы с 19:00 до 21:00. Это связано с задержкой талого стока по сравнению с суточным ходом температуры воздуха. Формирование пиков дождевых паводков зависит исключительно от характера выпадения атмосферных осадков. В большинстве случаев максимальные уровни и расходы воды дождевых паводков наблюдаются с 10:00 до 21:00. Таким образом, при выпуске прогноза максимальных расходов и уровней воды в 19<sup>00</sup> предыдущих суток по местному времени, его заблаговременность, то есть срок до прохождения этих максимумов в течение следующих суток, может варьировать от 14 до 26 часов [90].

Для каждого из восьми водосборов использовались данные одной метеостанции и только для р. Куапсе – п. Мамедова Щель использовались данные двух метеостанций в городах Туапсе и Сочи. Этот водосбор расположен практически посередине между указанными городами, поэтому при интерполяции суточного слоя осадков и среднесуточной приземной температуры воздуха в качестве оптимального варианта оказалось использование средних арифметических соответствующих значений по обеим метеостанциям. Для р. Вулан использовалась метеостанция в п. Джубга, расположенная на соседнем водосборе. Для обоих створов на р. Сочи использовалась метеостанция в г. Сочи. Эта же станция использовалась для расположенной рядом р. Западный Дагомыс. В бассейне р. Туапсе имеются две метеостанции: Туапсе и Горный. Для бассейна р. Мзымта были проанализированы данные с 2 метеостанций: п. Красная Поляна и кордон Лаура. Для обеих пар относящихся к одному водосбору метеостанций имеет место очень высокая корреляция между данными наблюдений: 0,98 – 0,99 для среднесуточной приземной температуры воздуха и 0,87 - 0,95 для суточного слоя осадков. Данное обстоятельство позволило ограничиться только одной метеостанцией для каждой из этих двух рек. Таким образом, использовались данные по четырем метеостанциям за период с 1984 по 2011 гг. Эти данные включали ежедневные наблюдения за приземной температурой воздуха  $T$  и

слоем атмосферных осадков  $P$  в  $6^{00}$  и в  $18^{00}$  по местному времени. Продолжительность базового периода, то есть число лет  $n$  синхронных гидрологических и метеорологических наблюдений, использованных при получении методики прогноза, варьирует от 8 до 20.

Прогноз ожидаемых значений осадков и температуры воздуха осуществляется с использованием различных метеорологических моделей. В настоящий момент гидрологические модели ФГБУ «Гидрометцентр России», работающие в оперативном режиме, усваивают метеорологический прогноз четырех метеорологических моделей: UKMO (Великобритания); NCEP (США); «РЕГИОН» (Россия) и COSMO-RU07 (Россия). Характеристики этих моделей приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Характеристики метеорологических прогностических моделей

Название	Центр реализации счета модели	Срок выпуска прогноза (СГВ)	Заблаговременность прогноза, часы
РЕГИОН	Гидрометцентр	00, 12	48
UKMO	United Kingdom Meteorological Office	00, 12	120
NCEP	National Center for Environmental Prediction	00, 06, 12, 18	240
COSMO	Гидрометцентр	00, 06, 12, 18	72

Согласно плану оперативных испытаний в Гидрометцентре России с мая 2010 по март 2011 г. были проведены испытания прогнозов приземной температуры воздуха и осадков в пределах ЕТР, получаемых с помощью эксплуатируемой в ФГБУ «Гидрометцентр России» мезомасштабной модели атмосферы COSMO-RU07 с горизонтальным расширением 7 км и заблаговременностью прогнозов до 78 ч [45]. Методика проведения испытаний предусматривала оценку успешности прогнозов по данным сети метеорологических станций ЕТР, а также сравнение с прогнозами ряда отечественных и зарубежных моделей различного масштаба: в частности, глобальными моделями NCEP (США) и UKMO (Великобритания) и

региональной отечественной моделью «РЕГИОН» с шагом сетки 50 км [72]. Сравнительная оценка успешности прогнозов осадков и температуры воздуха по отечественным и зарубежным моделям показала следующее: из четырех рассматриваемых моделей наименьшие абсолютные ошибки прогнозов приземной температуры воздуха оказались по мезомасштабной модели COSMO-RU07; наиболее успешными оказались прогнозы осадков по моделям COSMO-RU07 и NCEP [94].

Использование метеорологического прогноза обеспечивает, с одной стороны, принципиальную возможность прогноза паводков при большой заблаговременности прогноза [58, 127, 135, 145]. С другой стороны, необходимо учитывать высокую степень неопределенности прогноза сильных осадков в горах из-за развития локальных процессов в речных долинах [64, 103]. Также существует проблема интерполяции прогностических полей, поскольку предлагаемая гидрологическая модель использует точечные, а не площадные входные данные. В Гидрометцентре России значения осадков и температур в пункте вычисляются из прогностических полей путем билинейной интерполяции, а для COSMO-RU07 – путем присвоения значения из ближайшего узла сетки [25]. В условиях горного рельефа выбор метода интерполяции фактических осадков существенно сказывается на значениях метеоэлементов и может вызывать дополнительное снижение точности гидрологического моделирования [138]. Однако, представляется, что при проблемном качестве прогноза сильных осадков численными моделями атмосферы [3, 77] проблема интерполяции прогностических полей не столь принципиальна.

В рамках предлагаемого исследования аналогичная проверка успешности метеорологических прогнозов на сутки вперед по четырем моделям была проделана для метеостанций Красная Поляна, Сочи, Туапсе и Джубга за период с 15.02.2012 г. по 31.07.2013 г. (Красная Поляна) и с 1.01.2013 г. по 31.07.2013 г. (Сочи, Туапсе и Джубга). Эти прогнозы сравнивались с фактическими наблюдениями на каждой из метеостанций. Так как для р.

Туапсе использовались средние арифметические значений слоя осадков и температуры воздуха на метеостанциях в городах Туапсе и Сочи, оценка точности метеорологических прогнозов проводилась и для этих значений. В последующих таблицах результаты такой проверки помещены в строке «Сочи-Туапсе».

Проверка показала, что приземная температура воздуха хорошо прогнозируется с помощью всех четырех метеорологических моделей. Анализ осредненных по месяцам данных показал, что в зимний период (декабрь-март) температура воздуха прогнозируется с гораздо большими ошибками, чем в теплый. При этом в зимний период практически все модели занижают значения температуры воздуха на метеостанциях. Наименьший процент расхождения между фактическими и прогнозируемыми температурами воздуха получается при использовании данных моделей NCEP и COSMO-RU07.

С учетом специфики использования метеорологической информации в решаемой задаче качество прогнозирования суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха характеризовалось коэффициентами корреляции  $r(T_{\text{факт}}, \tilde{T})$  и  $r(P_{\text{факт}}, \tilde{P})$  между фактическими  $T_{\text{факт}}$ ,  $P_{\text{факт}}$  и прогнозируемыми на сутки вперед  $\tilde{T}$ ,  $\tilde{P}$  значениями этих величин. Для среднесуточной температуры приземного слоя воздуха такие коэффициенты корреляции приведены в табл. 3.2, которая подтверждает высокую точность метеорологических прогнозов по всем четырем исследуемым моделям.

Таблица 3.2. Показатели точности прогнозов среднесуточной температуры воздуха

	Кр. Поляна	Сочи	Туапсе	Сочи-Туапсе	Джубга
$r(T_{\text{факт}}, \tilde{T}_{\text{РЕГИОН}})$	0,95	0,94	0,97	0,96	0,98
$r(T_{\text{факт}}, \tilde{T}_{\text{УКМО}})$	0,97	0,95	0,98	0,97	0,99
$r(T_{\text{факт}}, \tilde{T}_{\text{NCEP}})$	0,96	0,97	0,98	0,98	0,98
$r(T_{\text{факт}}, \tilde{T}_{\text{COSMO}})$	0,98	0,97	0,98	0,98	0,98

Для суточного слоя осадков такие коэффициенты корреляции приведены в табл. 3.3, которая демонстрирует значительно более низкую точность метеорологических прогнозов по всем четырем исследуемым моделям.

Таблица 3.3. Показатели точности прогнозов суточного слоя осадков

	Кр. Поляна	Сочи	Туапсе	Сочи-Туапсе	Джубга
$r(P_{\text{факт}}, \tilde{P}_{\text{РЕГИОН}})$	0,37	0,29	0,44	0,47	0,60
$r(P_{\text{факт}}, \tilde{P}_{\text{УКМО}})$	0,56	0,46	0,48	0,52	0,39
$r(P_{\text{факт}}, \tilde{P}_{\text{НСЕР}})$	0,68	0,50	0,63	0,65	0,64
$r(P_{\text{факт}}, \tilde{P}_{\text{COSMO}})$	0,65	0,62	0,86	0,85	0,82

В целях устранения систематических ошибок метеорологических прогнозов и максимально полного использования информации, содержащейся в каждой метеорологической модели, предлагается использовать прогнозы по всем усваиваемым в оперативном режиме моделям «РЕГИОН», УКМО, НСЕР и COSMO-RU07.

Прогноз на сутки вперед среднесуточной температуры приземного слоя воздуха  $\tilde{T}$  предлагается получать по формуле:

$$\tilde{T} = g_0^T + g_1^T \tilde{T}_{\text{РЕГИОН}} + g_2^T \tilde{T}_{\text{УКМО}} + g_3^T \tilde{T}_{\text{НСЕР}} + g_4^T \tilde{T}_{\text{COSMO}}. \quad (3.1)$$

Параметры формулы (3.1)  $g_i^T$ , число использованных для ее получения наблюдений и прогнозов  $N$ , средняя квадратическая погрешность прогноза  $\sigma_T$  и ее отношение к погрешности инерционного прогноза  $\sigma_\Delta$  приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Параметры формулы (3.1) и показатели точности получаемого с ее помощью прогноза среднесуточной температуры приземного слоя воздуха

Метеостанция	$g_0^T$	$g_1^T$	$g_2^T$	$g_3^T$	$g_4^T$	$R$	$\sigma_T$	$\sigma_T/\sigma_\Delta$	$N$
Красная Поляна	2,04	0,07	0,17	-0,07	0,80	0,99	1,17	0,62	270
Сочи	1,70	-0,39	0,47	0,44	0,47	0,98	1,25	0,45	129
Туапсе	1,69	0,02	0,23	0,47	0,24	0,99	1,09	0,45	129
(С+Т)/2	1,82	-0,17	0,35	0,51	0,28	0,99	1,03	0,41	129
Джубга	1,90	-0,38	0,78	0,09	0,42	0,99	1,07	0,45	129

Прогноз на сутки вперед суточного слоя осадков  $\tilde{P}$  предлагается получать по формуле:

$$\tilde{P} = g_0^P + g_1^P \tilde{P}_{\text{РЕГИОН}} + g_2^P \tilde{P}_{\text{УКМО}} + g_3^P \tilde{P}_{\text{НЦЕР}} + g_4^P \tilde{P}_{\text{COSMO}}. \quad (3.2)$$

Параметры формулы (3.2)  $g_i^P$ , число использованных для ее получения наблюдений и прогнозов  $N$ , средняя квадратическая погрешность прогноза  $\sigma_p$  и ее отношение к погрешности инерционного прогноза  $\sigma_\Delta$  приведены в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Параметры формулы (3.2) и показатели точности получаемого с ее помощью прогноза суточного слоя осадков

Метеостанция	$g_0^P$	$g_1^P$	$g_2^P$	$g_3^P$	$g_4^P$	$R$	$\sigma_p$	$\sigma_p/\sigma_\Delta$	$N$
Красная Поляна	0,28	0,31	0,39	1,06	0,26	0,72	6,16	0,59	269
Сочи	0,67	0,26	0,35	0,24	0,58	0,71	7,22	0,59	127
Туапсе	0,08	-0,97	0,23	0,57	0,86	0,87	5,48	0,47	127
(С+Т)/2	0,49	-0,12	0,20	0,31	0,75	0,87	4,71	0,45	127
Джубга	-0,14	0,78	-0,60	0,68	0,55	0,89	3,98	0,46	127

При получении прогноза с заблаговременностью одни сутки расхода  $Q(t+1)$  и уровня  $H(t+1)$  воды в качестве предикторов использовались ожидаемые значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха  $\tilde{T} = T(t+1)$  и суточного слоя атмосферных осадков  $\tilde{P} = P(t+1)$  на соответствующей данному

водосбору метеостанции, для которой они определялись по формулам (3.1) и (3.2) на основе прогнозов по всем четырем метеорологическим моделям. В качестве других предикторов использовались гидрологические и метеорологические характеристики, известные на момент составления прогноза.

### 3.2 Методика прогнозирования расходов воды на реках Черноморского побережья Кавказа

Для всех створов рассматривались различные варианты получения прогноза на сутки вперед среднесуточного расхода воды  $\tilde{Q}(t+1)$  на основе располагаемой на дату его составления гидрометеорологической информации. Для оборудованных самописцами уровня воды створов на р. Мзымта в качестве прогнозируемой величины рассматривался ежедневный срочный максимум  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  расхода воды. В качестве предикторов рассматривались следующие величины:

- среднесуточные расходы воды  $Q(t)$ ,  $Q(t-1)$ , ... за сутки составления прогноза и за предшествующие сутки;
- среднесуточные приземные температуры воздуха на метеостанции  $T(t)$ ,  $T(t-1)$ , ... за сутки составления прогноза и за предшествующие сутки;
- суточные слои осадков на метеостанции  $P(t)$ ,  $P(t-1)$ , ... за сутки составления прогноза и за предшествующие сутки;
- прогноз среднесуточной приземной температуры воздуха  $T(t+1)$ ;
- прогноз суточного слоя осадков  $P(t+1)$  на метеостанции.

Анализировались десятки вариантов формулы получения прогноза, соответствующие исходной модели формирования талого и дождевого стока. Эти варианты различались составом предикторов, критическими значениями температуры, видом прогностической зависимости и продолжительностью периода постоянства ее параметров. Параметры каждого варианта

прогностической зависимости оценивались методом наименьших квадратов. При одинаковом числе оцениваемых параметров и объеме используемых для этого данных наблюдений точность сравниваемых прогностических зависимостей характеризовалась коэффициентом корреляции  $R$  между фактическими и прогнозируемыми значениями расхода воды. В более сложных случаях сравнение вариантов прогностических зависимостей выполнялось на основе рассчитываемой по формуле (3.10) оценки средней квадратической погрешностью  $\sigma_{пр}$  ошибки прогноза [106]. Погрешность выбранных вариантов оценивалась на независимом материале в соответствии с правилами, принятыми в практике гидрологических прогнозов [95, 145]. При сравнении различных вариантов прогностических зависимостей использовались статистические критерии дисперсионного анализа [21, 54, 107, 141].

Необходимо обратить внимание на то, что все формулы используемой модели формирования талого и дождевого стока рассматриваемых рек являются линейными относительно входящих в них параметров (но не предикторов). Это является несомненным достоинством модели, облегчающим статистическую оценку ее параметров и выбор оптимального варианта прогнозирования расходов воды в замыкающих створах.

Исключение составляет формула (2.12). В зависимости от соотношения между средним слоем поступления талых и дождевых вод на поверхность водосбора  $h(t+1)$  и средним максимальным слоем поступления влаги в почву  $i_{max}(t+1)$  в течение суток  $t+1$  эта формула предусматривает различные схемы определения среднего расхода воды склонового стока  $\tilde{q}(t+1)$  с участков водосбора, на которых происходят потери на пополнение запасов почвенной влаги. При недостаточном слое поступления воды, когда выполняется неравенство  $h(t+1) < i_{max}(t+1)$ , расход  $\tilde{q}(t+1)$  определяется формулой (2.10). При избыточном слое поступления воды, когда выполняется неравенство  $h(t+1) \geq i_{max}(t+1)$ , расход  $\tilde{q}(t+1)$  определяется формулой (2.11). Таким образом, формула (2.10) является нелинейной относительно входящих в нее параметров, что

создает технические трудности получения и использования схемы прогнозирования расходов воды в рассматриваемых речных створах.

В связи с отмеченной проблемой важно обратить внимание на специфику решаемой задачи. Задача исследования состоит, прежде всего, в прогнозировании расходов и уровней воды опасных высоких паводков, которые формируются именно при больших значениях слоя поступления талого или дождевого стока. Следовательно, ориентация схемы прогнозирования на ситуацию, когда выполняется неравенство  $h(t+1) \geq i_{max}(t+1)$  и применима формула (2.11), выглядит оправданной. В этом случае все формулы модели, определяющие схему получения прогноза расходов воды в замыкающем речном створе, становятся линейными относительно входящих в них параметров. В частности, при быстром формировании паводков описывающая трансформацию склонового и руслового стока формула (2.15) выполняется при  $l = 1$  и трансформируется в формулу (2.18), а формула (2.16), определяющая средний индекс увлажнения, выполняется при  $m=1$  и трансформируется в формулу (2.17). В результате среднесуточный расход воды в замыкающем створе  $Q(t+1)$  определяется линейными относительно входящих в них параметров формулами (2.3) и (2.20).

Ориентация схемы прогнозирования речного стока на характерный для формирования паводков избыточный слой поступления воды на поверхность водосбора, и замена формулы (2.12) формулой (2.11) дает неоспоримые преимущества и является до некоторой степени обоснованной. Однако допустимость такого упрощения модели потребовала тщательной проверки, которая и была выполнена на основе статистического анализа исходных данных наблюдений для всех восьми рассматриваемых речных створов.

Из имеющихся данных наблюдений базового периода в отдельный массив были выделены случаи значительного увеличения расходов воды, вызванные интенсивным таянием снежного покрова при повышении температуры воздуха. На основе выделенных таким образом данных были получены несколько вариантов прогностических зависимостей. Эти

зависимости сравнивались с аналогичными по виду зависимостями, полученными по оставшимся наблюдениям за период половодья. Применялся критерий сравнения линейных регрессий многофакторного дисперсионного анализа [21, 54, 107, 141]. Этот критерий показал отсутствие статистически достоверных расхождений между параметрами сравниваемых зависимостей – для всего периода половодья вне зависимости от водности реки и температуры воздуха может применяться одна зависимость, основанная на формуле (2.11).

Из имеющихся данных наблюдений в отдельный массив были выделены высокие паводки, вызванные обильными дождями. На основе выделенных таким образом данных были получены несколько вариантов прогностических зависимостей. Эти зависимости сравнивались с аналогичными по виду зависимостями, полученными по оставшимся наблюдениям. И в этом случае критерий сравнения линейных регрессий многофакторного дисперсионного анализа показал отсутствие статистически достоверных расхождений между параметрами сравниваемых зависимостей – для всего паводочного периода вне зависимости от водности реки и слоя выпавших осадков может применяться одна зависимость, основанная на формуле (2.11).

Таким образом, правомочность упрощения модели за счет использования только формулы (2.11), соответствующей характерному для формирования паводков поступлению на поверхность водосбора избыточного слоя талых и дождевых вод, получила достаточное эмпирическое подтверждение [91].

Оптимизации схемы получения прогноза расходов воды в замыкающем створе с заблаговременностью одни сутки, основанная на рассмотренном выше упрощении модели формирования стока рек Черноморского побережья Кавказа, привела к следующим результатам и выводам.

1. Оптимальная продолжительность расчетного периода относительной однородности условий формирования речного стока и постоянства параметров модели его формирования составляет один месяц. Следовательно, оценка параметров прогностической зависимости выполнялась для каждого месяца. При продолжительности базового периода синхронных гидрологических и

метеорологических наблюдений за  $n$  лет для каждого месяца параметры оценивались по данным  $N = 28n - 31n$  наблюдений за вычетом их возможных пропусков.

2. Отмеченное в работах [65, 81, 112] и подтвержденное выше быстрое, в течение нескольких часов, формирование паводков на рассматриваемых реках Черноморского побережья Кавказа обусловлено малыми размерам и большим уклоном поверхности их водосборов. Это привело к тому, что оптимальное значения параметра модели  $l$  в описывающей трансформацию склонового и руслового стока формуле (2.15), равно единице. Оптимальное значение параметра модели  $m$  в определяющей средний индекс увлажнения формуле (2.16), также равно единице. Таким образом, оптимальная схема получения прогноза среднесуточного расхода воды в замыкающем створе соответствует равенству  $l = m = 1$  и определяется формулами (2.3) и (2.20). В соответствии с этим оптимальным для всех восьми речных створов вариантом прогноза на сутки вперед среднесуточного расхода воды  $\tilde{Q}(t+1)$  предлагается прогноз по формуле:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}(t+1) = & a_0 + a_1 Q(t) + a_2 Q(t-1) + a_3 [T(t+1) - T_{min,S}]^2 + a_4 [T(t+1) - T_{min,S}] + \\ & + a_5 P(t+1) [T(t+1) - T_{min,P}]^2 + a_6 P(t+1) [T(t+1) - T_{min,P}] + a_7 P(t+1) + \\ & + a_8 [T(t) - T_{min,S}]^2 + a_9 [T(t) - T_{min,S}] + a_{10} P(t) [T(t) - T_{min,P}]^2 + a_{11} P(t) [T(t) - T_{min,P}] + \\ & + a_{12} P(t). \end{aligned} \quad (3.3)$$

3. При использовании этой формулы следует соблюдать следующие правила:

а) значения  $T(t+1)$  и  $T(t)$ , превышающие  $T_{max}$ , должны заменяться числом  $T_{max}$ ;

б) если значения  $T(t+1)$  или  $T(t)$  оказываются меньше  $T_{min,S}$ , их следует заменять числом  $T_{min,S}$  (отсутствие поступления талых вод);

в) если значения  $T(t+1)$  или  $T(t)$  оказываются меньше  $T_{min,P}$ , в формуле (3.3) значения  $P(t+1)$  или  $P(t)$  следует заменять нулем (отсутствие поступления дождевых вод).

Для каждого водосбора критические значения приземной температуры воздуха  $T_{min,S}$ ,  $T_{min,P}$  и  $T_{max}$  принимаются постоянными в течение всего года и даны в Приложении. Так как критические значения приземной температуры воздуха оценивались для всего года в целом, их величина лишь косвенно отражает процессы, происходящие на каждом водосборе. Поэтому эти значения следует рассматривать не в качестве физически обоснованных величин, а в качестве параметров формулы получения прогноза.

Для оборудованных самописцами створов на р. Мзымта те же формулы могут быть использованы для получения прогноза суточного максимума расхода и уровня воды. Для этого в формуле (3.3) значения  $\tilde{Q}(t+1)$ ,  $Q(t)$ ,  $Q(t-1)$  необходимо заменить на  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ ,  $Q_{max}(t)$  и  $Q_{max}(t-1)$ , а в формуле (3.7) заменить  $\tilde{H}(t+1)$  и  $\tilde{Q}(t+1)$  на  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  и  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ .

Оценки параметров формулы (3.3), полученные методом наименьших квадратов для всех месяцев, даны в Приложении. Знак и величина каждого из содержащихся в уравнении регрессии коэффициентов отнюдь не всегда отражает характер связи между прогнозируемой величиной и соответствующим предиктором, но зависит от его статистических связей с другими предикторами.

Например, при положительной корреляции каждого из двух предикторов с прогнозируемой величиной и между собой в стоящие при этих предикторах коэффициенты в уравнении регрессии могут быть разных знаков [54, 141]. Это наглядно иллюстрирует следующий пример.

Предположим, что величина  $Y$  прогнозируется по уравнению линейной регрессии с учетом двух предикторов  $X_1$  и  $X_2$ . Не теряя общности, предположим, что все три величины имеют нулевое среднее и одинаковую дисперсию. Пусть коэффициент корреляции между величинами  $Y$  и  $X_1$  равен  $r_{0,1} = 0,8$ , а между величинами  $Y$  и  $X_2$  он равен  $r_{0,2} = 0,7$ . То есть, обе величины положительно связаны с прогнозируемой. В этой ситуации естественно ожидать, что в прогностической зависимости  $Y = a_1X_1 + a_2X_2$  оба коэффициента

$a_1$  и  $a_2$  также будут положительными. Каждый из этих коэффициентов определяется формулой:

$$a_1 = \frac{r_{0,1} - r_{0,2}r_{1,2}}{1 - r_{1,2}^2}, \quad a_2 = \frac{r_{0,2} - r_{0,1}r_{1,2}}{1 - r_{1,2}^2}, \quad (3.4)$$

где  $r_{1,2}$  - коэффициент корреляции между величинами  $X_1$  и  $X_2$ . Если оба предиктора достаточно тесно и положительно связаны между собой и, например,  $r_{1,2} = 0,95$ , то получаются коэффициенты регрессии  $a_1 = 1,385$  и  $a_2 = -0,615$  при  $r_{0,2} = 0,7$ . Первый коэффициент учитывает совместное влияние на  $Y$  обоих предикторов, а второй – влияние  $X_2$ , не связанное с первым предиктором  $X_1$ .

Выбор формулы (3.3) в качестве единой основы для прогнозирования расходов воды с заблаговременностью одни сутки осуществлялся путем анализа множества различных вариантов, соответствующих изложенной в главе 2 модели формирования стока рек исследуемого региона. Данная формула позволяет прогнозировать расходы воды, сформированные как за счет таяния снега, так и за счет выпадения дождей. В то же время, исследуемые реки имеют различный характер питания, который, к тому же, изменяется в течение года. Как было отмечено в главе 1, доля снегового питания значительна для рек Мзымта и Сочи в период весенне-летнего половодья. Для остальных рек и в течение других сезонов преобладает дождевой сток. Исходя из этого, рассматривались иные варианты формулы получения прогноза. В частности, рассматривалась формула с упрощенным учетом известной на дату составления прогноза и ожидаемую на следующие сутки температуры воздуха:

$$\begin{aligned} \tilde{Q}(t+1) = & a_0 + a_1Q(t) + a_2Q(t-1) + a_3[T(t+1) - T_{min,S}] + a_4P(t+1)[T(t+1) - T_{min,P}] + \\ & + a_5P(t+1) + a_6[T(t) - T_{min,S}] + a_7P(t)[T(t) - T_{min,P}] + a_8P(t). \end{aligned} \quad (3.5)$$

Для рек и для периодов года с незначительной долей снегового питания и малыми потерями стока на испарение рассматривался и вариант, в котором температура воздуха вообще не учитывается:

$$\tilde{Q}(t+1) = a_0 + a_1Q(t) + a_2Q(t-1) + a_3P(t+1) + a_4P(t). \quad (3.6)$$

В табл. 3.6 и 3.7 для рек Туапсе и Сочи приведены полученные с помощью формулы (3.10) оценки среднеквадратической погрешности  $\sigma_{пр}$  прогноза среднесуточных расходов воды по формулам (3.3), (3.5) и (3.6).

Таблица 3.6. Погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  м<sup>3</sup>/с среднесуточных расходов воды в створе р. Туапсе – г. Туапсе

формула	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
(3.3)	15,9	13,6	14,7	10,8	11,6	2,9	1,2	19,2	12,4	7,8	20,5	22,6	14,2
(3.5)	15,7	13,5	14,8	10,9	11,8	3,0	1,3	26,0	13,1	8,3	19,8	22,5	15,1
(3.6)	20,0	13,7	14,6	12,4	12,5	3,0	1,3	36,5	13,9	8,3	19,6	25,6	17,7

Таблица 3.7. Погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  м<sup>3</sup>/с среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи

формула	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
(3.3)	10,4	8,5	10,7	8,6	14,8	12,1	9,2	11,2	8,8	15,3	14,5	16,2	12,0
(3.5)	10,5	8,5	10,8	8,9	15,7	12,0	9,1	11,2	8,6	15,3	14,9	16,0	12,1
(3.6)	10,4	8,7	10,7	9,1	15,4	12,1	9,2	11,2	8,6	15,6	15,7	16,1	12,2

Приведенные данные показывают, что для всех месяцев использование отличных от формулы (3.3) вариантов приводит к таким же или более высоким значениям погрешности прогноза. Аналогичные результаты были получены при рассмотрении других вариантов формулы получения прогноза. Для всех речных створов и в течение всего года формула (3.3) практически позволяет получать минимальную погрешность прогноза. Данное обстоятельство в сочетании с необходимостью разработки и оперативного использования единой автоматизированной системы прогнозирования стока рек Черноморского побережья Кавказа послужило основанием для использования формулы (3.3) в предлагаемой методике краткосрочного прогнозирования расходов воды.

### 3.3 Прогнозирование уровней и максимальных расходов воды

Русла рассматриваемых горных рек отличаются неустойчивостью. Это демонстрирует рис. 3.2, на котором представлены кривые расходов  $Q(H)$  в створе р. Сочи – г. Сочи, полученные для различных лет.

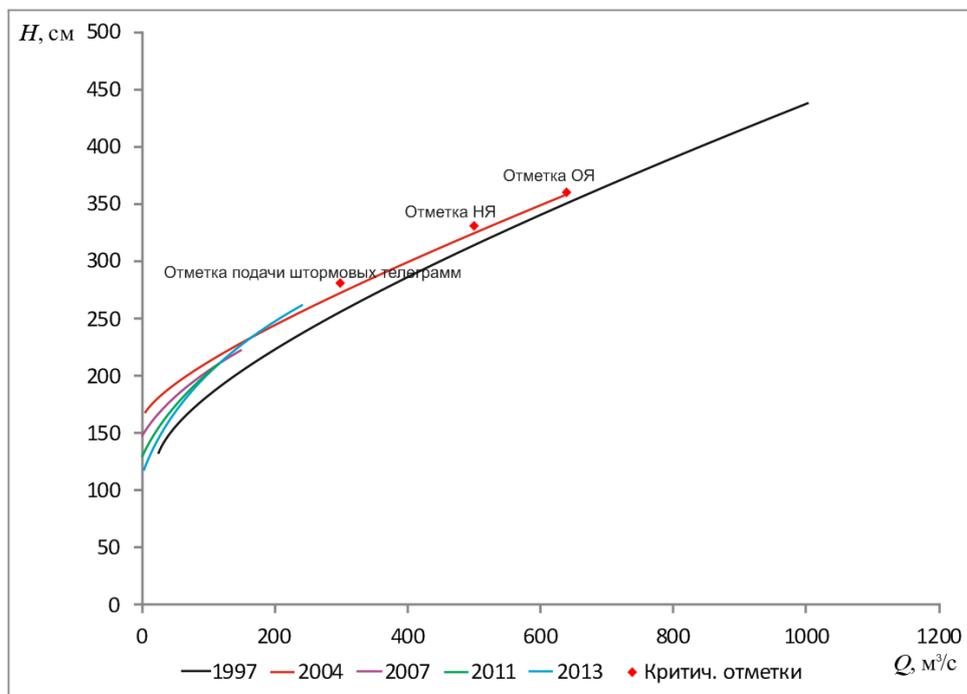


Рисунок 3.2. Кривые  $Q(H)$  для р. Сочи – г. Сочи за разные годы.

Неустойчивость русел рассматриваемых рек требует регулярной проверки и уточнения кривых расходов воды. Для оценочного прогноза на сутки вперед уровней воды можно воспользоваться приведенными в Приложении зависимостями  $Q(H)$ , и уже с помощью полученного по формуле (3.3) для каждого месяца прогнозом среднесуточного расхода воды  $\tilde{Q}(t+1)$  оценить ожидаемый уровень воды. Прогноз среднесуточного уровня воды на сутки  $t+1$  определяется формулой:

$$\tilde{H}(t+1) = H[\tilde{Q}(t+1)]. \quad (3.7)$$

Из восьми рассматриваемых створов на реках Черноморского побережья Кавказа автору были предоставлены данные самописцев уровня воды только по

двум створам на р. Мзымта. Для этих створов ожидаемый на следующие сутки срочный максимум расхода воды  $Q_{max}$  может прогнозироваться непосредственно по предложенной выше общей схеме. Для остальных рек предложенная выше схема позволяет получать только прогноз  $\tilde{Q}$  среднесуточного расхода воды. Прогноза максимального расхода воды предлагается получать с помощью переходного коэффициента в виде  $\tilde{Q}_{max} = k \tilde{Q}$ .

В целях обоснования такого решения анализировалась информация о соотношении между максимальными  $Q_{max}$  и среднесуточными  $Q$  расходами воды в створах на р. Мзымта, полученная по данным самописца. Между величинами  $Q_{max}$  и  $Q$  имеет место достаточно тесная линейная зависимость с коэффициентом корреляции 0,97 (рис. 3.3).

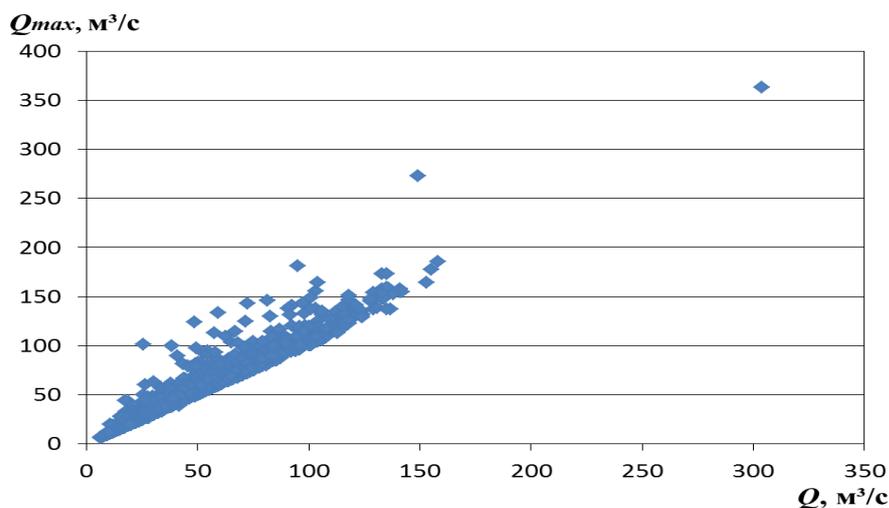


Рисунок 3.3. Соотношение между суточными максимумами  $Q_{max}$  и среднесуточными расходами воды  $Q$  в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна.

Для остальных шести речных створов единственным источником информации о соотношении между максимальными и среднесуточными расходами воды являются данные гидрологических ежегодников за 37 – 66 лет, в которых для каждого месяца помещены значения месячного максимума  $\hat{Q}_{max}$

и соответствующего той же дате среднесуточного расхода воды  $\hat{Q}$ . Число пар значений  $\hat{Q}_{max}$  и  $\hat{Q}$  по всем месяцам варьирует от 420 до 960. Анализ этих данных подтвердил тесную зависимость максимального расхода  $\hat{Q}_{max}$  от среднесуточного  $\hat{Q}$ . Среднее значение коэффициента корреляции между этими величинами равно 0,93. Эта зависимость хорошо описывается уравнением  $\hat{Q}_{max} = k \hat{Q}$ . Исходя из этого, по данным ежегодников для каждой пары значений  $\hat{Q}_{max}$  и  $\hat{Q}$  вычислялся и анализировался расчетный коэффициент  $k = \hat{Q}_{max} / \hat{Q}$ .

В расчетах речного стока используется положение об увеличении соотношения между срочным максимумом расхода воды и его среднесуточным значением по мере уменьшения размеров водосбора [16, 143]. В подтверждение этого положения статистическая зависимость между средними значениями коэффициента  $k$  для каждого из восьми рассматриваемых речных створов и площадями соответствующих водосборов оказалась достаточно тесной, линейно убывающей, с коэффициентом корреляции между этими величинами, равным – 0,76 (рис. 3.4).

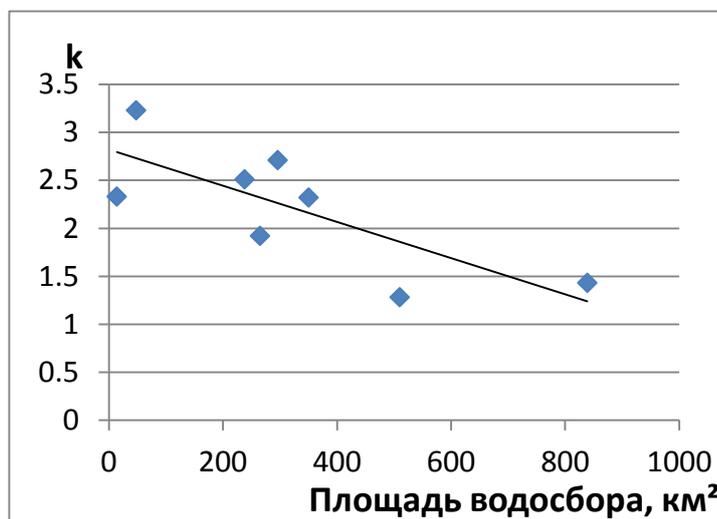


Рисунок 3.4. Зависимость между средним соотношением максимальных и среднесуточных расходов воды паводков  $k$  и площадью водосбора рек

Оценка однородности внутригодового распределения среднемесячных расчетных значений  $\bar{k}$  осуществлялась с помощью критерия Фишера однофакторного дисперсионного анализа [21, 54, 141]. Применение этого критерия показало, что во всех восьми створах соответствующие разным месяцам значения  $\bar{k}$  статистически достоверно отличаются друг от друга. Следовательно, обнаружен внутригодовой ход соотношения между максимальными и среднесуточными расходами воды (рис. 3.5). Наибольшие значения переходного коэффициента  $k$  приурочены к летним месяцам с июня по сентябрь в период прохождения редких, но высоких паводков, вызванных интенсивными осадками. Наименьшие отличия максимальных и среднесуточных расходов во время паводков характерны с января по апрель, в сезон наибольшего числа паводков для большинства рек. Для Мзымты низкие значения  $k$  в эти месяцы обусловлены тем, что рост расходов может быть вызван только сравнительно плавной водоотдачей из снега.

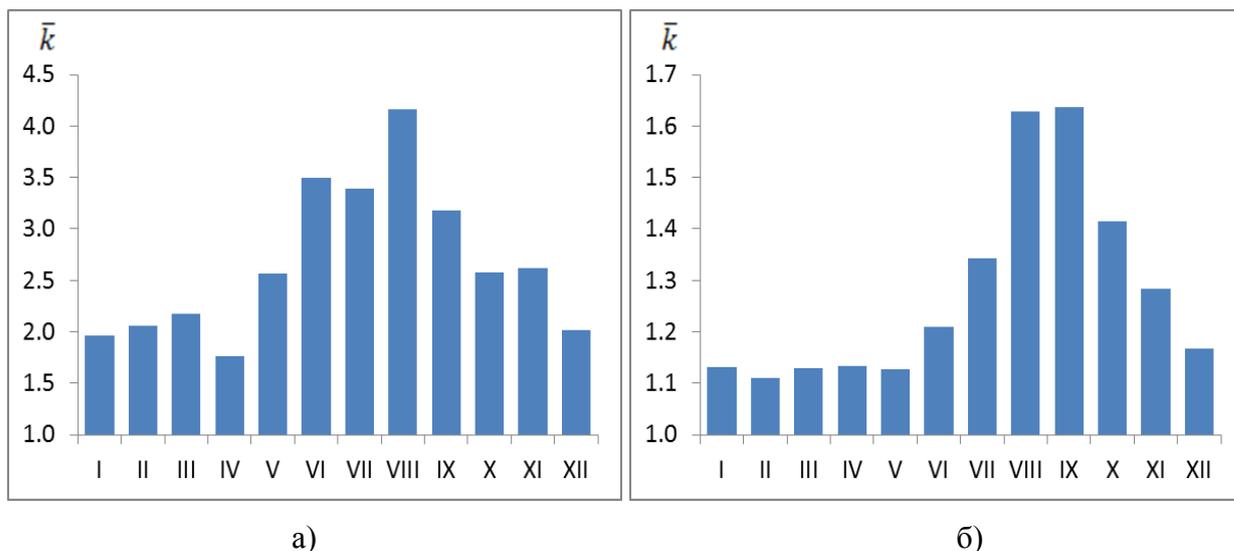


Рисунок 3.5. Внутригодовой ход соотношения между максимальными и среднесуточными расходами воды р. Сочи в г. Сочи (а), р. Мзымты в п. Красная Поляна (б)

Таким образом, при наличии прогноза среднесуточного расхода воды  $\tilde{Q}(t+1)$  на сутки  $t+1$  для соответствующего месяца прогноз максимального

расхода воды в необорудованном самописцем речном створе предлагается получать по формуле:

$$\tilde{Q}_{max}(t+1) = \bar{k} \tilde{Q}(t+1), \quad (3.8)$$

где  $\bar{k}$  - среднее для каждого месяца соотношение между максимальными и среднесуточными расходами воды по данным гидрологических ежегодников. В целях подстраховки этот коэффициент можно заменять значением  $k(5\%)$ , соответствующим обеспеченности 5%. Использование такого значения с вероятностью 95% исключает опасности занижения ожидаемого максимального расхода и уровня воды. В табл. 3.8 помещены значения этих коэффициентов для створа р. Сочи – г. Сочи. Для всех рассматриваемых речных створов значения этих коэффициентов даны в Приложении.

Таблица 3.8. Значения переходных коэффициентов  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  для створа  
р. Сочи – г. Сочи

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\bar{k}$	2,00	2,07	2,19	1,77	2,66	3,57	3,47	4,32	3,30	2,60	2,64	1,97
$k(5\%)$	3,10	3,62	5,78	2,57	8,90	10,39	8,62	10,00	6,42	5,06	4,62	3,06

Для получения прогноза максимального уровня воды  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  используется кривая расходов  $Q(H)$  и определяемое формулой (3.6) значение  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ .

#### 3.4 Оценка погрешности и эффективности предлагаемой методики прогноза

Для каждого из восьми рассматриваемых водосборов получено 12 прогностических зависимости вида (3.3), соответствующих каждому месяцу. Для оценки параметров каждой такой зависимости использовались  $N$  наборов значений прогнозируемого расхода воды  $Q(t+1)$  и соответствующих предикторов  $Q(t)$ ,  $Q(t-1)$ ,  $P(t+1)$ ,  $T(t+1)$ ,  $P(t)$ ,  $T(t)$  для всех суток, относящихся к соответствующему месяцу и взятых из общего массива синхронных

гидрологических и метеорологических наблюдений за базовый период продолжительностью  $n$  лет. Число  $N$  равно  $28n - 31n$  за вычетом возможных пропусков наблюдений. Так как продолжительность базового периода  $n$  для различных водосборов варьирует от 8 до 20, объем данных  $N$  варьирует от 224 до 620. На основе этих данных оценивалось  $K = 13$  параметров формулы (3.3).

При этом следует иметь в виду, что точность определения каждого параметра и всей зависимости в целом зависит не только от продолжительности использованного ряда наблюдений  $N$ , но и от тесноты связи прогнозируемой величины с ее предикторами, выражаемой множественным коэффициентом корреляции  $R$ . Средняя квадратическая погрешность  $\sigma(a_i)$  оценки  $a_i$  каждого из параметров прогностической зависимости равна:

$$\sigma(a_i) = \varphi_i \sqrt{\frac{1 - R^2}{N - K}}, \quad (3.9)$$

где коэффициент  $\varphi_i$  определяется статистическими свойствами  $i$ -го предиктора и его связью с остальными [106]. Следовательно, благодаря высоким значениям показателя тесноты прогностических зависимостей  $R$  (от 0,76 до 0,95), продолжительность использованных рядов можно считать достаточной для оценки параметров формулы (3.3).

В соответствие с принятыми требованиями погрешность прогноза характеризовалась средней квадратической погрешностью  $\sigma_{пр}$  его ошибки. В практике гидрологических прогнозов для оценки  $\sigma_{пр}$  применяется проверка на «независимом» материале [76, 95, 106, 141, 145]. С целью такой проверки при оценке параметров прогностических зависимостей из ряда наблюдений заранее исключались данные за один год. Данные за этот год использовались для сравнения прогноза расходов воды с их фактическими значениями. Эта процедура производилась для всех  $n$  лет базового периода, и на основе данных последовательно исключавшихся лет оценивалась погрешность прогноза  $\sigma_{пр}$ . В качестве примера на рис. 3.6 представлены совмещенные графики фактических и спрогнозированных колебаний среднесуточного расхода воды в створе р.

Мзымта – п. Казачий Брод за 2005 год, который был предварительно исключен из ряда наблюдений в целях проверки методики прогноза на «независимом» материале. Рисунок демонстрирует хорошее совпадение прогнозируемых расходов с их фактическими значениями.

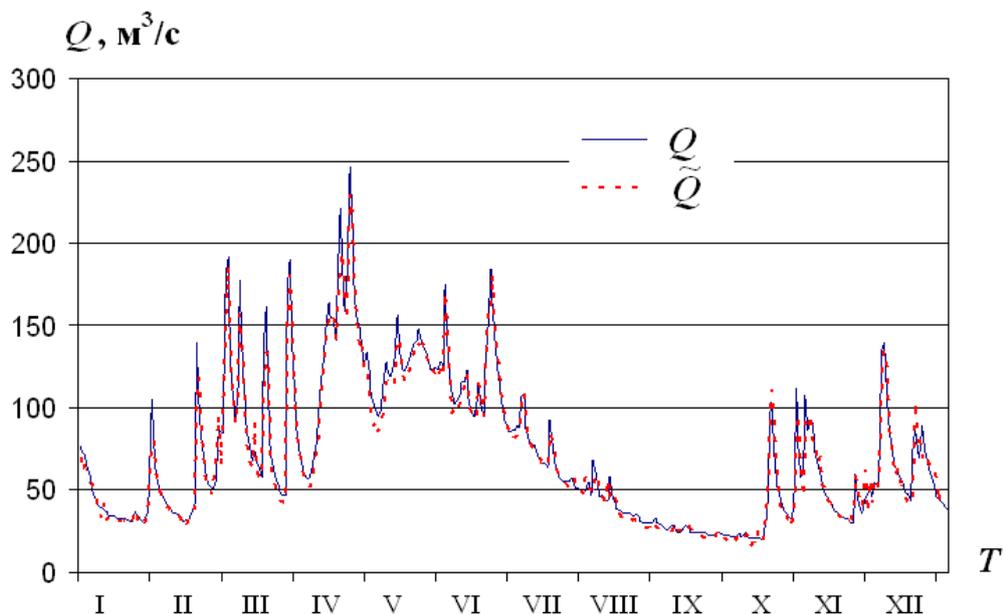


Рисунок 3.6. Фактический и спрогнозированный графики колебаний среднесуточного расхода воды в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод за 2005 г.

Для оценки погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  также использовалась теоретическая формула, которая учитывает не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного ряда наблюдений  $N$  и числом оцениваемых параметров  $K$ . Предложенная А.В. Христофоровым формула получения такой оценки имеет вид:

$$\sigma_{пр} = \sqrt{\frac{N-1}{(N-K)(N-K-1)} \sum_{j=1}^N (\tilde{Q}_j - Q_j)^2}, \quad (3.10)$$

где  $Q_j$  - фактическое, а  $\tilde{Q}_j$  - прогнозируемое значения среднесуточного расхода воды,  $K$  - число оцениваемых параметров прогностической зависимости ( $K = 13$ ),  $N$  - число наблюдений, использованных для их оценки [106].

Эффективность прогноза определяется соотношением  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ . Величина  $\sigma_{\Delta}$  характеризует погрешность инерционного прогноза и рассчитывается, как стандартная статистическая погрешность разности  $\Delta(t+1) = Q(t+1) - Q(t)$  [76]. Для обоих створов на р. Мзымта прогнозировались не среднесуточные, а максимальные расходы воды, поэтому анализировалась разность  $\Delta_{max}(t+1) = Q_{max}(t+1) - Q_{max}(t)$ .

В табл. 3.9 для створа р. Туапсе – г. Туапсе приведены общее количество  $N$  использованных суток с синхронными гидрологическими и метеорологическими наблюдениями, множественный коэффициент корреляции между фактическими и прогнозируемыми значениями максимального расхода воды  $R$ , средняя квадратическая погрешность прогноза  $\sigma_{пр}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ .

Таблица 3.9. Характеристики точности и эффективности прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Туапсе – г. Туапсе

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$N$	273	254	279	270	279	270	279	279	270	248	240	248
$R$	0,92	0,86	0,80	0,92	0,89	0,84	0,91	0,90	0,80	0,84	0,80	0,86
$\sigma_{пр}$	15,9	13,6	14,7	10,8	11,6	2,9	1,2	18,6	12,5	7,8	20,5	22,6
$\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$	0,47	0,73	0,78	0,58	0,52	0,72	0,64	0,35	0,63	0,67	0,57	0,64

Эффективность прогностической зависимости  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$  отличается для холодного и теплого периода и разных месяцев. В целом более низкая точность прогноза в летние месяцы обусловлена меньшей частотой паводков (по которым оцениваются параметры модели) с более сложными условиями формирования. В этот сезон ярче проявляется пространственная неравномерность осадков, что приводит к нерепрезентативности данных метеостанции (расположенной обычно вблизи замыкающего створа) относительно ситуации на водосборе.

В целом качество прогноза для всех 8 створов можно признать удовлетворительным,  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$  в среднем составляет от 0,60 до 0,74. Наиболее низкие показатели точности прогноза характерны для водосбора р. Куапсе, что можно объяснить как его малыми размерами, так и удаленным положением от метеостанций. В табл. 3.10 помещены значения множественного коэффициента корреляции для предлагаемых прогностических зависимостей  $R$ , их погрешности  $\sigma_{пр}$  и показателя эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ . Там же помещено общее количество использованных синхронных гидрологических и метеорологических наблюдений, равное сумме  $\sum_{i=1}^{12} N_i$  всех дней наблюдений для каждого месяца. Для каждого месяца в отдельности аналогичные данные помещены в Приложении.

Таблица 3.10. Характеристики предлагаемых прогностических зависимостей

Река, створ	$n$	$\sum_{i=1}^{12} N_i$	$R$	$\sigma_{пр},$ м <sup>3</sup> /с	$\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$	$\tilde{N}$	$\tilde{\sigma}_{пр},$ м <sup>3</sup> /с	$\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta}$
р. Вулан, с. Архипо-Осиповка	20	7238	0,78	6,4	0,56	72	51,9	0,56
р. Туапсе, г. Туапсе	9	3189	0,86	14,2	0,53	31	79,8	0,44
р. Куапсе, Мамедова Щель	19	6691	0,80	0,85	0,62	68	7,4	0,57
р. Зап. Дагомыс, п. Дагомыс	17	6204	0,76	3,3	0,59	62	24,3	0,56
р. Сочи, с. Пластунка	17	6020	0,82	8,6	0,65	60	54,1	0,62
р. Сочи, г. Сочи	18	6506	0,81	12,0	0,62	65	74,6	0,60
р. Мзымта, п. Кр. Поляна	8	2761	0,95	8,6	0,60	28	46,7	0,51
р. Мзымта, п. Казачий Брод	11	4012	0,92	15,3	0,60	40	80,5	0,48

Исходя из того, что прогнозирование опасно высоких паводков на реках Черноморского побережья Кавказа является главной задачей настоящего исследования, для каждого из восьми речных створов была выполнена дополнительная проверка предлагаемой схемы получения прогноза для случаев экстремально большого увеличения расходов воды в течение суток. С этой целью из всего набора  $\sum_{i=1}^{12} N_i$  сопоставлений фактических  $Q(t+1)$  и прогнозируемых  $\tilde{Q}(t+1)$  расходов воды в каждом речном створе был выбран 1% наборов с наибольшими значениями  $\Delta(t+1) = Q(t+1) - \tilde{Q}(t+1)$ . Таким образом, были выделены случаи увеличения расхода воды за сутки, соответствующего обеспеченности не выше 1%. Для этих  $\tilde{N} \approx 0,01 \sum_{i=1}^{12} N_i$  случаев были получены оценки средней квадратической погрешности прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр}$  и показателя его эффективности  $\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta}$ . При этом параметры прогностических зависимостей не подстраивались под новый ряд из  $\tilde{N}$  наборов значений расхода  $Q(t+1)$  и его предикторов, а использовались ранее полученные оценки параметров соответствующего месяца. Значения  $\tilde{N}$ ,  $\tilde{\sigma}_{пр}$  и  $\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta}$  также помещены в табл. 3.10.

Приведенные данные свидетельствуют, что предлагаемая схема получения краткосрочного прогноза расходов воды с заблаговременностью одни сутки достаточно надежна и эффективна для всех рассматриваемых бассейнов рек Черноморского побережья Кавказа. Как и следовало ожидать, для случаев экстремально большого увеличения расходов воды за одни сутки погрешность их прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр}$  значительно больше средней  $\sigma_{пр}$ , однако их эффективность выше средней.

Согласно части 1 раздела 3 Наставлений по службе прогнозов в целях разделения погрешностей метеорологических и собственно гидрологических прогнозов при оценке точности и эффективности методики использовались не прогнозируемые, а фактические значения среднесуточной температуры  $T(t+1)$

приземного слоя воздуха и суточного слоя атмосферных осадков  $P(t+1)$  за следующие сутки [76]. Именно таким образом были получены среднеквадратические погрешности методик  $\sigma_{пр}$  и показатели  $\sigma_{пр}/\sigma_{\Delta}$  их эффективности. Если в формулу (3.3) подставлять прогнозируемые значения температуры и осадков, то соответствующие значения  $\hat{\sigma}_{пр}$  и  $\hat{\sigma}_{пр}/\sigma_{\Delta}$  окажутся больше. Данный эффект наглядно демонстрирует табл. 3.11. Для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна приведены показатели эффективности прогноза  $\sigma_{пр}/\sigma_{\Delta}$  при использовании фактических значений температуры и осадков на следующие сутки и показатели эффективности  $\hat{\sigma}_{пр}/\sigma_{\Delta}$  при использовании прогнозируемых значений этих величин. Там же приведены показатели эффективности прогноза  $\bar{\sigma}_{пр}/\sigma_{\Delta}$  для случая, когда прогноз ожидаемых значений температуры и осадков не используется, и величины  $T(t+1)$  и  $P(t+1)$  в формуле (3.3) заменяются их нормами, рассчитанными по базовому периоду.

Таблица 3.11. Показатели эффективности прогноза максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$\sigma_{пр}/\sigma_{\Delta}$	0,66	0,63	0,53	0,65	0,65	0,71	0,63	0,57	0,46	0,65	0,50	0,79	0,60
$\hat{\sigma}_{пр}/\sigma_{\Delta}$	0,71	0,70	0,62	0,69	0,72	0,77	0,71	0,66	0,54	0,73	0,57	0,83	0,69
$\bar{\sigma}_{пр}/\sigma_{\Delta}$	0,84	0,94	0,91	0,85	0,93	0,89	0,92	0,90	0,94	0,91	0,93	0,92	0,91

Данные табл.3.11 показывают, что для каждого месяца и всего года в целом замена фактических значений ожидаемых температуры воздуха и слоя осадков их прогнозом увеличивает погрешность и показатель эффективности методики в среднем на 15%. Однако эффективность методики остается удовлетворительной, так как за исключением декабря выполняется неравенство  $\hat{\sigma}_{пр}/\sigma_{\Delta} \leq 0,80$  [76]. Это обусловлено тем, что, не смотря на небольшие размеры водосборов, малая заблаговременность прогноза приводит к тому, что известный на дату составления прогноза расход воды  $Q(t)$  является важнейшим

предиктором в предлагаемой схеме получения прогноза расхода  $Q(t+1)$ , ожидаемого в следующие сутки. Величина  $Q(t)$  служит интегральным показателем степени увлажнённости водосбора, запасов подземных вод и русловых запасов воды. Ведущую роль этого фактора демонстрируют данные табл. 3.12. В этой таблице для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна приведены ежемесячные и среднегодовые значения множественного коэффициента корреляции  $R$  для предлагаемой прогностической зависимости (3.3) и коэффициента корреляции  $r$  между расходами воды  $Q(t)$  и  $Q(t+1)$  за смежные сутки.

Таблица 3.12. Значения коэффициентов корреляции  $R$  и  $r$  для максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$R$	0,97	0,97	0,98	0,96	0,96	0,94	0,9	0,91	0,95	0,91	0,96	0,96
$r$	0,92	0,88	0,88	0,89	0,89	0,88	0,74	0,64	0,67	0,73	0,80	0,90

Близость значений  $R$  и  $r$  подтверждает ведущую роль известного на дату составления прогноза расхода воды при прогнозировании водности реки в течение следующих суток. Аналогичные результаты были получены для других речных створов. Таким образом, для исследуемых водосборов погрешность метеорологических прогнозов не приводит к значительному снижению точности и эффективности прогнозов речного стока.

В то же время табл. 3.11 демонстрирует важность метеорологического прогноза ожидаемых на следующие сутки температуры воздуха и слоя осадков. Без учета этих величин показатель  $\bar{\sigma}_{np} / \sigma_{\Delta}$  превышает 0,80, то есть методика становится неэффективной.

Проверка изложенной выше методики получения прогноза максимального расхода воды для не оборудованных самописцами речных створов была выполнена для створа р. Мзымта – п. Казачий Брод. В соответствии с данными табл. 3.10 погрешность непосредственно получаемого

по формуле (3.3) прогноза максимального расхода воды равна  $\sigma_{np} = 15,3 \text{ м}^3/\text{с}$ . В случае, когда формула (3.3) используется для получения прогноза среднесуточного расхода воды в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод, а прогноз максимального расхода определяется по формуле (3.8), погрешность прогноза равна  $\hat{\sigma}_{np} = 16,8 \text{ м}^3/\text{с}$ . Следовательно, использование предлагаемой методики перехода привела к увеличению погрешности прогноза максимальных расходов воды на 10%.

При получении прогноза максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  по описанной выше схеме средняя квадратическая погрешность такого прогноза  $\hat{\sigma}_{np}(\tilde{Q}_{max})$  может быть приближенно определена для каждого месяца с помощью предлагаемой теоретической формулы:

$$\hat{\sigma}_{np}(\tilde{Q}_{max}) = \bar{k} \sqrt{\sigma_{np}^2(\tilde{Q}) + Cv^2[\bar{Q}^2 + D(Q)]}, \quad (3.11)$$

где  $\bar{k}$  и  $Cv$  - среднее значения и коэффициент вариации расчетного коэффициента  $k$ ,  $\bar{Q}$  и  $D(Q)$  - среднее значение и дисперсия среднесуточного расхода воды,  $\sigma_{np}(\tilde{Q})$  - средняя квадратическая погрешность его прогноза для данного месяца.

Погрешность инерционного прогноза  $\hat{\sigma}_{\Delta}$  максимальных расходов воды может быть приближенно определена для каждого месяца с помощью предлагаемой теоретической формулы:

$$\hat{\sigma}_{\Delta} = \bar{k} \sigma_{\Delta} \sqrt{1 + Cv^2}, \quad (3.12)$$

где  $\sigma_{\Delta}$  - погрешность инерционного прогноза среднесуточных расходов воды.

Формулы справедливы в предположении, что среднее значение отношения максимальных и среднесуточных расходов воды равно  $\bar{k}$ . Обе оценки погрешности для всего года в целом можно упростить, если в формулы (3.11) и (3.12) подставлять соответствующие характеристики расчетного переходного коэффициента  $k$  и среднесуточного расхода воды  $Q$ , полученные также для всего года в целом. Рассчитанные по формулам (3.11) и (3.12) для створа р. Мзымта – п. Казачий Брод теоретические оценки  $\hat{\sigma}_{np}(\tilde{Q}_{max}) = 17,8 \text{ м}^3/\text{с}$ ,

$\hat{\sigma}_{\Delta} = 31,8 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $\hat{\sigma}_{np}/\hat{\sigma}_{\Delta} = 0,56$  оказались близки к полученным по фактическим данным соответствующим значениям, равным  $\hat{\sigma}_{np} = 16,8 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\hat{\sigma}_{\Delta} = 29,8 \text{ м}^3/\text{с}$  и  $\hat{\sigma}_{np}/\hat{\sigma}_{\Delta} = 0,55$ .

Для каждого не оборудованного самописцем речного створа в табл.3.13 помещены: среднее значение переходного коэффициента  $k$ , погрешность прогноза максимальных расходов  $\hat{\sigma}_{np}(\tilde{Q}_{max})$  и показатель его эффективности  $\hat{\sigma}_{np}/\hat{\sigma}_{\Delta}$ .

Таблица 3.13. Погрешность и эффективность прогноза максимальных расходов воды для речных створов, не оборудованных самописцами уровня воды

Река, створ	$k$	$\hat{\sigma}_{np}(\tilde{Q}_{max}) \text{ м}^3/\text{с}$	$\hat{\sigma}_{np}/\hat{\sigma}_{\Delta}$
р. Вулан	1,92	16,1	0,62
р. Туапсе	2,32	52,5	0,57
р. Куапсе	2,33	3,6	0,64
р. Зап. Дагомыс	3,23	13,8	0,62
р. Сочи - с. Пласт.	2,51	25,6	0,67
р. Сочи - г. Сочи	2,71	40,8	0,65

Таким образом, предлагаемая схема прогнозирования расходов воды на реках Черноморского побережья Кавказа вполне отвечает главной задаче исследования.

## ГЛАВА 4. ВЕРОЯТНОСТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАВОДКОВ НА РЕКАХ ЧЕРНОМОРСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА

### 4.1 Постановка задачи вероятностного прогноза

Для каждого из восьми рассматриваемых створов местными административными органами заданы три критических значения уровня воды  $H_{кр}$ , соответствующие различным уровням опасности. Этим уровням соответствуют критические значения расхода воды  $Q_{кр}$ , определяемые по регулярно уточняемым зависимостям  $Q(H)$ . Для каждого створа значения  $H_{кр}$  и  $Q_{кр}$ , ежемесячные и ежегодные вероятности их превышения даны в Приложении. В качестве примера в табл. 4.1 приведены значения критических уровней и расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна.

Таблица 4.1. Критические уровни воды над «0» графика поста и соответствующие расходы воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

Уровень опасности	$H_{кр}$ см	$Q_{кр}$ м <sup>3</sup> /с
отметка для подачи штормовых телеграмм	360	150
отметка неблагоприятного явления	400	255
отметка опасного явления	430	355

Вероятности превышения критических расходов воды в течение всего года и каждого месяца, полученные по многолетним рядам соответствующих максимумов расхода воды, помещены в табл. 4.2.

Таблица 4.2. Вероятности (%) превышения критических значений уровня  $H_{кр}$  и расхода воды  $Q_{кр}$  в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$Q_{кр} = 150$	0,7	0,4	1,4	13	22	24	6,7	7,6	5,5	11	10	8	65
$Q_{кр} = 255$	0,07	0,03	0,07	0,48	0,08	1,1	0,16	1,0	0,56	2,7	2,3	1,8	10
$Q_{кр} = 355$	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,05	0,01	0,21	0,09	0,90	0,77	0,61	1,1

Как и следовало ожидать, вероятности превышения критических расходов в течение года выше, чем для каждого месяца. В феврале в условиях зимней межени вероятности превышения всех критических расходов минимальны. Во время половодья сказывается высокая водность реки, и эти вероятности уже заметно больше. Благодаря высокой изменчивости речного стока в сезон активного прохождения паводков, вероятность превышения даже самого высокого критического расхода заметно превышает нуль.

Вероятностное прогнозирование максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки состоит в следующем.

В зависимости от располагаемой к дате составления прогноза гидрометеорологической информации, включая предсказание хода метеорологических элементов в течение периода его заблаговременности  $I(t)$  определяется условная вероятность  $p_{кр}(t+1)$  превышения критических уровней  $H_{кр}$  и расходов воды  $Q_{кр}$  в течение следующих суток  $t+1$ . Эта условная вероятность определяется равенством:

$$p_{кр}(t+1) = P\{Q_{max}(t+1) > Q_{кр} | I(t)\} = P\{H_{max}(t+1) > H_{кр} | I(t)\}, \quad (4.1)$$

где  $P\{\}$  - знак вероятности некоторого события. Необходимость в таком вероятностном прогнозировании обусловлена ошибками прогнозирования и спецификой мероприятий по защите населения и хозяйственных объектов от опасных паводков.

При наличии достаточно надежных и однозначных зависимостей  $Q(H)$  случайные события  $Q_{max}(t+1) > Q_{кр}$  и  $H_{max}(t+1) > H_{кр}$  эквивалентны, поэтому

все связанные с вероятностным прогнозированием максимального стока вопросы в дальнейшем рассматриваются только для расходов воды.

Предложенное определение прогностической вероятности вполне подходит для оборудованных самописцами створов на р. Мзымта. Для них имеются данные о максимальных расходах воды, что позволяет анализировать статистические свойства данных об этих величинах, необходимые для расчета прогностической вероятности  $p_{кр}(t+1)$ .

Для остальных шести необорудованных самописцами речных створов имеются только данные о среднесуточных расходах и уровнях воды. Основная формула (3.3) позволяет получать прогноз  $\tilde{Q}(t+1)$  ожидаемого среднесуточного расхода, а формула (3.7) - прогноз  $\tilde{H}(t+1)$  среднесуточного уровня воды. Прогноз максимального расхода воды определяется формулой (3.8), как  $\tilde{Q}_{max}(t+1) = \bar{k} \tilde{Q}(t+1)$ , где  $\bar{k}$  определенный для каждого месяца расчетный переходный коэффициент, полученный по многолетним данным о соотношении между месячными максимумами и соответствующими им среднесуточными расходами воды. Расчет прогностической вероятности для этих створов может опираться только на результаты статистического анализа данных о среднесуточных расходах воды. В связи с этим в формуле (4.1) предлагается заменить максимальный расход  $Q_{max}(t+1)$  среднесуточным расходом  $Q(t+1)$ , и вместо критического значения расхода воды  $Q_{кр}$  использовать величину  $Q_{кр}/\bar{k}$ , которая в среднем для каждого месяца соответствует критическому значению среднесуточного расхода воды. Таким образом, для необорудованных самописцами речных створов прогностическая вероятность определяется равенством:

$$p_{кр}(t+1) = P\{Q(t+1) > \frac{Q_{кр}}{\bar{k}} | I(t)\}. \quad (4.2)$$

Данная формула становится эквивалентной формуле (4.1), если в ней заменить фактический максимальный расход воды  $Q_{max}(t+1)$  его расчетным значением  $\bar{k} \tilde{Q}(t+1)$ .

В Наставлениях по службе прогнозов вероятностную форму выражения гидрологических прогнозов рекомендуется получать на основе статистического анализа ошибок проверочных прогнозов [76]. В последние годы развивается иной подход к получению вероятностных прогнозов характеристик речного стока, основанный на различных вариантах метода динамико-стохастического моделирования процессов формирования речного стока [39, 62, 96, 120, 132, 145]. В практике краткосрочных гидрологических прогнозов для этого используются выходные данные ансамблевого (вероятностного) метеорологического прогноза, которые основаны на возмущении начальных данных [116, 119, 122, 128]. В настоящее время для нашей страны есть разработки ансамблевого прогноза в системе мезомасштабного прогноза погоды COSMO-RU [7]. Этот подход предназначен для ситуаций, когда неопределенность хода метеорологических элементов в течение периода заблаговременности прогноза является главной причиной погрешности методики прогнозирования. Как было показано в главе 3, данное условие не выполняется, поэтому при разработке методики вероятностного прогнозирования стока рек Черноморского побережья Кавказа применяется подход, рекомендуемый в Наставлениях по службе прогнозов.

При разработке методики календарного прогноза максимальных и среднесуточных расходов воды, практически вся располагаемая на дату составления вероятностного прогноза гидрометеорологическая информация  $I(t)$  была использована с максимальной подробностью. Исходя из этого, в предлагаемой методике вероятностного прогнозирования принимается положение о том, что имеющаяся на дату составления вероятностного прогноза  $t$  информация определяется значением прогноза максимального  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  или среднесуточного  $\tilde{Q}(t+1)$  расхода воды на сутки  $t+1$ . Таким образом, для оборудованных самописцами речных створов искомая условная вероятность выражается в виде:

$$p_{кр}(t+1) = P\{Q_{max}(t+1) > Q_{кр} | \tilde{Q}_{max}(t+1)\} = p_{кр}(\tilde{Q}_{max}). \quad (4.3)$$

Для необорудованных самописцами речных створов прогнозируемые на сутки  $t+1$  значения  $\tilde{Q}(t+1)$  и  $\tilde{Q}_{max}(t+1) = \bar{k} \tilde{Q}(t+1)$  в равной степени содержат практически всю располагаемую на дату составления прогноза  $t$  гидрометеорологическую информацию о водности реки и ходе метеорологических элементов. Следовательно, справедливо выражение:

$$p_{кр}(t+1) = P\{Q(t+1) > \frac{Q_{кр}}{k} | \tilde{Q}(t+1)\} = P\{Q(t+1) > \frac{Q_{кр}}{k} | \tilde{Q}_{max}(t+1)\} = p_{кр}(\tilde{Q}_{max}). \quad (4.4)$$

Для расчета прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  по формулам (4.3) или (4.4) необходимо знать условное распределение вероятностей фактической величины  $Q_{max}(t+1)$  или  $Q(t+1)$  при заданном значении ее прогноза  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  или  $\tilde{Q}(t+1)$ . Связь между фактическими расходами воды и их прогнозом весьма тесная и характеризуется множественным коэффициентом корреляции  $R$  зависимости (3.3), который для рассматриваемых створов варьирует в пределах от 0,76 до 0,95 (табл. 3.10). Неоднозначность связи вызвана ошибками прогноза. Эти ошибки обусловлены погрешностью исходных данных наблюдений, неучтенными факторами формирования и пространственно – временной изменчивости речного стока, неполной адекватностью прогностической зависимости и статистической погрешностью оценок ее параметров. При получении искомой прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  можно учитывать абсолютные или относительные ошибки прогноза.

При учете абсолютных или относительных ошибок прогноза максимальных расходов воды в оборудованных самописцами створах формулу (4.3) можно преобразовать к виду:

$$p_{кр}(\tilde{Q}_{max}) = P\{Q_{max}(t+1) - \tilde{Q}_{max}(t+1) > Q_{кр} - \tilde{Q}_{max}(t+1) | \tilde{Q}_{max}(t+1)\} \quad (4.5)$$

или

$$p_{кр}(\tilde{Q}_{max}) = P\left\{\frac{Q_{max}(t+1)}{\tilde{Q}_{max}(t+1)} > \frac{Q_{кр}}{\tilde{Q}_{max}(t+1)} \middle| \tilde{Q}_{max}(t+1)\right\}. \quad (4.6)$$

Для остальных речных створов формулу (4.4) можно преобразовать к виду:

$$p_{кр}(\tilde{Q}_{max}) = P\left\{Q(t+1) - \tilde{Q}(t+1) > \frac{Q_{кр}}{k} - \tilde{Q}(t+1) \middle| \tilde{Q}_{max}(t+1)\right\} \quad (4.7)$$

или

$$P_{кр}(\tilde{Q}_{max}) = P\left\{\frac{Q(t+1)}{\tilde{Q}(t+1)} > \frac{Q_{кр}}{\bar{k}\tilde{Q}(t+1)} \mid \tilde{Q}_{max}(t+1)\right\} \quad (4.8)$$

В связи с этим в следующем подразделе приводятся результаты статистического анализа абсолютных и относительных ошибок прогноза максимальных расходов для обоих оборудованных самописцами створов на р. Мзымта и ошибок прогноза среднесуточных расходов воды для остальных шести речных створов.

#### 4.2 Статистический анализ ошибок прогноза максимальных и среднесуточных расходов воды

При прогнозировании на дату  $t+1$  максимальных расходов воды для обоих створов на р. Мзымта абсолютная ошибка прогноза равна  $Q_{max}(t+1) - \tilde{Q}_{max}(t+1)$ , а для остальных речных створов абсолютная ошибка прогноза среднесуточных расходов воды равна  $Q(t+1) - \tilde{Q}(t+1)$ . В обоих случаях непосредственно применялась формула (3.3), оценка параметров которой производилась методом наименьших квадратов для каждого месяца по данным ежедневных гидрологических и метеорологических наблюдений за базовый период. Использование метода наименьших квадратов обеспечивает отсутствие корреляции между ошибками прогноза  $Q_{max}(t+1) - \tilde{Q}_{max}(t+1)$  или  $Q(t+1) - \tilde{Q}(t+1)$  и его значениями  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  или  $\tilde{Q}(t+1)$  [54, 141]. Однако отсутствие корреляции между величинами не означает полную их независимость [107]. Оказалось, что для всех рассматриваемых речных створов абсолютный размер ошибки прогноза зависит от его величины, и имеет место статистически достоверная корреляция между модулем абсолютной ошибки и прогнозируемым значением расхода воды. В частности, для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна такой коэффициент корреляции равен 0,43 для марта и 0,60 для октября. Полученный результат имеет достаточно простое объяснение: чем выше прогнозируемая

величина, тем, как правило, больше ошибки ее прогноза [15, 90, 145]. Это наглядно демонстрирует рис. 4.1, на котором показано соотношение между фактическими и прогнозируемыми значениями максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна.

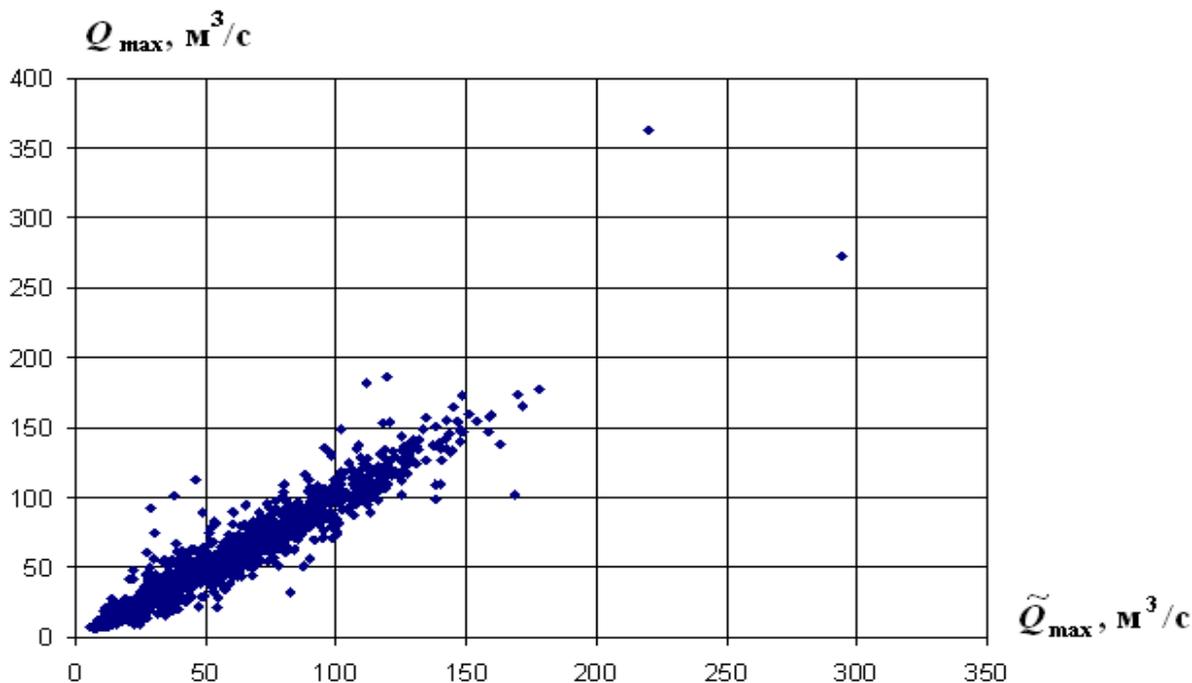


Рисунок 4.1. Соотношение между фактическими  $Q_{max}$  и прогнозируемыми  $\tilde{Q}_{max}$  значениями максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна.

Отмеченное обстоятельство свидетельствует о достаточно сложном характере связи между абсолютными ошибками прогноза и его значениями. Это вынуждает отказаться от использования формул (4.5) и (4.7) и перейти к анализу относительных ошибок прогноза и, в частности, случайной величины  $\varepsilon(t+1) = Q_{max}(t+1) / \tilde{Q}_{max}(t+1)$  для двух створов на р. Мзымта или  $\varepsilon(t+1) = Q(t+1) / \tilde{Q}(t+1)$  для остальных речных створов. Величина  $\varepsilon(t+1) - 1$  определяет относительную ошибку прогноза. Статистический анализ подтвердил отсутствие статистической связи между этой ошибкой и величиной самого прогноза  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ . Для всех восьми створов рассчитанный для каждого

месяца и всего года в целом коэффициент корреляции между модулем относительной ошибки прогноза  $|\varepsilon(t+1)-1|$  и его величиной  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  не имеет статистически достоверного отличия от нуля. В частности, для р. Мзымта – п. Красная Поляна он равен - 0,12 для марта и 0,03 для октября. Однако распределение вероятностей относительных ошибок прогноза существенно отличается от нормального и имеет большие значения отношения  $C_s/C_v$  коэффициентов асимметрии и вариации и большой коэффициент  $E_x$  эксцесса. В частности, для р. Мзымта – п. Красная Поляна  $C_s/C_v = 3,3$  и  $E_x = 4$  для марта,  $C_s/C_v = 3,4$  и  $E_x = 4,5$  для октября. Данное обстоятельство требует использование достаточно сложного теоретического распределения вероятностей, что усложнило бы схему получения вероятностного прогноза.

В связи с этим пришлось перейти к натуральному логарифму величины  $\varepsilon(t+1)$ . Для оборудованных самописцами створов на р. Мзымта он равен ошибке прогноза логарифмов максимальных расходов воды:

$$\ln[\varepsilon(t+1)] = \ln[Q_{max}(t+1)] - \ln[\tilde{Q}_{max}(t+1)]. \quad (4.9)$$

Для остальных шести створов, не оборудованных самописцами, он равен ошибке прогноза логарифмов среднесуточных расходов воды:

$$\ln[\varepsilon(t+1)] = \ln[Q(t+1)] - \ln[\tilde{Q}(t+1)]. \quad (4.10)$$

Выполненный для всех рассматриваемых в настоящем отчете речных створов статистический анализ случайных колебаний величины  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  позволил сделать следующие выводы [13, 98].

1. Величина  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  практически не зависит от прогнозируемого расхода и его логарифма  $\ln[\tilde{Q}_{max}(t+1)]$  или  $\ln[\tilde{Q}(t+1)]$ . Это наглядно демонстрирует рис. 4.2, на котором показано соотношение между ошибками прогноза логарифмов максимальных расходов воды и значениями этого прогноза в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна.

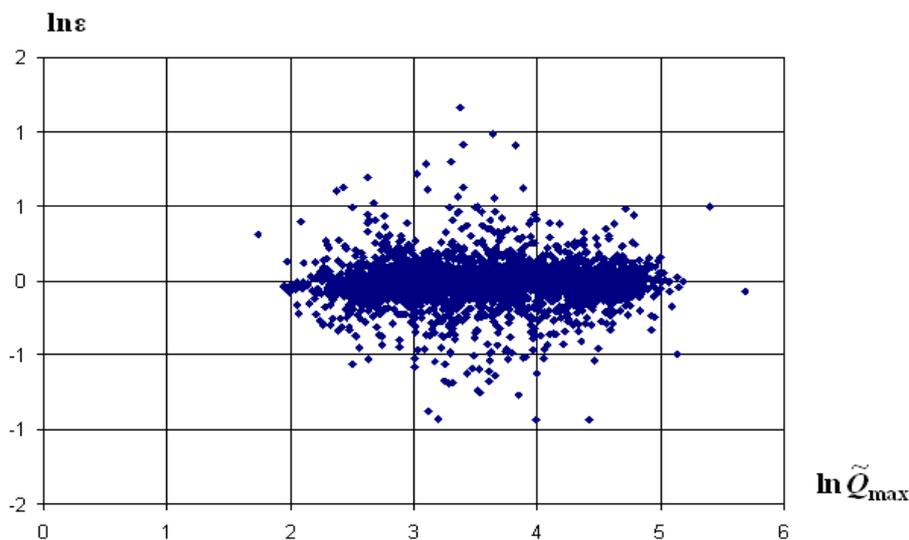


Рисунок 4.2. Соотношение между ошибками прогноза логарифмов максимальных расходов воды  $\ln \varepsilon$  и значениями этого прогноза  $\ln \tilde{Q}_{max}$  в створе р. Мзымга – п. Красная Поляна.

Статистически достоверная корреляция между величинами  $|\ln[\varepsilon(t+1)]|$  и  $\ln[\tilde{Q}_{max}(t+1)]$  или  $\ln[\tilde{Q}(t+1)]$  также отсутствует. В частности, для створа р. Мзымга – п. Красная Поляна такой коэффициент корреляции равен  $-0,01$ . Полученный результат свидетельствует об отсутствии зависимости между относительными ошибками прогноза максимальных расходов воды и значениями этого прогноза, и, как следствие, между логарифмами этих величин [14, 90]. Отмеченное обстоятельство свидетельствует о достаточно простом характере связи между ошибками прогноза логарифма максимального или среднесуточного расхода воды и его значениями.

2. При изменении даты прогноза  $t+1$  в течение всего года случайный процесс  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  является нестационарным. В предыдущей главе был отмечен, а в Приложении продемонстрирован внутригодовой ход погрешности прогноза среднесуточных и максимальных расходов воды. Он хорошо согласуется с водным режимом каждой реки. Минимальные погрешности прогноза приходятся на меженный период, а максимальные – на период максимальной паводковой активности. Нестационарность колебаний ошибок прогноза

расходов воды порождает нестационарность колебаний ошибок прогноза их логарифмов.

В рамках каждого отдельного месяца процесс случайных колебаний величины  $\ln[\epsilon(t+1)]$  можно считать стационарным. Это обусловлено относительной однородностью условий формирования речного стока и характера его колебаний во времени в пределах такого непродолжительного периода. Следовательно, для каждого месяца могут быть приняты единые оценки математического ожидания  $m_{\ln \epsilon}$  и среднего квадратического отклонения  $\sigma_{\ln \epsilon}$  рассматриваемой величины. Для всех рассматриваемых створов эти значения приведены в Приложении. Для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна они приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Характеристики величины  $\ln[\epsilon(t+1)]$  в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$m_{\ln \epsilon}$	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,03	-0,02	-0,02
$S_{\ln \epsilon}$	0,09	0,09	0,10	0,10	0,08	0,09	0,12	0,18	0,17	0,28	0,22	0,16
$r_1$	0,18	0,08	0,03	0,16	0,00	0,05	0,03	0,01	0,07	0,02	0,37	0,08
$\sigma_{\ln \epsilon}$	0,11	0,11	0,11	0,11	0,09	0,10	0,14	0,20	0,19	0,31	0,25	0,18

3. Для случайного процесса  $\ln[\epsilon(t+1)]$  имеет место автокорреляция. В частности, оценки коэффициента корреляции  $r_1$  между соответствующими смежным суткам значениями  $\ln[\epsilon(t+1)]$  и  $\ln[\epsilon(t+2)]$  в ряде случаев оказались статистически достоверно отличными от нуля. Причиной является то, что, не смотря на паводочный режим всех рассматриваемых рек, в течение года преобладают ситуации плавного изменения их водности. Это порождает достаточно высокую корреляцию между расходами воды, соответствующими близким и, прежде всего, смежным суткам. Отмеченное обстоятельство требует

учета при оценке среднего квадратического отклонения  $\sigma_{\ln \varepsilon}$ , так как его стандартная статистическая оценка  $S_{\ln \varepsilon}$  может оказаться заниженной. Корректировка оценки  $S_{\ln \varepsilon}$  с учетом автокорреляции колебаний величины  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  и, в частности, коэффициента корреляции  $r_1$  между ее смежными значениями выполнялась в соответствии с принятыми в статистике случайных процессов правилами [107]. Как и в формуле (3.10) необходимо учитывать соотношение между числом  $N$  ежедневных гидрологических и метеорологических наблюдений, использованных для оценки параметров формулы получения прогноза (3.3) для каждого месяца, и числом этих параметров  $K = 13$ . С учетом отмеченных обстоятельств, для каждого месяца несмещенная оценка среднего квадратического отклонения  $\sigma_{\ln \varepsilon}$  величины  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  определялась по формуле:

$$\sigma_{\ln \varepsilon} = S_{\ln \varepsilon} \left[ 1 - \frac{1}{N} \left( \frac{1+r_1}{1-r_1} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \left( \frac{N-1}{N-K-1} \right). \quad (4.11)$$

4. Случайные колебания величины  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  в течение каждого месяца достаточно хорошо описываются нормальным распределением вероятностей с соответствующими параметрами  $m_{\ln \varepsilon}$  и  $\sigma_{\ln \varepsilon}$ , а ее нормированное значение, равное

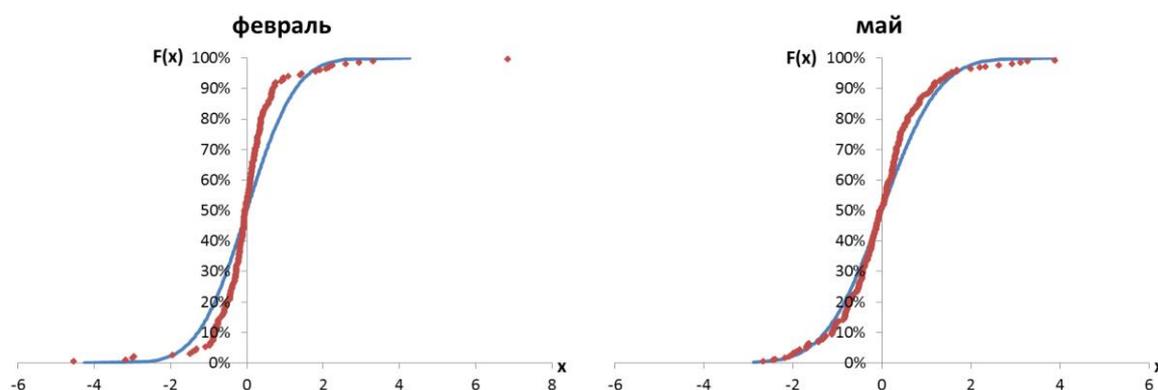
$$x(t+1) = \frac{\ln[\varepsilon(t+1)] - m_{\ln \varepsilon}}{\sigma_{\ln \varepsilon}}, \quad (4.12)$$

подчиняется функции распределения  $F(x)$ , близкой к функции Лапласа нормального распределения вероятностей с нулевым средним и единичной дисперсией:

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{u^2}{2}} du. \quad (4.13)$$

Данное утверждение проверялось с помощью критерия согласия Колмогорова, Крамера – Мизеса – Смирнова и критерия Пирсона [21, 54, 90, 141]. В целях устранения влияния автокорреляции в полученных для каждого

месяца рядах ежедневных нормированных по формуле (4.12) ошибок прогноза логарифмов расходов воды в этих рядах были оставлены лишь члены, удаленные на 2 суток. В результате длина каждого ряда уменьшилась в два раза, зато корреляция между членами такого ряда была устранена. Построенная для каждого месяца эмпирическая функция распределения вероятностей сокращенного ряда сравнивалась с функцией нормального распределения. Для всех восьми створов рассчитанные для каждого месяца показатели используемых критериев согласия оказались меньше предельно допустимых значений. В частности, для р. Мзымта – п. Красная Поляна для разных месяцев показатель критерия согласия Крамера – Мизеса – Смирнова варьируют в пределах от 0,11 до 0,26, и все они меньше предельно допустимых значений при любых разумных значениях уровня значимости этого критерия. Аналогичные результаты дало применение критерия согласия Пирсона. На рис. 4.3 демонстрируется достаточно хорошее совпадение эмпирической функции распределения и теоретической нормальной функций распределения вероятностей нормированных значений  $x(t+1)$  для февраля, мая и ноября в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна.



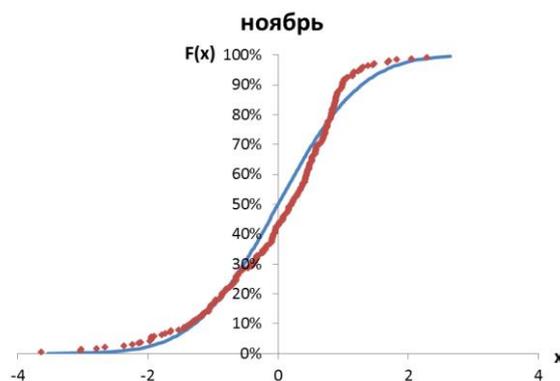


Рисунок. 4.3. Графики эмпирической (красным цветом) и нормальной (синим) функций распределения вероятностей нормированных значений  $x(t+1)$  для февраля, мая и ноября в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна.

Приведенные на рис.4.3 графики показывают, что для более многоводных мая и ноября расхождение эмпирических функций распределения вероятностей с функцией Лапласа не выходит за пределы допустимого статистического минимума. Оно может быть объяснено только статистической погрешностью определения эмпирических функций распределения вероятностей по ряду из  $N = 240$  (ноябрь) –  $248$  (мая) нормированных значений  $x(t+1)$ . Для маловодного февраля расхождение также не выходит за допустимые пределы, устанавливаемые критериями Колмогорова, Крамера – Мизеса – Смирнова и Пирсона. В то же время обращает на себя внимание наличие резко выделяющихся экстремально больших и экстремально малых значений  $x(t+1)$ , подтвержденное соответствующими статистическими критериями [21]. Экстремально большие и малые значения рассматриваемых величин  $x(t+1)$  и  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  соответствуют очень большим положительным или отрицательным относительным ошибкам прогноза. Такие ошибки возникают при прогнозировании максимальных или среднесуточных расходов воды в условиях низкой водности реки, когда значения  $Q_{max}(t+1)$  и  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  или  $Q(t+1)$  и  $\tilde{Q}(t+1)$  очень малы. Для р. Мзымта глубокая зимняя межень как раз и приходится на

февраль [65, 81]. Следовательно, наличие в феврале для р. Мзымта – п. Красная Поляна резко выделяющихся экстремально больших и экстремально малых значений  $x(t+1)$ , искажающих их эмпирическую функцию распределения вероятностей, вполне объяснимо. Аналогичные ситуации встречаются для маловодных месяцев других рассматриваемых рек. Принимая во внимание, что главной задачей настоящей работы является прогнозирование опасно высоких паводков, наличие подобных ситуаций нецелесообразно использовать в качестве причины для отказа от использования нормального распределения вероятностей для описания случайных колебаний величины  $\ln[\varepsilon(t+1)]$ .

#### 4.3 Вероятностное прогнозирование максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки

Введение случайной величины  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  позволяет преобразовать формулы (4.6) и (4.8) к одинаковому виду:

$$p_{кр}(\tilde{Q}_{max}) = P\{\ln[\varepsilon(t+1)] > \ln Q_{кр} - \ln[\tilde{Q}_{max}(t+1)] | \ln[\tilde{Q}_{max}(t+1)]\}. \quad (4.14)$$

При переходе от формулы (4.8) к формуле (4.14) учтено, что для необорудованных самописцами речных створов прогноз  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  максимального расхода определяется прогнозом среднесуточного расхода воды  $\tilde{Q}(t+1)$  и расчетным коэффициентом  $\bar{k}$ , как  $\bar{k} \tilde{Q}(t+1)$ .

Установленная выше независимость величины  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  от прогноза  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  позволяет заменить в формуле (4.14) условную вероятность на безусловную и находить искомую критическую вероятность  $p_{ед}(\tilde{Q}_{max})$  в виде:

$$p_{кр}(\tilde{Q}_{max}) = P\{\ln[\varepsilon(t+1)] > \ln Q_{кр} - \ln[\tilde{Q}_{max}(t+1)]\}. \quad (4.15)$$

Обоснованная выше возможность использования нормального распределения вероятностей для описания случайных колебаний величин  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  позволяет рассчитывать эту прогностическую вероятность с помощью рассмотренной выше функции Лапласа по формуле:

$$P_{кр}(\tilde{Q}_{max}) = 1 - \Phi\left\{\frac{\ln Q_{кр} - \ln[\tilde{Q}_{max}(t+1)] - m_{\ln \varepsilon}}{\sigma_{\ln \varepsilon}}\right\}, \quad (4.16)$$

Для всех восьми рассматриваемых речных створов соответствующие каждому месяцу параметры распределения вероятностей случайной величины  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  - математическое ожидание  $m_{\ln \varepsilon}$  и среднее квадратическое отклонение  $\sigma_{\ln \varepsilon}$  - приведены в Приложении.

Применимость нормального распределения к описанию величины  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  равносильна применимости логарифмически нормального распределения к описанию величины  $\varepsilon(t+1)$  [54]. Это связано с тем, что в различных природных условиях и в разные фазы водного режима логарифмически нормальное распределение вероятностей достаточно хорошо подходит для описания случайных колебаний максимальных и среднесуточных расходов воды и широко используется в гидрологических расчетах во многих странах [141, 143]. В нашей стране для этих целей принято использовать трехпараметрическое гамма - распределение Крицкого – Менкеля [95]. В связи с этим необходимо отметить, что при одинаковых коэффициентах вариации  $C_v$  и близких значениях отношения коэффициентов асимметрии и вариации  $C_s/C_v$  обсуждаемые распределения вероятностей практически совпадают [90]. В качестве иллюстрации в табл. 4.4 приведено сравнение значений различной обеспеченности для обоих распределений.

Таблица 4.4. Координаты кривых обеспеченности логарифмически нормального и трехпараметрическое гамма – распределения вероятностей

Обеспеченность \ Распределение	1%	5%	10%	30%	50%	70%	90%	95%	99%
	$C_v = 1; C_s / C_v = 4.$								
Лог. нормальное	4,90	2,78	2,05	1,09	0,71	0,46	0,24	0,18	0,10
Крицкого - Менкеля	4,91	2,78	2,05	1,10	0,71	0,46	0,24	0,18	0,10
	$C_v = 0,5; C_s / C_v = 3$ (для лог. нормального $C_s / C_v = 3,25$ )								
Лог. нормальное	1,55	1,36	1,26	1,09	0,98	0,88	0,76	0,71	0,62
Крицкого - Менкеля	1,55	1,36	1,26	1,09	0,98	0,88	0,76	0,71	0,62

Определяясь двумя параметрами, логарифмически нормальное распределение является менее гибким, чем трехпараметрическое гамма – распределение. Однако при относительно небольшом объеме данных наблюдений это свойство обеспечивает ему более высокую статистическую устойчивость [106]. Кроме того, использование этого распределения технически намного проще. Отмеченные обстоятельства послужили причиной использования логарифмически нормального распределения вероятностей в настоящей работе.

В качестве примера на рис. 4.4 для трех месяцев - февраля (зимняя межень), мая (снеговое половодье) и ноября (сезон дождевых паводков) приведены графики функции  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$ , определяющей вероятностный прогноз максимальных расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна.

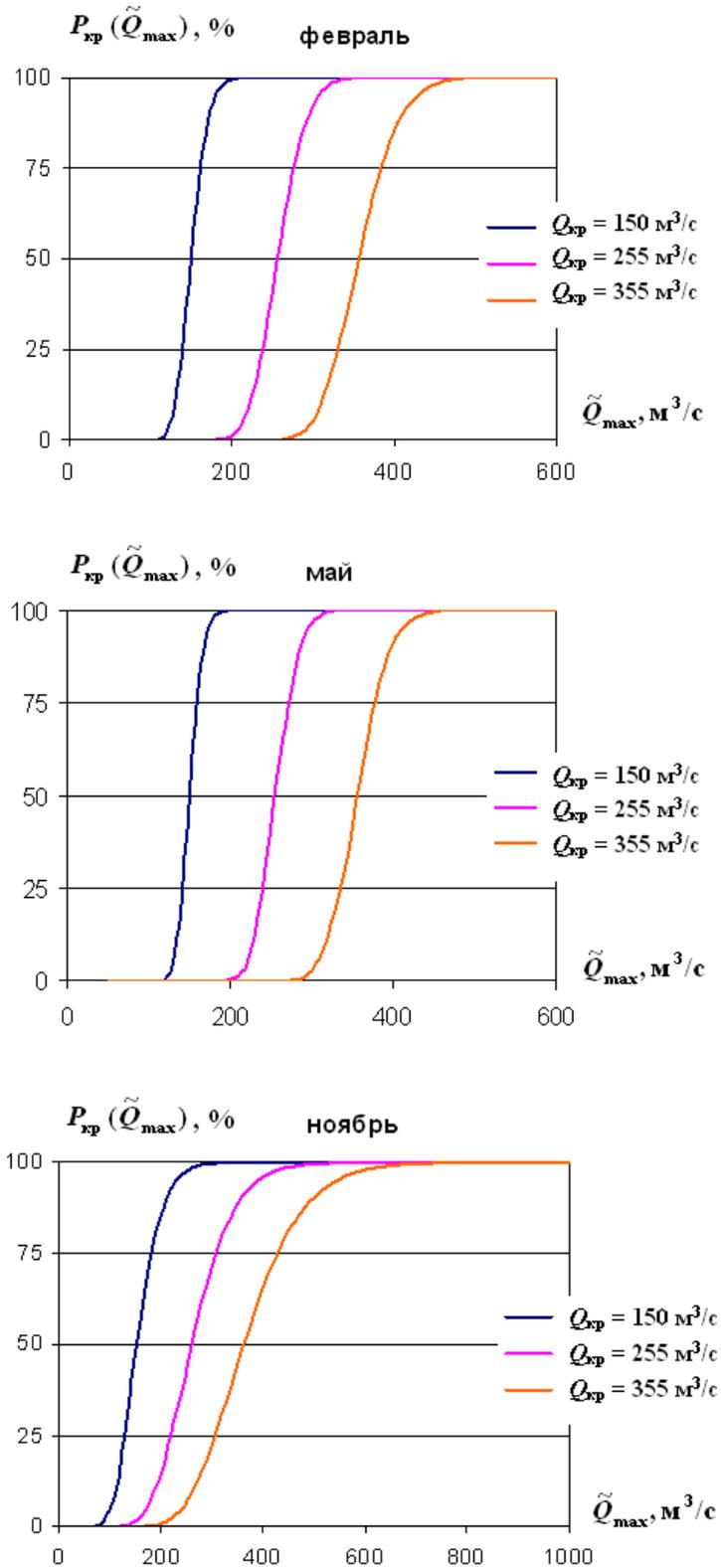


Рисунок 4.4. Графики прогностических вероятностей  $p_{\text{ед}}(\tilde{Q}_{\text{max}})$  для февраля, мая и ноября в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна.

Сравнение приведенных графиков показывает, что при одних и тех же значениях прогноза максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}$  вероятность превышения критических расходов воды  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  максимальна в период прохождения дождевых паводков (ноябрь) и минимальна в период зимней межени (февраль).

Для всех рассматриваемых речных створов аналогичные графики зависимости вероятности превышения критических расходов и уровней воды  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  от прогноза максимального расхода  $\tilde{Q}_{max}(t+1) = \tilde{Q}_{max}$  приведены в Приложении для месяцев, соответствующих характерным фазам водного режима.

#### 4.4 Вероятностное прогнозирование критических осадков с заблаговременностью одни сутки

Ожидаемый на каждой из используемых метеостанций слой осадков  $P(t+1)$  в течение суток  $t+1$  является важнейшим предиктором при получении прогноза максимальных расходов и уровней воды во всех рассматриваемых речных створах. В то же время, как показали результаты выполненной в главе 3 проверки, прогноз этой величины может содержать значительные ошибки. В связи с этим, для системы оповещения об опасных паводках на реках Черноморского побережья Кавказа большой практический интерес представляют осадки, при выпадении которых такие паводки могут формироваться.

Предлагаемая методика позволяет с заблаговременностью одни сутки определять для каждого речного створа критический слой осадков на используемой метеостанции, при котором возникает угроза превышения критических расходов и уровней воды. Методика вероятностного прогнозирования критических осадков основана на следующих положениях.

1. Изложенная выше методика вероятностного прогнозирования максимального стока позволяет находить прогностическую вероятность

$p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  превышения критических расходов и уровней воды в течение суток  $t+1$  в зависимости от уже полученного прогноза  $\tilde{Q}_{max}(t+1) = \tilde{Q}_{max}$  максимального расхода воды. Для всех рассматриваемых речных створов эта прогностическая вероятность определяется формулой (4.16). Эта формула позволяет определить значение прогнозируемого максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max,q}$ , при котором каждое критическое значение  $Q_{кр}$  может быть превышено с заданной вероятностью  $q$ . Для того чтобы определяемая формулой (4.16) прогностическая вероятность  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  была равна заданной обеспеченности  $q$ , необходимо выполнение условия:

$$\frac{\ln Q_{кр} - \ln[\tilde{Q}_{max}(t+1)] - m_{\ln \epsilon}}{\sigma_{\ln \epsilon}} = X_q, \quad (4.17)$$

где  $X_q$  - квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности его превышения  $q$ .

2. Как уже было отмечено в главе 3, для каждой из четырех используемых метеостанций средняя за ожидаемые сутки  $t+1$  температура приземного слоя воздуха  $T(t+1)$  прогнозируется достаточно точно. Таким образом, за исключением ожидаемого слоя осадков  $P(t+1)$ , все остальные предикторы, используемые для прогнозирования максимальных расходов и уровней воды, можно считать известными на дату составления прогноза  $t$ . Для оборудованных самописцами створов на р. Мзымта прогноз максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  определяется формулой (3.3), которую можно представить в виде:

$$\tilde{Q}_{max}(t+1) = A(t+1)P(t+1) + B(t+1), \quad (4.18)$$

где известные к моменту составления прогноза значения  $A(t+1)$  и  $B(t+1)$  равны

$$A(t+1) = a_5[T(t+1) - T_{minP}]^2 + a_6[T(t+1) - T_{minP}] + a_7, \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned}
B(t+1) = & a_0 + a_1 Q_{max}(t) + a_2 Q_{max}(t-1) + a_3 [T(t+1) - T_{min,S}]^2 + a_4 [T(t+1) - T_{min,S}] + \\
& + a_8 [T(t) - T_{min,S}]^2 + a_9 [T(t) - T_{min,S}] + a_{10} P(t) [T(t) - T_{min,P}]^2 + a_{11} P(t) [T(t) - T_{min,P}] + \\
& + a_{12} P(t)
\end{aligned} \tag{4.20}$$

В соответствии с рекомендациями главы 3 при использовании формул (4.19) и (4.20) необходимо учитывать критические значения приземной температуры воздуха на метеостанции:

если значения  $T(t+1)$  или  $T(t)$  превышают верхний предел учитываемой температуры  $T_{max}$ , то их надо заменить числом  $T_{max}$ ;

если эти значения оказываются меньше определяющей возможность снеготаяния температуры  $T_{min,S}$ , то их надо заменить числом  $T_{min,S}$ ;

если значения  $T(t+1)$  или  $T(t)$  оказываются меньше определяющей возможность выпадения жидких осадков температуры  $T_{min,P}$ , то значения  $P(t+1)$  или  $P(t)$  следует заменять нулем.

3. Для остальных шести необорудованных самописцами речных створов непосредственно формулой (3.3) определяется прогноз среднесуточного расхода воды. В данном случае формулу (3.3) также можно представить в виде (4.18) с известными к моменту составления прогноза значениями  $A(t+1)$  и  $B(t+1)$ , которые определяются равенствами (4.19) и (4.20) с заменой максимальных расходов  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ ,  $Q_{max}(t)$  и  $Q_{max}(t-1)$  среднесуточными расходами  $\tilde{Q}(t+1)$ ,  $Q(t)$  и  $Q(t-1)$  соответственно. Прогноз максимального расхода воды для этих створов определяется формулой (3.6), которую с учетом выражения (4.18) можно представить в виде:

$$\tilde{Q}_{max}(t+1) = \bar{k}A(t+1) P(t+1) + \bar{k}B(t+1), \tag{4.21}$$

где  $\bar{k}$  - среднее для соответствующего суткам  $t+1$  месяца расчетное значение переходного коэффициента от среднесуточных расходов к максимальным расходам.

Критические значения приземной температуры воздуха, а также параметры формул (4.19), (4.20) и (4.21) для каждого месяца приведены в Приложении.

С учетом формул (4.17) и (4.18) ожидаемый в течение суток  $t+1$  на метеостанции Красная Поляна критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$ , при котором в каждом из двух створов на р. Мзымта превышение критических расходов и уровней воды может произойти с заданной вероятностью  $q$ , определяется формулой:

$$\tilde{P}_{кр}(q) = \frac{Q_{кр} \exp(-m_{\ln \varepsilon} - X_q \sigma_{\ln \varepsilon}) - B(t+1)}{A(t+1)}. \quad (4.22)$$

Для остальных шести необорудованных самописцами речных створов учет формул (4.17) и (4.21) ожидаемый в течение суток  $t+1$  на соответствующих метеостанциях критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  можно определить формулой:

$$\tilde{P}_{кр}(q) = \frac{Q_{кр} \exp(-m_{\ln \varepsilon} - X_q \sigma_{\ln \varepsilon}) - \bar{k}B(t+1)}{\bar{k}A(t+1)}. \quad (4.23)$$

При прогнозировании максимальных расходов и уровней воды в восьми рассматриваемых речных створах используются данные метеорологических наблюдений на четырех метеостанциях. Данные этих метеостанций могут использоваться для получения прогнозов речного стока в нескольких створах. Например, данные метеостанции в г. Сочи используется при прогнозировании расходов и уровней воды в четырех створах на реках Сочи, Западный Дагомыс и Куапсе. В то же время, за исключением величины  $X_q$  все параметры формул (4.19) - (4.23) имеют разные значения для каждого речного створа. Следовательно, в зависимости от рассматриваемого речного створа для одной и той же метеостанции могут быть получены разные значения критического слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  в течение одних и тех же суток  $t+1$ .

Определяемый формулами (4.22) или (4.23) критический слой суточных осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  зависит от известных на дату составления прогноза  $t$  величин

$A(t+1)$  и  $B(t+1)$ . Эти величины характеризуют гидрометеорологические условия формирования расхода воды в замыкающем створе на дату  $t+1$  за исключением ожидаемого на метеостанции слоя осадков  $P(t+1)$ . Как следует из этих формул, чем больше значения  $A(t+1)$  и  $B(t+1)$ , тем меньше слой осадков  $P(t+1)$ , необходимый для превышения критического расхода воды  $Q_{кр}$  с заданной вероятностью  $q$ . Приведенные в последующих таблицах данные показывают, что в месяцы с повышенной увлажненностью водосбора критический слой суточных осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  меньше, чем в более сухие и маловодные месяцы.

В отдельные месяцы осадки, выпадающие в жидком виде, малы и их роль незначительна. Благодаря корреляции между слагаемыми формулы (3.3) и специфике получения оценок ее параметров величина  $A(t+1)$  может незначительно отличаться от нуля. Если из-за случайных ошибок оценки параметров формул (3.3) и (4.19) величина  $A(t+1)$  оказалась меньше или равна нулю, то формулами (4.22) и (4.23) пользоваться нельзя. В таких условиях предлагаемая методика не позволяет определять критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$ , отвечающий обеспеченности  $q$ , так как осадки не играют главной роли в формировании максимального расхода воды в замыкающем створе.

Как следует из формулы (4.20) при высокой водности реки, большом слое уже выпавших осадков  $P(t)$  или высоких температурах воздуха  $T(t+1)$  или  $T(t)$  соответствующая ожидаемым суткам величина  $B(t+1)$  может оказаться настолько большой, что определяемый формулами (4.22) или (4.23), критический слой ожидаемых осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  станет отрицательным. В таких условиях отрицательное значение  $\tilde{P}_{кр}(q)$  следует заменять нулем, интерпретируя сложившуюся ситуацию, как возможность превышения критического расхода воды  $Q_{кр}$  с большей вероятностью, чем заданная  $q$ .

Чем выше заданная обеспеченность  $q$ , тем выше критический слой суточных осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$ . При  $q = 50\%$  квантиль  $X_q$  равен нулю. Для всех

речных створов и для всех месяцев математическое ожидание  $m_{\ln \varepsilon}$  ошибки прогноза логарифма максимальных или среднесуточных расходов воды  $\ln[\varepsilon(t+1)]$  практически равно нулю, и в формуле (4.23) им можно пренебречь. В этом случае формулы (4.22) и (4.23) фактически определяют календарный прогноз критического слоя осадков на метеостанции, при котором прогнозируемый на сутки  $t+1$  максимальный расход  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  будет равен критическому значению  $Q_{кр}$ .

В качестве примера в табл. 4.5 для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна приведены значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(50\%)$  на метеостанции п. Красная Поляна, соответствующие обеспеченности  $q=50\%$ . Расчет этих значений по формуле (4.23) выполнен при средних значениях остальных предикторов для февраля (зимняя межень), мая (половодье) и ноября (сезон дождевых паводков). Там же помещены наблюдавшиеся за весь период метеорологических наблюдений максимумы суточного слоя осадков  $P_{max}$  для каждого месяца.

Таблица 4.5. Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм) на метеостанции п. Красная Поляна обеспеченностью 50% для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна

Месяц	$Q_{кр}=150 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр}=255 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр}=355 \text{ м}^3/\text{с}$	$P_{max}$ мм
февраль	531	946	1341	69
май	86	226	360	127
ноябрь	169	316	456	86

Приведенные в таблице данные показывают, что в условиях зимней межени (февраль) критические значения расхода воды практически недостижимы, поэтому критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(50\%)$  многократно больше наблюдавшегося максимума. В период тало-дождевого половодья (май) наименьший из критических расходов воды  $Q_{кр}=150 \text{ м}^3/\text{с}$  в среднем достигается

при суточном слое осадков  $\tilde{P}_{кр}(50\%) = 86$  мм, который меньше наблюдавшегося максимума. В табл. 4.6 для тех же месяцев приведены средние значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$  обеспеченностью 5%.

Таблица 4.6. Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм) на метеостанции п. Красная Поляна обеспеченностью 5% для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна

Месяц	$Q_{кр} = 150 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 255 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 355 \text{ м}^3/\text{с}$	$P_{max}$ мм
февраль	434	781	1112	69
май	59	180	296	127
ноябрь	98	196	289	86

Сравнение с табл. 4.5 демонстрирует более низкие значения критического слоя суточных осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$ . В период тало-дождевого половодья (май) и в период прохождения дождевых паводков (ноябрь) с вероятностью 5% некоторые критические значения расходов воды  $Q_{кр}$  могут быть превышены при не слишком большом суточном слое осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$ .

Для необорудованных самописцами речных створов определяемый формулой (4.23) критический слой суточных осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  на соответствующей метеостанции сильно зависит от расчетного переходного коэффициента  $\bar{k}$ . Для каждого месяца он равен среднему отношению месячных максимумов к соответствующим среднесуточным расходам воды. В некоторых створах этот коэффициент достигает значения 4,68 (р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс, август). Столь высокое отношение максимальных расходов воды к среднесуточным возможно при быстром формировании паводков за счет кратковременных, но очень интенсивных дождей и высокой увлажненности водосборов [16, 94, 112, 124]. В таких условиях даже относительно небольшой суточный слой осадков может привести к превышению критического значения расхода воды  $Q_{кр}$ . Следовательно, при высоких значениях расчетного

переходного коэффициента  $\bar{k}$  критический слой суточных осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  может быть относительно небольшим. Это наглядно демонстрируют данные табл. 4.7, в которой для створа р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс приведены значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$  на метеостанции г. Сочи в феврале и ноябре при среднемесячных значениях величин  $A(t+1)$  и  $B(t+1)$ . Там же помещены наблюдавшиеся максимумы суточного слоя осадков  $P_{max}$  и значения расчетного переходного коэффициента  $\bar{k}$ .

Таблица 4.7. Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм) на метеостанции г. Сочи обеспеченностью 5% для створа р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс

месяц	$Q_{кр} = 110 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 145 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 220 \text{ м}^3/\text{с}$	$P_{max}$ мм	$\bar{k}$
февраль	63	85	133	51	2,17
ноябрь	7	10	17	97	3,83

Приведенные данные показывают, что в ноябре, период прохождения дождевых паводков, расчетный переходный коэффициент  $\bar{k}$  очень велик, а среднемесячное значение критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$  намного меньше наблюдавшегося максимума суточного слоя осадков  $P_{max}$ .

Реализация предлагаемой схемы вероятностного прогнозирования критических осадков с заблаговременностью одни сутки для рассматриваемых речных створов Черноморского побережья Кавказа дана в Приложении.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Паводки на реках Черноморского побережья Кавказа, вызванные дождевыми осадками и быстрым таянием снега в горах, могут наблюдаться до 25 раз в течение года и приводить к резкому увеличению уровней воды и скоростей течения, создающих угрозу населению и хозяйственным объектам данного региона. Оценка климатических изменений водного режима исследуемых рек позволяет предположить возможность увеличения частоты опасных наводнений в ближайшие годы.

2. Малые размеры исследуемых водосборов и большие уклоны способствуют быстрому формированию паводков в течение нескольких часов. В сочетании с отсутствием снегомерных съемок и ограниченными возможностями прогнозирования хода метеорологических элементов на Черноморском побережье Кавказа это приводит к тому, что заблаговременность прогноза паводков не превышает одни сутки.

3. Специфика формирования стока рек данного региона и уровень его гидрометеорологической изученности в наибольшей степени отражены в используемой региональной модели формирования талого и дождевого стока. Модель учитывает опыт моделирования стока горных рек, наличие одного гидрометрического створа и одной метеорологической станции в нижней части каждого водосбора и эффект пространственного осреднения характеристик формирования речного стока по его территории.

4. Созданная на основе ежедневных наблюдений на гидрометрических постах и метеорологических станциях с начала 80-х годов база гидрометеорологической информации может быть использована в оперативной практике Гидрометеорологической службы России и для решения других задач, связанных с научным обоснованием мероприятий по использованию и охране водных ресурсов Черноморского побережья Кавказа и защите населения от опасных паводков.

5. Для учета предшествующего увлажнения водосбора и запасов воды в русловой сети достаточно использовать расход воды в замыкающем створе за предшествующие сутки, а за дату составления прогноза - расход воды, суточный слой осадков и среднесуточную температуру приземного слоя воздуха на метеостанции. Прогноз этих метеорологических элементов на сутки вперед целесообразно получать, как средневзвешенное значение их прогнозов по усваиваемым в оперативном режиме моделям «РЕГИОН», UKMO, NCEP и COSMO-RU07.

6. Перебор соответствующих используемой модели различных прогностических формул от указанных выше предикторов позволил остановиться на общей для всего региона схеме получения прогноза расходов воды с заблаговременностью одни сутки. В целях учета изменения состояния снежного, почвенного и растительного покрова в течение года параметры прогностической формулы оцениваются для каждого месяца в отдельности.

7. Учет соотношения между помещенными в гидрологические ежегодники срочными максимумами расходов воды и их среднесуточными значениями позволяет получить схему прогнозирования с заблаговременностью одни сутки максимальных расходов и уровней воды для створов, не оборудованных самописцами.

8. Выполненная на независимом материале проверка предлагаемой методики прогнозирования расходов и уровней воды показала, что она имеет вполне удовлетворительную точность и эффективность. Качество метеорологических прогнозов можно признать достаточно высоким, так как их ошибки, как правило, не приводят к существенному ухудшению точности прогнозов речного стока.

9. Предлагаемая методика получения прогноза речного стока в вероятностной форме позволяет в зависимости от располагаемой на дату его составления гидрометеорологической информации оценивать риск превышения критических значений уровней и расходов воды, соответствующих различной степени опасности для каждого речного створа. Одновременно данная

методика позволяет рассчитывать суточный слой осадков на метеостанции, при выпадении которых в течение ожидаемых суток критические значения расходов и уровней воды могут быть превышены с заданной вероятностью.

10. Предлагаемая система методик календарного и вероятностного прогнозирования паводкового стока успешно прошла проверку в оперативном режиме и применяется в рамках автоматизированной системы предупреждения об опасных наводнениях на реках Черноморского побережья Кавказа.

11. Планируется уточнить параметры прогностических формул с учетом гидрометеорологической информации, накопленной с момента их использования в оперативной практике и разработать аналогичную схему прогнозирования паводков на реках бассейна Кубани.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абальян Т.С. Распределение стока в горном бассейне (на примере опытного бассейна р. Варзоб) // Труды Гидрометцентра СССР. – 1971. – Вып. 72. – С. 75–91.
2. Абальян Т.С. О расчете гидрографа стока горной реки // Труды Гидрометцентра СССР. – 1976. – Вып. 163. – С. 3–18.
3. Алексеева А.А. Подходы к решению проблемы прогнозирования сильных летних осадков // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 351. – С. 64–84.
4. Алексеевский Н.И., Магрицкий Д.В., Ретеюм К.Ф., Юмина Н.М. Научное обоснование структуры и содержания базы данных для изучения процессов затопления освоенной местности // Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз: материалы всероссийской научной конференции, г. Краснодар, 7-13 октября 2013 г. – Новочеркасск: ЛИК, 2013. – С. 17–22.
5. Алексеевский Н.И., Эдельштейн К.К. Гидроэкологические проблемы в бассейне р. Мзымта и некоторые варианты их решения // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2007. – № 6. – С. 15–35.
6. Алибегова Ж.Д., Элизбарашвили Э.Ш. Статистическая структура атмосферных осадков в горных районах (на примере Закавказья). – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 136 с.
7. Алферов Д.Ю., Ривин Г.С. Система мезомасштабного прогноза погоды COSMO-RU: ансамблевый прогноз // Труды Гидрометцентра России. – 2011. – Вып. 346. – С. 5–6.
8. Арефьева О.Н., Полуниин А.Я. Алгоритм идентификации параметров распределения осадков и температуры воздуха в горном водосборе // Труды Гидрометцентра СССР. – 1989. – Вып. 309. – С. 57–67.

9. Астафьева Е.С., Белякова П.А., Головки Т.Л., Головки С.М., Жмыхова Т.В., Загреддинова Д.Р., Иванов А.В., Малыгин Е.В., Никогосян К.С., Радостева А.В., Страхова А.В., Фингерт Е.А. Гидрологические аспекты подготовки г. Сочи к XXII Олимпийским играм 2014 г. // Материалы Международного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2010» / Отв. ред. И.А. Алешковский, П.Н. Костылев, А.И. Андреев, А.В. Андриянов. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2010.
10. Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д. Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеиздат, 1974. – 419 с.
11. Базелюк А.А. Опасные гидрометеорологические явления на юге европейской территории России // Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей. – М.: Изд-во Триумф, 2012. – С. 33–42.
12. Барри, Р. Г. Погода и климат в горах. – Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 312 с.
13. Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Вероятностное прогнозирование максимальных расходов и уровней воды и критических осадков на реках Черноморского побережья Кавказа // Тр. Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 349. – С. 104–121.
14. Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Краткосрочное прогнозирование стока рек Черноморского побережья Кавказа // Тр. Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 349. – С. 122–141.
15. Белякова П.А., Борщ С.В., Христофоров А.В., Юмина Н.М. Прогноз максимального стока рек Черноморского побережья Кавказа // Водное хозяйство России. – 2013. – №6. – С. 4–16.
16. Бефани А.Н. Основы теории ливневого стока // Труды ОГМИ. – 1958. – Вып. 14. Ч.2. – 310 с.
17. Бефани Н.Ф., Калинин Г.П. Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам : учеб. пособие для вузов. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 390 с.

18. Битюков Н.А., Пестерева Н.М., Ткаченко Ю.Ю. Анализ режима увлажнения за многолетний период в бассейне реки Мзымты // Вестник СГУТиКД. – 2011. – №3 (17). – С. 244–255.
19. Битюков Н.А. Экология горных лесов Причерноморья. – Сочи: СИМБиП, ФГУ «НИИгорлесэкол», 2007. – 292 с.
20. Болтабаев В.Г., Овчинников А.М. Краткосрочные прогнозы стока горных рек методом множественной регрессии // Труды САНИГМИ. – 1970. – Вып. 52 (67). – С. 90–98.
21. Большев Н.Л., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 416 с.
22. Боровикова Л.Н., Денисов Ю.М. Модель поступления воды на поверхность горного бассейна и некоторые результаты ее проверки на бассейнах рек Западного Тянь-Шаня // Труды САНИГМИ. – 1970. – Вып. 52 (67). – С. 3–20.
23. Боровикова Л.Н., Денисов Ю.М., Трофимова Е.Б., Шенцис И.Д. Математическое моделирование процесса стока горных рек // Труды СарНИГМИ. – 1972. – Вып. 61 (76). – 152 с.
24. Борщ С.В., Симонов Ю.А. Оперативная система краткосрочных гидрологических прогнозов расхода воды на реках бассейна Кубани // Труды Гидрометцентра. – 2013. – Вып. 349. – С. 63–87.
25. Борщ С.В., Леонтьева Е.А., Симонов Ю.А. Представление выходной продукции оперативных гидрологических прогнозов в ГИС // Труды Гидрометцентра. – 2014. – Вып. 351. – С. 141–153.
26. Бураков Д.А., Каропова Е.Д., Шайдуров В.В. Математическое моделирование стока: теоретические основы, современное состояние, перспективы // Вестник КрасГУ. – 2006. – № 4. – С. 3–19.
27. Важнов А.Н. Анализ и прогнозы стока рек Кавказа. – М.: Гидрометеиздат, 1966. – 273 с.

28. Варшанина Т.П., Митусов Д.В., Плисенко О.А., Стародуб И.В. Нейросетевая модель прогноза паводков на малых реках Адыгеи // Известия РАН. Сер. Географическая. – 2007. – № 6. – С. 87–93.

29. Великанова Л. Оперативное прогнозирование катастрофических паводков на горных реках с применением нейросетевых технологий и прогноза метеослужбы // ГОРНЫЕ УГРОЗЫ 2013: природные катастрофы, изменение климата и вода в горных районах : материалы международной конференции. Киргизия, Бишкек, 16-18 сентября, 2013 г. С. 158–159.

30. Вивчар А.Н. Снежный покров и положение орографической снеговой линии в долине реки Мзымта (Западный Кавказ) в условиях современных климатических изменений // Криосфера Земли. – 2010. – Т. XIV. № 4. – С. 80–88.

31. Виноградов Ю.Б., Геселева Л.А., Каримова Т.И., Соколова Н.В. Модель годового гидрографа горной реки и результаты ее реализации на примере бассейна р. Варзоб // Труды ГГИ. – 1991. – Вып. 343. – С. 11–43.

32. Виноградов Ю.Б. Вопросы гидрологии дождевых паводков на малых водосборах Средней Азии и Южного Казахстана // Труды КазНИГМИ. – 1967. – Вып. 28. – 262 с.

33. Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 312 с.

34. Владимиров Л.А., Гигинейшвили Т.Н., Джавахашвили А.М., Закарашвили Н.Н. Водный баланс Кавказа и его географические закономерности. – Тбилиси: Мецниереба, 1991. – 142 с.

35. Гармаев Е.Ж., Христофоров А.В. Водные ресурсы рек бассейна озера Байкал: основы их использования и охраны. – Новосибирск: Изд-во "ГЕО", 2010. – 227 с.

36. Гарцман Г.И. Дождевые наводнения на реках юга Дальнего Востока: методы расчетов, прогнозов, оценок риска. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – 222 с.

37. Гвоздецкий Н.А. Кавказ. – М.: Географгиз, 1963. – 262 с.

38. Гидрология реки Бзыбь (Инженерно-геологическое описание, сток воды и наносов) / Под ред. проф. Г.Г. Сванидзе. – Тбилиси: Изд-во Тбилисского ун-та, 1981. – 144 с.
39. Гельфан А.Н. Динамико-стохастическое моделирование формирования талого стока. – М.: Наука, 2007. – 276 с.
40. Геткер М.И. О некоторых закономерностях зонального распределения осадков и размещении сети осадкомеров для гидрологических целей // Труды САНИИРИ. – 1966. – Вып. 3. – С 94–106.
41. Голубцов В.В. Моделирование стока горных рек в условиях ограниченной информации. – Алматы: Казгидромет, 2010. – 232 с.
42. Демиденко Б.З. Линейная и нелинейная регрессия. – М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.
43. Денисов Ю.М. Схема расчета гидрографа стока горных рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 103 с.
44. Денисов Ю.М. Статистические методы прогноза стока горных рек // Труды САРНИГМИ. – 1977. – Вып. 51 (132). – 86 с.
45. Документация гидродинамической модели атмосферы COSMO [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>
46. Закономерности гидрологических процессов / Под ред. Н.И. Алексеевского. – М.: Изд-во «ГЕОС», 2012. – 733 с.
47. Залиханов М.Н. Интенсивность, дружность и температурный коэффициент снеготаяния на Большом Кавказе // Труды ВГИ. – 1974. – Вып. 27. – С. 111–120.
48. Иванченко Т.Е., Панов В.Д. Распределение атмосферных осадков на Большом Кавказе // Сб. работ Ростовской ГМО. – 1980. – Вып. 18. – С. 125–133.
49. Исследования возможного негативного воздействия водно-селевых потоков на Олимпийские объекты («Сочи 2014»): отчет о НИР / Росгидромет. Высокогорный геофизический институт; рук. Анахаев К.Н.; исполн.: Гегиев К.А. [и др.]. – Нальчик, 2010. – 212 с.

50. Исследование влияния Олимпийских игр (Olympic games impact – OGI). Данные за 2005–2009 гг. [Электронный ресурс]: Отчет № 1 о влиянии игр / МГУ им. М.В. Ломоносова. М., 2010. – Режим доступа: [http://www.sc-os.ru/common/upload/ogi\\_report\\_1.pdf](http://www.sc-os.ru/common/upload/ogi_report_1.pdf)

51. Киреева М.Б., Рец Е.П. Исследование водного режима приустьевой области реки Мзымта с целью обеспечения гидрологической безопасности проектируемых объектов Олимпийских Игр 2014 года // Водные ресурсы, экология и гидрологическая безопасность: сб. тр. Четвертой междунаучной конф. молодых ученых и талантливых студентов ИВП РАН; 6-8 декабря 2010 г. – М.: ИВП РАН, 2010. – С. 37–40.

52. Комаров В.Д., Мухин В.М., Полуниин А.Я. Модель формирования снежного покрова и поступления воды на поверхность горного бассейна // Труды Гидрометцентра СССР. – 1976. – Вып. 163. – С. 38–57.

53. Корень В.И. Математические модели в прогнозах речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 200 с.

54. Коровин В.И., Галкин Г.А. Генетическая структура наводнений и паводков на реках северо-западного Кавказа за 275-летний период // Изв. АН СССР. Сер. Географическая. – 1979. – № 3. – С. 90–94.

55. Королюк В.С., Порченко Н.И., Скороход А.В., Турбин А.Ф. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. – М.: Наука, 1985. – 640 с.

56. Кузин Л.С., Бабкин В.И. Географические закономерности гидрологического режима рек. – Л.: Гидрометеиздат, 1979. – 200 с.

57. Кузьмин В.А. Основные принципы автоматической калибровки многопараметрических моделей, используемых в оперативных системах прогнозирования дождевых паводков // Метеорология и гидрология. – 2009. – № 6. – С. 74–85.

58. Кузьмин В.А., Коротыгина У.Е., Гаврилов И.С., Сурков А.Г., Сергеенко С.Ю. О возможности повышения заблаговременности прогнозов стока средних рек путем стыковки гидродинамических моделей погоды и

гидрологических моделей // Ученые записки РГГМУ. – 2010. – № 16. – С. 22–27.

59. Кузьмин П.П. Процесс таяния снежного покрова. – Л.: Гидрометеиздат, 1961. – 345 с.

60. Кучмент Л.С., Демидов В.Н., Мотовилов Ю.Г. Формирование речного стока. – Л.: Гидрометеиздат, 1983. – 216 с.

61. Кучмент Л.С., Гельфан А.Н., Демидов В.Н. Пространственная модель формирования тало-дождевого стока горной реки (на примере Верхней Кубани) // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 12. – С. 76–87.

62. Кучмент Л.С. Речной сток (генезис, моделирование, предвычисление). – М.: ИВП РАН, 2008. – 394 с.

63. Ладжель, М. Разработка методики расчета и прогноза дождевых паводков Западного Закавказья: дис. ... канд. геогр. наук. 11.00.07. – Одесса, 1984. – 167 с.

64. Левин А.Г., Мячиков В.Д. О редукции слоя осадков по площади вокруг подвижного центра дождя // Сборник работ по гидрологии ГГИ. – 1959. – № 1. – С. 48–55.

65. Лурье П.М. Водные ресурсы и водный баланс Кавказа. – СПб.: Гидрометеиздат, 2002. – 506 с.

66. Лурье П.М., Панов В.Д. Проблемы изученности гидрометеорологического режима территории Северного Кавказа // Метеорология и гидрология. – 2011. – № 4. – С. 87–95.

67. Магрицкий Д.В., Алексеевский Н.И., Крыленко И.Н., Юмина Н.М., Ефремова Н.А., Школьный Д.И. Риски наводнений в низовьях и устьях рек Черноморского побережья России // Водная стихия: опасности, возможности прогнозирования, управления и предотвращения угроз: материалы всероссийской научной конференции, г. Краснодар, 7-13 октября 2013 г. – Новочеркасск: ЛИК, 2013. – С.181–187.

68. Магрицкий Д.В., Самохин М.А., Юмина Н.М. Наводнения в Краснодарском крае и республике Адыгея // Наука. Техника. Технология (политехнический вестник). – 2013. – № 4. – С. 44–63.
69. Матвеева Т.А., Гущина Д.Ю., Колтерман К.П. Факторы катастрофических наводнений в устьях рек Европейской территории России // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5, География. – 2013. – № 2. – С. 70–77.
70. Мониторинг паводков в Краснодарском крае [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.emercit.com/map/>
71. Музылев Е.Л. Моделирование стока горных рек и спутниковая информация. – М.: Наука, 1987. – 136 с.
72. Муравьев А.В., Вильфанд Р.М. О стандартизации оценок качества среднесрочных и долгосрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. – 2000. – № 12. – С. 24 – 36.
73. Мухин В.М., Федорова Ю.В. Эмпирические методы прогноза быстроразвивающихся паводков на некоторых притоках Кубани. // Труды Гидрометцентра России. – 2006. – Вып. 341. – С. 79–103.
74. Мухин В.М. Методические основы физико-статистических видов краткосрочных прогнозов стока горных рек // Труды Гидрометцентра России. – 2013. – Вып. 349. – С. 5–46.
75. Мухин В.М., Полунин А.Я. Методические указания к разработке метода краткосрочного прогноза расходов воды горных рек на основе математической модели формирования стока. – М: Гидрометеиздат, 1982. – 149 с.
76. Наставление по службе прогнозов. Раздел 3. Часть 1. Прогнозы режима вод суши. – Л.: Гидрометеиздат, 1962. – 193 с.
77. Никифорова А.Е., Песков Б.Е. Прогноз летних дождей с использованием результатов постпроцессинга прогнозов осадков COSMO-Ru7 // Труды Гидрометцентра России. – 2014. – Вып. 351. – С. 5–22.
78. Олейников А.Д. Снежность зим района Красной Поляны (Западный Кавказ) // Вестник МГУ. Сер. 5, География. – 2010. – Вып. 2. – С. 39–45.

79. Описание мезомасштабного ансамблевого прогноза (COSMO-LEPS) на основе гидродинамической модели атмосферы COSMO [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.cosmo-model.org/content/tasks/operational/leps/>
80. Панов В.Д. Ледники бассейна р. Мзымта // Сборник работ Ростовской ГМО. – 1973. – Вып. 13. – С. 3–10.
81. Панов В.Д., Базелюк А.А., Лурье П.М. Реки Черноморского побережья Кавказа: Гидрография и режим стока. – Ростов-на-Дону: «Донской издательский дом», 2012. – 605 с.
82. Панов В.Д., Ефремов Ю.В, Саражин В.И. Хребты Западного Кавказа и их влияние на изменчивость некоторых элементов климата // Сборник работ Ростовской ГМО. – 1980. – Вып. 17. – С. 89–93.
83. Панов В.Д., Саражин В.И. Распределение осадков на Западном Кавказе в бассейнах рек Лаба и Мзымта // Сборник работ Ростовской ГМО. – 1977. – Вып. 16. – С. 112–126.
84. Пигольцина Г.Б., Зиновьева Н.А., Савкина А.О. Детальная оценка пространственной изменчивости термического режима воздуха в районе проведения зимних Олимпийских игр «Сочи-2014» // Природная среда Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). – 2012. – Вып. 3. – С. 223–227.
85. Погорелов А.В. Снежный покров Большого Кавказа: Опыт пространственно-временного анализа. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 287 с.
86. Погорелов А.В., Бойко Е.С., Ризаев И.Г. Исследование структуры поля снежного покрова в горах с использованием технологии воздушного лазерного сканирования: постановка проблемы и предварительные результаты // Геоинжиниринг. – 2008. – № 1(5). – С. 14–22.
87. Полунин А.Я. К вопросу о расчете гидрографа стока горной реки // Труды Гидрометцентра СССР. – 1982. – Вып. 240. – С. 74–81.
88. Предотвращение катастрофических паводков и обеспечение безопасности территории Крымского района Краснодарского края / Под ред. В.И. Данилова-Данильяна, М.В. Болгова. – М., 2013. – 36 с.

89. Разработать методы автоматизированного мониторинга и прогнозирования опасных быстроразвивающихся гидрологических процессов на реках России : отчет о НИР / Гидрометцентр России. – М., 2010.– 262 с.

90. Разработка методического и программного обеспечения для улучшения прогнозирования опасных быстроразвивающихся гидрометеорологических явлений в бассейне реки Мзымта для системы раннего обнаружения и информирования об опасных быстроразвивающихся природных явлениях на территории Южного и Северо-Кавказского федеральных округов : отчет о НИР / Гидрометцентр России. – М., 2012. – 205 с.

91. Разработка методик прогнозирования среднесуточных и максимальных расходов и уровней воды рек Черноморского побережья Кавказа для системы раннего обнаружения и информирования об опасных быстроразвивающихся природных явлениях на территории Южного и Северокавказского федеральных округов : отчет о НИР / Гидрометцентр России. – М., 2013. – 186 с.

92. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т.9. Закавказье и Дагестан. Вып. 1. Западное Закавказье / Под ред. Т.Н. Джапаридзе. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 312 с.

93. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т.9. Закавказье и Дагестан. Вып. 1. Западное Закавказье / Под ред. Г.Н. Хмаладзе. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 312 с.

94. Ривин Г.С., Розинкина И.А., Багров А.Н., Блинов Д.В. Мезомасштабная модель Cosmo-Ru07 и результаты ее оперативных испытаний // Информационный сборник № 39 «Результаты испытаний новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов». – 2012. – С. 15–42.

95. Руководство по гидрологическим прогнозам. Вып. 2. Краткосрочный прогноз расхода и уровня воды на реках. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 245 с.

96. Руководство по гидрологической практике. Сбор и обработка данных, анализ, прогнозирование и другие применения / Всемирная Метеорологическая Организация – 1994. – № 168.– 808 с.

97. Русин И.Н. Синоптическая интерпретация данных при расчете ливневых осадков в горах. – СПб.: Изд-во РГГМУ, 2003. – 219 с.

98. Системы раннего информирования об опасных быстроразвивающихся гидрометеорологических явлений на территории Черноморского побережья России : отчет о НИР / Гидрометцентр России. – М., 2013. – 226 с.

99. Сергин С.Я., Яйли Е.А., Цай С.Н., Потехина И.А. Климат и природопользования Краснодарского Причерноморья. – СПб.: изд. РГГМУ, 2001. – 188 с.

100. Соседов И.С. Методика территориальных воднобалансовых обобщений в горах. – М.: Наука, 1976. – 149 с.

101. Темникова Н.С. Климат Северного Кавказа и прилежащих степей. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 368 с .

102. Ткаченко Ю.Ю. Опасные гидрометеорологические явления на Черноморском побережье, связанные с выпадением сильных осадков // Природные и социальные риски в береговой зоне Черного и Азовского морей. М.: Изд-во Триумф, 2012. – С. 42–45.

103. Ткаченко Ю.Ю., Волосухин В.А. Прогнозирование параметров паводков на реках Краснодарского края // Гидротехника. – 2013. – № 4. – С. 16–20.

104. Хмаладзе Г.Н. Выносы наносов реками Черноморского побережья Кавказа. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 167с.

105. Христофоров А.В. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1988. – 132 с.

106. Христофоров А.В. Надежность расчетов речного стока. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1993. – 166 с.

107. Христофоров А.В. Теория случайных процессов в гидрологии. – М.: Изд-во МГУ, 1994. – 139 с.
108. Христофоров А.В., Юмина Н.М., Белякова П.А., Носань В. В. Оценка водного стока рек бассейна Амура // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, География. – 2012. – № 5. – С. 63–70.
109. Чертыкин Е.М. Статистические методы прогнозирования. – М.: Статистика, 1977. – 200 с.
110. Шенцис И.Д. Метод расчета макромасштабного поля осадков в горах // Труды САРНИИ. – 1982. – Вып. 94 (175). – С. 40–52.
111. Шикломанов И. А., Георгиевский В.Ю., Копалиани З.Д. Научно-методические основы современного государственного мониторинга водных объектов (на примере бассейна р. Кубань) // Метеорология и гидрология. – 2007. – № 12. – С. 76–90.
112. Экспериментальные исследования дождевого стока в буковых лесах бассейна Мзымты (материалы экспедиционных работ 1967 г.). – Пушкино, Изд-во ПЭМ ВНИИЛМ, 1968. – 141 с.
113. Экстремальные гидрологические ситуации. / Под ред. Н.И. Коронкевича, Е.А. Барабанова, И.С. Зайцевой. – М.: Медиа-ПРЕСС, 2010. – 464 с.
114. Ясинский С.В., Кашутина Е.А. Влияние региональных колебаний климата и хозяйственной деятельности на изменение гидрологического режима водосборов и стока малых рек // Водные ресурсы. – 2012. – Т.39. № 3. –С. 269–291.
115. Abbott M.B., Bathurst J.C., Cunge J.A. et al. An introduction in European hydrological system – Systeme Hydrologique Européen SHE // Journal of Hydrology. – 1986. – Vol. 87. – pp. 45–77.
116. Anderson J.L. A method for producing and evaluating probabilistic forecasts from ensemble model integrations // Journal of Climate. – 1996. – № 9. – pp. 1518–1530.

117. Barrett D.J., Kuzmin V.A., Walker, J.P., McVicar T.R. and Draper C. Improving stream flow forecasting by integrating satellite observations, in situ data and catchment models using model-data assimilation methods / eWater Technical Report. eWater Cooperative Research Centre. – Canberra, 2008. – 59 p.
118. Beven K., Freer J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology // *Journal of Hydrology*. – 2001. – Vol. 249. – pp. 11–29.
119. Brier G.W. Verification of forecasts expressed in terms of probability // *Mon. Wea. Rev.* – 1950. – Vol. 78. – pp. 1–3.
120. Buizza R., Hollingsworth A., Lalauette F., Ghelli A. Probabilistic Predictions of Precipitation Using the ECMWF Ensemble Prediction System // *Weather and Forecasting*. – 1999. – Vol. 14. – pp. 168–189.
121. Burnash R. J. C., Ferral R. L., McGuire R. A. A generalized streamflow simulation system: conceptual models for digital computers. Joint Fed.-State River Forecast Center, Sacramento, CA, 1973. – 68 p.
122. Cloke Y.L., Pappenger F. Ensemble Flood Forecasting: a review // *Journal of Hydrology*. – 2000. – № 375 (3-4). – pp. 613–626.
123. De Roo A., Gouweleeuw B., Thielen J., Bartholmes J., Bongioanni-Cerlini P., Todini E., Bates P., Horritt M., Hunter N., Beven K., Pappenberger F., Heise E., Rivin G., Hils M., Hollingsworth A., Holst B., Kwadijk J., Reggiani P., Van Dijk M., Sattler K., Sprokkereef E. Development of a European flood forecasting system // *Int. J. of River Basin Management*. – 2003. – № 1. – pp. 49–59.
124. Dingman S.L. *Physical Hydrology*. – New York: Macmillan Publishing Company, 1993 – 575 p.
125. Dobler C., Hagemann S., Wilby R. L., Stötter J. Quantifying different sources of uncertainty in hydrological projections in an Alpine watershed // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2012. – №16. – pp. 4343–4360.
126. Georgakakos K.P., Seo D.J., Gupta, H., Schake J., Butts M.B. Characterizing Stream flow Simulation Uncertainty through Multimodel Ensembles // *Journal of Hydrology*. – 2004. – Vol. 298.– pp. 222-241.

127. Handbook of Hydrology / Ed. by D.R. Maidment. – New York: Mc Graw Hill, 1993. – 978 p.
128. Hernández J. García, Jordan F., Gimenez P. S., Boillat J.-L., Schleiss, A. Ensemble hydrological forecasts for the Upper Rhone River basin // 33rd Congress of IAHR - Water engineering for a sustainable environment. Vancouver, Canada, August 9-14, 2009. pp. 1171-1178.
129. Jolliffe I.T., Stephenson, D.B. Forecast Verification. – Wiley, 2003. – 240 p.
130. Jordan F., Boillat J.-L., Dubois J., Schleiss A. MINERVE, a tool for flood prediction and management of the Rhone river catchment area // Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen. – 2004. – Heft 27. – S. 227–236.
131. Klok E., Jasper K., Roelofsma K., Gurtz J., Badoux A., 2001. Distributed hydrological modeling of a heavily glaciated Alpine river basin // Hydrol. Sci. J. – № 46. – pp. 553–570.
132. Krzysztofowicz R. The case for probabilistic forecasting in hydrology // Journal of Hydrology. –2001. - №249. pp. 2–9.
133. Moulin L., Baron V., Bernardo P., Mathevet T., Garcon R. Using QPE in hydrological modeling in middle mountain area? // ERAD 2012, 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology, Toulouse, France, 25-29 June 2012.
134. Nash J. E., Sutcliffe J. V. River flow forecasting through conceptual models. Part 1 – A discussion of principles // Journal of Hydrology. – 1970. – Vol. 10. – pp. 282–290.
135. Predictability of Weather and Climate / Ed. By T. Palmer and R. Hagedorn. Cambridge University Press, 2006. – 635 p.
136. Schaepli B., Hingray B., Niggli M., Musy A. A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments // Hydrol. Earth Syst. Sc. – 2005. – № 9. pp. 95–109.
137. Studies in Mountain Hydrology / ed. A. Herrmann, U. Schröder. – IHP/HWRP Berichte, Heft 2. –Koblenz, 2004. –104 p.

138. Tobin C. Ch. Improving Alpine flood prediction through hydrological process characterization and uncertainty analysis: PhD Thesis № 5416. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. – 2012. – 165 p.
139. Verbunt M., J. Gurtz K. Jasper, H. Lang, P. Warmerdam, M. Zappa. The hydrological role of snow and glaciers in alpine river basins and their distributed modeling // *Journal of Hydrology*, – 2003. - № 282. – pp. 36–55.
140. Welles E. Verification of river stage forecasts: Dissertation. University of Arizona. – 2005. – 157 p.
141. Wilks D.S. Statistical methods in the atmospheric sciences. 3rd ed. – (International geophysics series, vol. 100). Academic Press, 2011. – 676 p.
142. WMO project for the intercomparison of conceptual models of snowmelt runoff // *Hydrological aspects of alpine and high mountain areas: Proc. Exeter Symp.*, July 1982. – 1982. (IAHS Publ., N 138). – pp. 193–202.
143. World Meteorological Organization. Guide to Hydrological Practices. Volume II. Management of Water Resources and Application of Hydrological Practices // WMO - No. 168. Sixth ed. Geneva, 2009. – 298 p.
144. World Meteorological Organization. Intercomparison of Conceptual Models Used in Operational Hydrological Forecasting // *Operational Hydrology Report No. 7*, WMO - No. 429, Geneva, 1987. – 172 p.
145. World Meteorological Organization. Manual on Flood Forecasting and Warning // WMO - No. 1072. Geneva, 2011. – 138 p.
146. World Meteorological Organization. Prospectus for Implementation of a Flash Flood Guidance System with Global Coverage // A joint proposal by WMO Commission for Hydrology and WMO Commission for Basic Systems in collaboration with Hydrologic Research Center, U.S. National Weather Service, U.S. Agency for International Development/Office of Foreign Disaster Assistance, 2007. – 9 p.
147. World Meteorological Organization. Simulated Real-time Intercomparison of Hydrological Models // *Operational Hydrology Report No. 38*, WMO–No. 779. Geneva, 1991. – 241 p.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для рек Черноморского побережья Кавказа

1. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Вулан – с. Архипо-Осиповка.

Для створа р. Вулан – с. Архипо-Осиповка использовались данные гидрометрических наблюдений за период с 1955 г. по 2009 г. На основе этих данных была построена и уточнена для условий 2015 г. кривая расходов  $Q(H)$ , представленная на рис. 1.1.

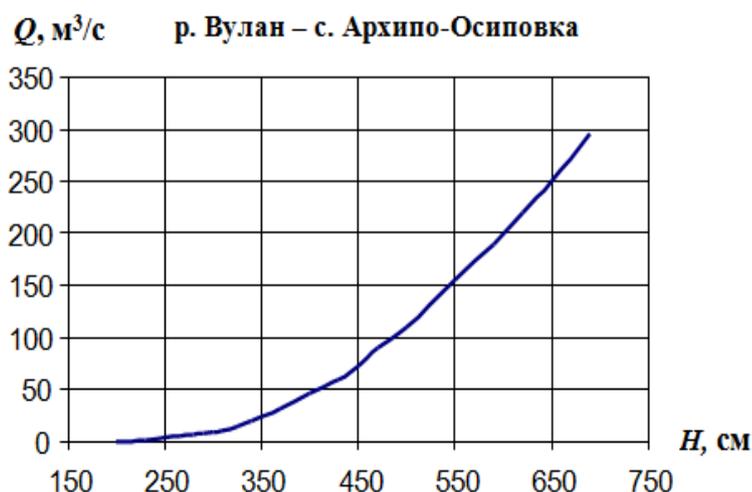


Рисунок 1.1. Кривая зависимости между расходами  $Q$  и уровнями воды  $H$  в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка.

В распоряжении имелись только данные о среднесуточных значениях уровней и расходов воды. Использовались данные метеорологических наблюдений за период с 1984 по 1987 г. и с 1990 по 2005 г. на метеостанции п. Джубга, расположенной в самой нижней части соседнего водосбора реки Джубга на высоте  $z_0 = 25$  м. Базовый период за 20 лет включает 7238 ежесуточных совместных гидрологических и метеорологических наблюдений.

Методика прогнозирования среднесуточных расходов воды в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка с заблаговременностью одни сутки основана на общей схеме, изложенной в главе 3. Для данного створа приняты следующие критические значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха на метеостанции: минимальная температура, при которой происходит снеготаяние  $T_{min,S} = 0^{\circ}\text{C}$ ; минимальная температура, при которой осадки выпадают в жидком виде  $T_{min,P}=2^{\circ}\text{C}$ ; максимальное значение учитываемой температуры  $T_{max}=25^{\circ}\text{C}$ .

Прогноз среднесуточного расхода воды предлагается получать по формуле (3.3), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 .Параметры формулы (3.3) для прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
$a_0$	2,4	2,23	2,7	1,9	4,7	-28,3
$a_1$	0,39	0,39	0,30	0,45	0,57	0,31
$a_2$	0,06	0,03	0,11	0,15	-0,10	0,07
$a_3$	0,006	0,067	0,017	-0,003	-0,001	-0,119
$a_4$	0,04	-0,37	0,17	0,18	0,18	5,15
$a_5$	-0,0262	0,0190	-0,0659	-0,0022	-0,0296	0,0049
$a_6$	0,337	-0,085	0,755	-0,006	0,657	-0,238
$a_7$	0,99	1,61	-0,57	0,585	-3,03	2,79
$a_8$	-0,085	-0,095	-0,023	0,011	0,0185	0,0565
$a_9$	0,24	0,27	-0,235	-0,355	-0,695	-2,46
$a_{10}$	-0,0198	-0,0007	-0,0059	0,0019	0,0029	-0,0023
$a_{11}$	0,240	-0,011	-0,032	0,002	-0,090	0,049
$a_{12}$	-0,69	0,165	0,35	-0,01	0,635	-0,125
	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
$a_0$	-4,7	-14,2	-1,5	-1,1	0,3	1,6
$a_1$	0,32	0,27	0,39	0,47	0,44	0,33
$a_2$	0,12	0,81	-0,11	0,08	0,11	0,09
$a_3$	-0,016	-0,047	0,005	0,005	0,021	0,106
$a_4$	0,77	2,40	-0,01	-0,26	-0,18	-1,18
$a_5$	-0,0266	-0,0058	-0,0024	0,0016	-0,0123	-0,0069
$a_6$	0,928	0,179	0,078	-0,022	0,188	0,159
$a_7$	-7,655	-1,13	-0,52	0,38	-0,07	1,02
$a_8$	0,0075	0,029	-0,0105	-0,0135	-0,03	-0,1435
$a_9$	-0,34	-1,37	0,225	0,45	0,215	1,33
$a_{10}$	0,0009	0,0054	-0,0049	0,0158	0,0003	0,0008
$a_{11}$	-0,034	-0,238	0,136	-0,271	-0,008	-0,030
$a_{12}$	0,285	2,595	-0,845	0,925	0,095	-0,035

Погрешность методики прогноза среднесуточных расходов воды оценивалась на независимом материале. Для этого исключались данные за один год, производилась переоценка параметров, а данные за исключенный год использовались для сравнения прогноза среднесуточных расходов воды с их фактическими значениями. Для оценки погрешности прогноза эта процедура производилась для всех лет базового периода. На рис. 1.2 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных среднесуточных расходов воды в 1994 г.

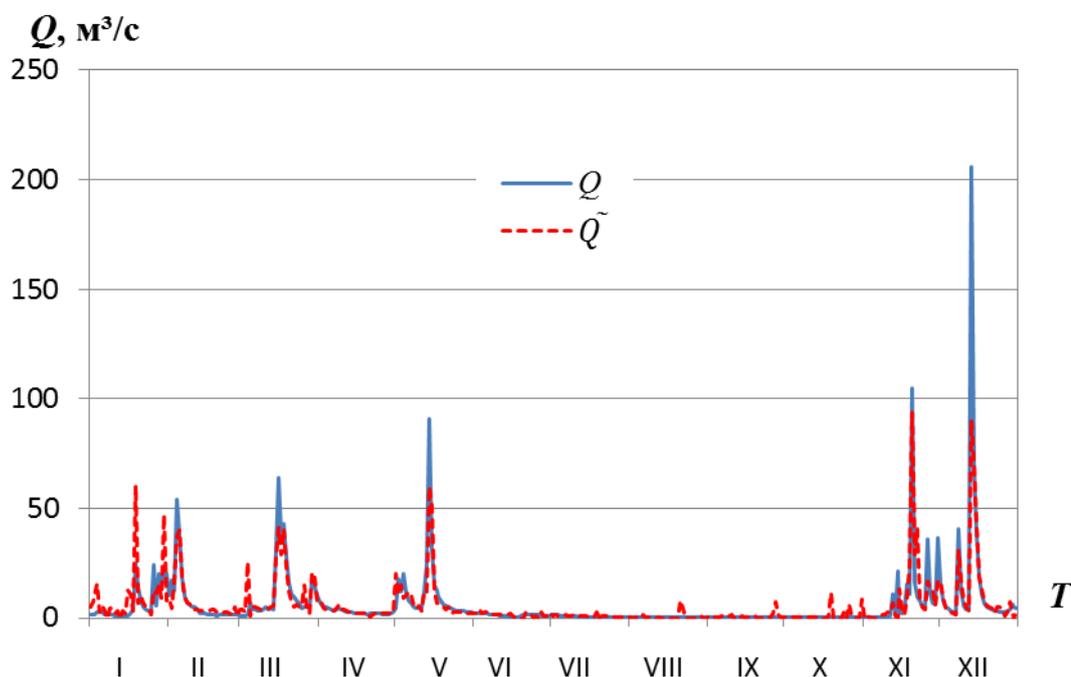


Рисунок 1.2. Графики колебаний фактических  $Q(t)$  и спрогнозированных  $\tilde{Q}(t)$  среднесуточных расходов в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка в 1994 г.

Для оценки средней квадратической погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  применялась рассмотренная в главе 3 теоретическая формула (3.10). В ней учтены не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного для каждого месяца ряда наблюдений  $N = 280 - 320$  и числом оцениваемых параметров  $K = 13$ . В табл. 1.2 для каждого месяца приведены общее количество  $N$  использованных суток с синхронными гидрологическими и метеорологическими наблюдениями, множественный коэффициент корреляции

между фактическими и прогнозируемыми значениями расхода воды  $R$ , средняя квадратическая погрешность прогноза  $\sigma_{пр}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ , равный отношению  $\sigma_{пр}$  к погрешности инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$ .

Таблица 1.2. Характеристики точности и эффективности прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$N$	614	565	620	600	620	600	620	620	600	620	570	589
$R$	0,87	0,80	0,71	0,85	0,78	0,66	0,73	0,93	0,75	0,82	0,67	0,82
$\sigma_{пр}$	11,3	11,1	9,2	2,8	5,5	3,6	4,2	3,7	2,3	5,4	9,4	11,7
$\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$	0,51	0,54	0,65	0,68	0,69	0,68	0,67	0,45	0,27	0,56	0,77	0,52

В целом предлагаемая методика прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка имеет коэффициент корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями среднесуточных расходов воды  $R = 0,78$ ; среднюю квадратическую погрешность ошибки прогноза  $\sigma_{пр} = 6,4 \text{ м}^3/\text{с}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta} = 0,56$ . Таким образом, при условии точного метеорологического прогноза предлагаемая методика достаточно точна и эффективна по сравнению с инерционным прогнозом.

С целью проверки предлагаемой схемы получения прогноза для случаев экстремально большого увеличения расходов воды в течение суток из всего набора 7238 фактических и прогнозируемых среднесуточных расходов воды было выбрано 72 пары с наибольшими значениями суточного роста расходов. Таким образом, были выделены случаи увеличения расхода воды за сутки обеспеченности не выше 1%. Для них была получена оценка средней квадратической погрешности прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр} = 51,9 \text{ м}^3/\text{с}$  и показателя его эффективности  $\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta} = 0,56$ .

Для получения прогноза суточных максимумов расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  (при прохождении паводков) прогнозируемые значения  $\tilde{Q}(t+1)$  среднесуточных расходов следует умножать на коэффициент  $\bar{k}$ . Для подстраховки средние для каждого месяца значения  $\bar{k}$  можно заменять их значением  $k(5\%)$ , соответствующим обеспеченности 5%. Для каждого месяца значения  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  помещены в табл. 1.3.

Таблица 1.3. Значения переходных коэффициентов  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  для створа р. Вулан – с. Архипо-Осиповка

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\bar{k}$	2,16	2,41	1,9	1,54	1,70	1,91	1,84	1,33	1,78	1,79	2,41	2,21
$k(5\%)$	3,35	4,45	3,51	2,85	3,31	4,08	5,67	2,33	5,57	3,99	5,99	4,08

Оценки средней квадратической погрешности и показателя эффективности прогноза максимальных расходов воды в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка равны:  $\hat{\sigma}_{np}(\tilde{Q}_{max}) = 16,1 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\hat{\sigma}_{np}/\hat{\sigma}_{\Delta} = 0,62$  [91].

Прогноз среднесуточных  $\tilde{H}(t+1)$  и максимальных  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  уровней воды в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка следует получать на основе соответствующих прогнозов среднесуточного  $\tilde{Q}(t+1)$  и максимального  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  расхода воды, используя обратное преобразование  $H(Q)$  с помощью графика на рис.1.1. При выпуске прогноза максимальных расходов и уровней воды в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка в 19<sup>00</sup> по местному времени, его заблаговременность составляет 14–26 часов.

Методика вероятностного прогнозирования максимальных расходов и уровней воды в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях и результатах статистического анализа, изложенных в главе 4. Для данного речного створа соответствующие различным уровням опасности критические значения уровня и расхода воды помещены в табл. 1.4.

Таблица 1.4. Критические уровни воды  $H_{кр}$  см над «0» графика поста и соответствующие расходы воды  $Q_{кр}$  м<sup>3</sup>/с в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка

Уровень опасности	$H_{кр}$ см	$Q_{кр}$ м <sup>3</sup> /с
отметка для подачи штормовых телеграмм	570	175
отметка неблагоприятного явления	620	220
отметка опасного явления	680	285

Оценки вероятностей превышения критических расходов и уровней воды в течение всего года и каждого месяца, полученные по многолетним рядам соответствующих максимумов расхода воды, помещены в табл. 1.5.

Таблица 1.5. Вероятности превышения критических значений уровня  $H_{кр}$  и расхода воды  $Q_{кр}$  (%) в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$Q_{кр}=175$	35	27	16	5,6	5,4	5,5	4,9	3,7	1,6	3,6	16	35	88
$Q_{кр}=220$	29	20	12	3,7	3,9	4,2	3,9	3,0	1,2	2,8	13	29	77
$Q_{кр}=285$	23	13	7,8	2,3	2,6	3,0	2,9	2,3	0,9	2,1	11	24	60

При известном прогнозе максимального расхода  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  и уровня воды  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  на сутки  $t+1$  вероятность того, что в течение этих суток фактический максимальный расход  $Q_{max}(t+1)$  превысит критическое значение  $Q_{кр}$ , а фактический максимальный уровень воды  $H_{max}(t+1)$  превысит  $H_{кр}$ , определяется формулой (4.16), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 1.6.

Таблица 1.6. Параметры распределения вероятностей логарифма величины  $\varepsilon(t+1)$  для р. Вулан – с. Архипо-Осиповка

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$m_{\ln \varepsilon}$	-0,19	-0,10	-0,07	-0,03	-0,09	-0,22	-0,28	-0,17	-0,38	-0,13	-0,33	-0,19
$\sigma_{\ln \varepsilon}$	0,86	0,67	0,56	0,30	0,52	0,67	0,73	0,91	1,00	1,40	1,16	0,95

На рис. 1.3 для двух месяцев – февраля (сезон дождевых паводков) и августа (летняя межень) приведены графики функции  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$ , определяющей вероятностный прогноз максимальных расходов и уровней воды на одни сутки.

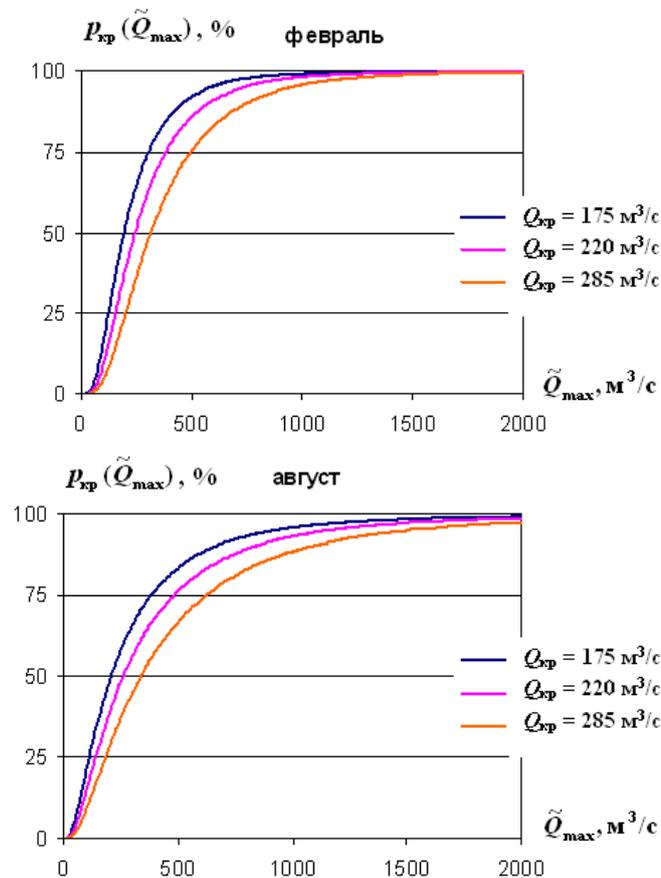


Рисунок 1.3. Графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  для февраля и августа в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка

Методика вероятностного прогнозирования критического значения суточного слоя осадков на метеостанции п. Джубга с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях, изложенных в главе 4. При известных на дату составления прогноза  $t$  значениях  $Q_{max}(t)$ ,  $Q_{max}(t-1)$ ,  $P(t)$ ,

$T(t)$  и прогнозе  $T(t+1)$  среднесуточной приземной температуры воздуха критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  определяется, исходя из заданной вероятности  $q$  превышения расходом и уровнем воды в створе р. Вулан – с. Архипо-Осиповка своих критических значений. Критический слой осадков в течение суток  $t+1$  на метеостанции п. Джубга определяется формулами (4.18), (4.21) и (4.23). Среднемесячные значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$  на метеостанции п. Джубга, соответствующие обеспеченности  $q = 5\%$ , приведены в табл. 1.7 для февраля и августа.

Таблица 1.7. Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм) на метеостанции Джубга обесп. 5% для створа р. Вулан – с. Архипо-Осиповка

Месяц	$Q_{кр} = 175 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 220 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 285 \text{ м}^3/\text{с}$
февраль	10	13	17
август	502	636	830

2. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Туапсе – г. Туапсе.

Для створа р. Туапсе – г. Туапсе использовались данные гидрометрических наблюдений за период с 1949 г. по 2010 г. На основе этих данных была построена и уточнена для условий 2015 г. кривая расходов  $Q(H)$ , представленная на рис. 2.1.

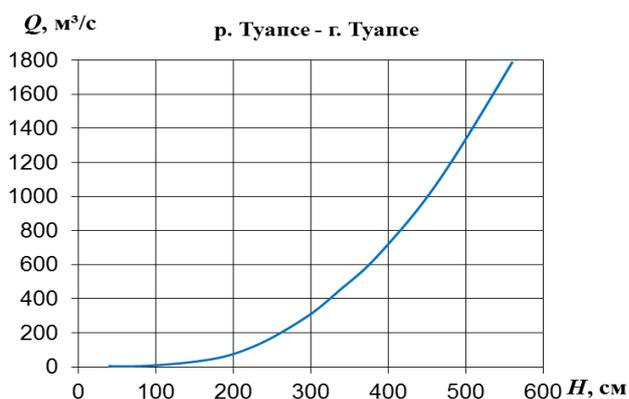


Рисунок 2.1. Кривая зависимости между расходами  $Q$  и уровнями воды  $H$  в створе р. Туапсе – г. Туапсе

В распоряжении имелись только данные о среднесуточных значениях уровней и расходов воды. Использовались данные метеорологических наблюдений за период с 1984 по 1987 г. и с 1990 по 2005 г. на метеостанции г. Туапсе, расположенной недалеко от замыкающего створа в самой нижней части водосбора на высоте  $z_0 = 60$  м. Базовый период за 9 лет включает 3189 ежесуточных совместных гидрологических и метеорологических наблюдений.

Методика прогнозирования среднесуточных расходов воды в створе р. Туапсе – г. Туапсе с заблаговременностью одни сутки основана на общей схеме, изложенной в главе 3. Для данного створа приняты следующие критические значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха на метеостанции: минимальная температура, при которой происходит снеготаяние  $T_{min,S} = 0^\circ\text{C}$ ; минимальная температура, при которой осадки выпадают в жидком виде  $T_{min,P} = 2^\circ\text{C}$ ; максимальное значение учитываемой температуры  $T_{max} = 25^\circ\text{C}$ .

Прогноз среднесуточного расхода воды предлагается получать по формуле (3.3), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 2.1.

Таблица 2.1. Параметры формулы (3.3) для прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Туапсе - г. Туапсе

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
$a_0$	1,4	2,4	2,4	-14,5	-58,0	22,6
$a_1$	0,48	0,73	0,49	0,45	0,19	0,58
$a_2$	-0,02	-0,11	0,09	0,08	0,13	-0,03
$a_3$	-0,041	0,149	0,004	-0,159	-0,217	-0,034
$a_4$	0,99	-0,94	0,16	5,18	8,66	1,59
$a_5$	0,0215	-0,0068	-0,0729	-0,0070	-0,0525	-0,0320
$a_6$	0,391	0,465	0,703	-0,219	0,911	1,009
$a_7$	0,27	-0,21	0,05	3,56	-1,535	-7,675
$a_8$	-0,1215	-0,108	-0,0385	0,1075	0,065	0,083
$a_9$	0,98	0,93	0,48	-3,26	-2,56	-3,645
$a_{10}$	0,0322	-0,0528	0,0564	-0,0212	-0,1033	-0,0002
$a_{11}$	-0,014	0,552	-0,352	0,285	2,630	-0,040
$a_{12}$	-0,51	-1,62	0,38	-0,24	-15,20	0,76
	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
$a_0$	78,5	-6,9	15,0	3,9	0,5	6,5
$a_1$	0,38	0,11	0,15	0,29	0,35	0,23
$a_2$	0,18	0,16	0,06	0,13	0,10	0,10
$a_3$	0,169	0,544	-0,101	0,051	-0,020	-0,074
$a_4$	-7,89	-24,19	5,46	-1,40	1,11	-1,10
$a_5$	-0,0101	0,2506	-0,0504	-0,0122	0,0007	-0,0494
$a_6$	0,420	-9,233	1,674	0,112	-0,038	0,737
$a_7$	-4,245	84,835	-12,21	1,29	2,17	-0,74
$a_8$	-0,0255	-0,565	0,1415	-0,054	0,021	0,0515
$a_9$	1,17	24,9	-7,045	1,21	-1,095	1,115
$a_{10}$	0,0241	-0,0104	-0,0084	0,0007	0,0021	-0,0335
$a_{11}$	-0,896	0,497	0,072	0,005	-0,024	0,487
$a_{12}$	8,36	-5,12	1,615	-0,05	0,29	-0,445

Погрешность методики прогноза среднесуточных расходов воды оценивалась на независимом материале. Для этого исключались данные за один год, производилась переоценка параметров, а данные за исключенный год использовались для сравнения прогноза среднесуточных расходов воды с их фактическими значениями. Для оценки погрешности прогноза эта процедура производилась для всех лет базового периода. На рис. 2.2 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных среднесуточных расходов воды в 1995 г.

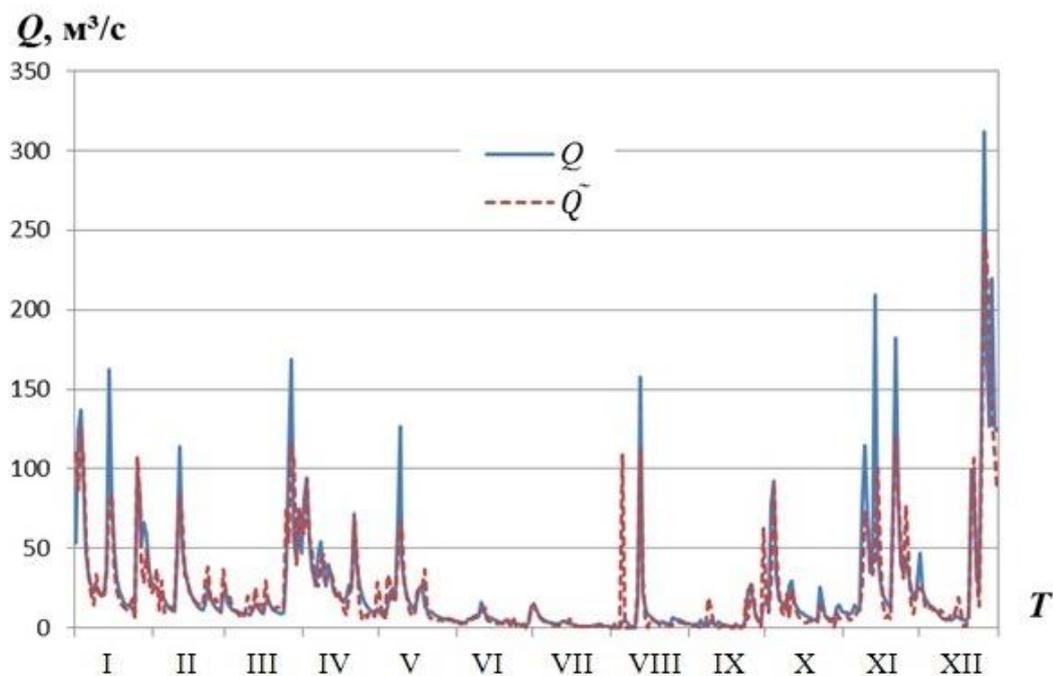


Рисунок 2.2. Графики колебаний фактических  $Q(t)$  и спрогнозированных  $\tilde{Q}(t)$  среднесуточных расходов воды в створе р. Туапсе – г. Туапсе в 1995 г.

Для оценки средней квадратической погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  применялась рассмотренная в главе 3 теоретическая формула (3.10). В ней учтены не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного для каждого месяца ряда наблюдений  $N = 126–144$  и числом оцениваемых параметров  $K = 13$ . В табл. 2.2 для каждого месяца приведены общее количество  $N$  использованных суток с синхронными гидрологическими и метеорологическими наблюдениями, множественный коэффициент корреляции между фактическими и прогнозируемыми значениями расхода воды  $R$ , средняя квадратическая погрешность прогноза  $\sigma_{пр}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ , равный отношению  $\sigma_{пр}$  к погрешности инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$ .

Таблица 2.2. Характеристики точности и эффективности прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Туапсе – г. Туапсе

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$N$	273	254	279	270	279	270	279	279	270	248	240	248
$R$	0,92	0,86	0,80	0,92	0,89	0,84	0,91	0,90	0,80	0,84	0,80	0,86
$\sigma_{пр}$	15,9	13,6	14,7	10,8	11,6	2,9	1,2	18,6	12,5	7,8	20,5	22,6
$\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$	0,47	0,73	0,78	0,58	0,52	0,72	0,64	0,35	0,63	0,67	0,57	0,64

В целом предлагаемая методика прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Туапсе – г. Туапсе имеет коэффициент корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями среднесуточных расходов воды  $R = 0,86$ ; среднюю квадратическую погрешность ошибки прогноза  $\sigma_{пр} = 14,2$  м<sup>3</sup>/с и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta} = 0,53$ . Таким образом, при условии точного метеорологического прогноза предлагаемая методика достаточно точна и эффективна по сравнению с инерционным прогнозом.

С целью проверки предлагаемой схемы получения прогноза для случаев экстремально большого увеличения расходов воды в течение суток из всего набора 3189 фактических и прогнозируемых среднесуточных расходов воды была выбрана 31 пара с наибольшими значениями суточного роста расходов. Таким образом, были выделены случаи увеличения расхода воды за сутки обеспеченности не выше 1%. Для них была получена оценка средней квадратической погрешности прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр} = 79,8$  м<sup>3</sup>/с и показателя его эффективности  $\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta} = 0,44$ .

Для получения прогноза суточных максимумов расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  (в случае ожидания паводков) прогнозируемые значения  $\tilde{Q}(t+1)$  среднесуточных расходов следует умножать на коэффициент  $\bar{k}$ . Для подстраховки средние для каждого месяца значения  $\bar{k}$  можно заменять их значением  $k(5\%)$ , соответствующим обеспеченности 5%. Для каждого месяца значения  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  помещены в табл. 2.3.

Таблица 2.3. Значения переходных коэффициентов  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  для створа р. Туапсе – г. Туапсе

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\bar{k}$	1,90	2,30	1,68	1,54	2,22	2,98	2,87	2,41	2,87	2,86	2,21	2,00
$k(5\%)$	3,32	6,40	2,61	2,39	7,16	6,90	6,64	4,69	8,35	7,95	4,30	3,50

Оценки средней квадратической погрешности и показателя эффективности прогноза максимальных расходов воды в створе р. Туапсе – г. Туапсе равны:  $\hat{\sigma}_{np}(\tilde{Q}_{max})=52,5 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\hat{\sigma}_{np}/\hat{\sigma}_{\Delta} = 0,57$  [91].

Прогноз среднесуточных  $\tilde{H}(t+1)$  и максимальных  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  уровней воды в створе р. Туапсе – г. Туапсе следует получать на основе соответствующих прогнозов среднесуточного  $\tilde{Q}(t+1)$  и максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ , используя обратное преобразование  $H(Q)$  с помощью графика на рис. 2.1. При выпуске прогноза максимальных расходов и уровней воды в створе р. Туапсе – г. Туапсе в 19<sup>00</sup> по местному времени, его заблаговременность составляет 14 - 26 часов.

Методика вероятностного прогнозирования максимальных расходов и уровней воды в створе р. Туапсе – г. Туапсе с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях и результатах статистического анализа, изложенных в главе 4. Для данного речного створа соответствующие различным уровням опасности критические значения уровня и расхода воды помещены в табл. 2.4

Таблица 2.4. Критические уровни воды  $H_{кр}$  см над «0» графика поста и соответствующие им расходы воды  $Q_{кр}$  м<sup>3</sup>/с в створе р. Туапсе – г. Туапсе

Уровень опасности	$H_{кр}$ см	$Q_{кр}$ м <sup>3</sup> /с
отметка для подачи штормовых телеграмм	350	600
отметка неблагоприятного явления	400	880
отметка опасного явления	420	980

Оценки вероятностей превышения критических расходов и уровней воды в течение всего года и каждого месяца, полученные по многолетним рядам соответствующих максимумов расхода воды, помещены в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Вероятности превышения критических значений уровня  $H_{кр}$  и расхода воды  $Q_{кр}$  (%) в створе р. Туапсе – г. Туапсе

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$Q_{кр}=600$	0,72	1,2	0,8	0,45	1,1	1,2	1,8	3,2	2,4	6,8	10	4,3	18
$Q_{кр}=880$	0,11	0,29	0,19	0,12	0,47	0,49	1,0	2,0	1,3	4,3	6,2	1,07	5,4
$Q_{кр}=980$	0,06	0,19	0,12	0,08	0,36	0,38	0,82	1,8	1,1	3,8	5,3	0,69	3,6

При известном прогнозе максимального расхода  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  и уровня воды  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  на сутки  $t+1$  вероятность того, что в течение этих суток фактический максимальный расход  $Q_{max}(t+1)$  превысит критическое значение  $Q_{кр}$ , а фактический максимальный уровень воды  $H_{max}(t+1)$  превысит  $H_{кр}$ , определяется формулой (4.16), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 2.6.

Таблица 2.6. Параметры распределения вероятностей логарифма величины  $\epsilon(t+1)$  для р. Туапсе – г. Туапсе

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$m_{\ln \epsilon}$	-0,03	-0,08	-0,09	0,01	0,02	-0,15	-0,08	-0,66	-0,16	-0,25	-0,21	-0,16
$\sigma_{\ln \epsilon}$	0,47	0,41	0,45	0,74	0,73	0,69	0,70	1,14	1,57	1,25	1,23	0,79

На рис. 2.3 для двух месяцев – февраля (сезон дождевых паводков) и августа (летняя межень) приведены графики функции  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$ , определяющей вероятностный прогноз максимальных расходов и уровней воды на одни сутки.

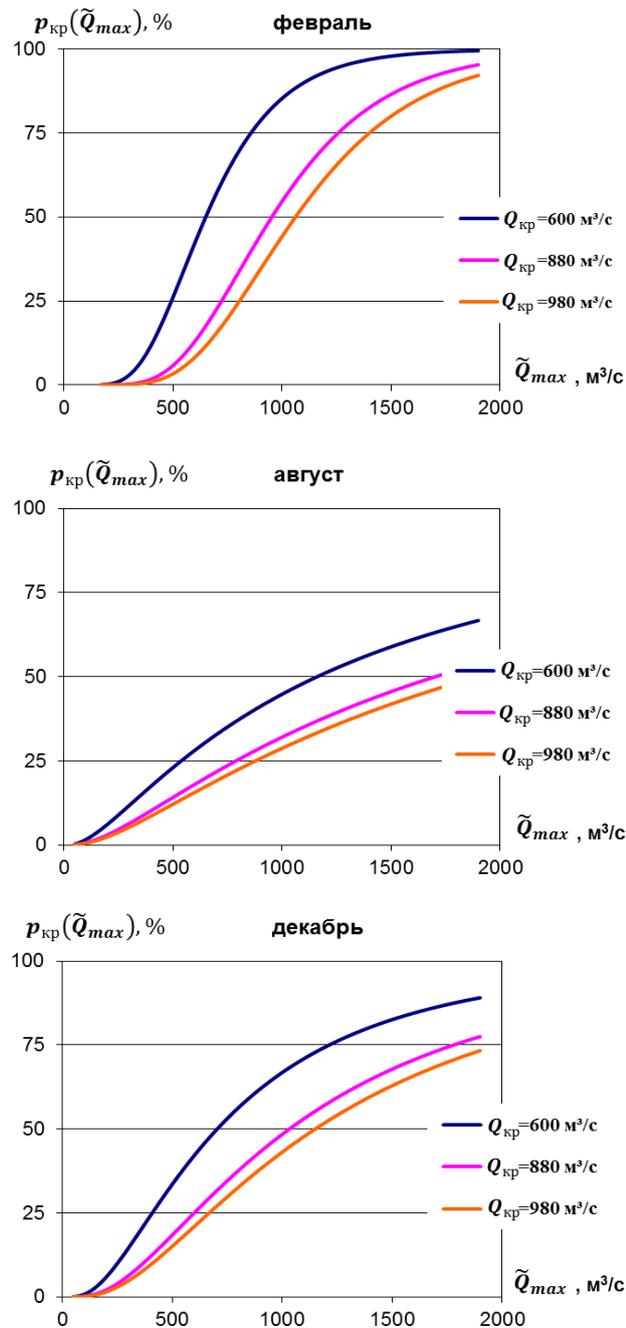


Рисунок 2.3. Графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  для февраля, августа и декабря в створе р. Туапсе – г. Туапсе

Методика вероятностного прогнозирования критического значения суточного слоя осадков на метеостанции г. Туапсе с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях, изложенных в главе 4. При известных на дату составления прогноза  $t$  значениях  $Q_{max}(t)$ ,  $Q_{max}(t-1)$ ,  $P(t)$ ,  $T(t)$  и прогнозе  $T(t+1)$  среднесуточной приземной температуры воздуха критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  определяется, исходя из заданной вероятности

$q$  превышения расходом и уровнем воды в створе р. Туапсе – г. Туапсе своих критических значений. Критический слой осадков в течение суток  $t+1$  на метеостанции г. Туапсе определяется формулами (4.18), (4.21) и (4.23). Среднемесячные значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$  на метеостанции г. Туапсе, соответствующие обеспеченности  $q=5\%$ , приведены в табл. 2.7 для февраля и августа.

Таблица 2.7. Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм) на метеостанции г. Туапсе обеспеченностью 5% для створа р. Туапсе – г. Туапсе

Месяц	$Q_{кр} = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{кр} = 880 \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{кр} = 980 \text{ м}^3/\text{с}$
февраль	95	145	163
август	26	39	44
декабрь	184	294	334

3. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Куапсе – с. Мамедова Щель.

Для створа р. Куапсе – с. Мамедова Щель использовались данные гидрометрических наблюдений за период с 1947 г. по 2010 г. На основе этих данных была построена и уточнена для условий 2015 г. кривая расходов  $Q(H)$ , представленная на рис. 3.1.

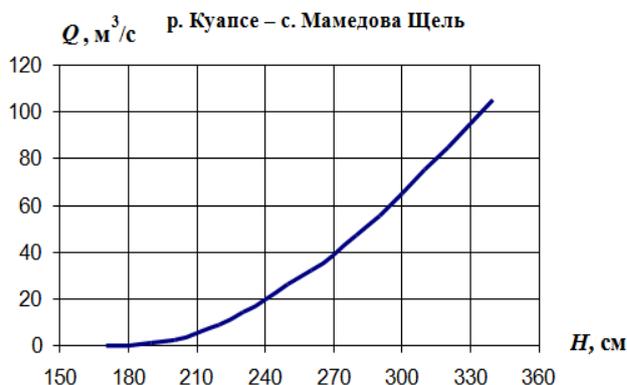


Рисунок 3.1. Кривая зависимости между расходами  $Q$  и уровнями воды  $H$  в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель

В распоряжении имелись только данные о среднесуточных значениях уровней и расходов воды. Использовались средние арифметические данных метеорологических наблюдений за период с 1984 по 1987 г. и с 1990 по 2005 г. на метеостанциях г. Туапсе и г. Сочи, расположенных по обе стороны от бассейна р. Куапсе на примерно одинаковом расстоянии. Базовый период за 19 лет включает 6691 ежесуточных совместных гидрологических и метеорологических наблюдений.

Методика прогнозирования среднесуточных расходов воды в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель с заблаговременностью одни сутки основана на общей схеме, изложенной в главе 3. Для данного створа приняты следующие критические значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха на метеостанции: минимальная температура, при которой происходит снеготаяние  $T_{min,S} = 0^{\circ}\text{C}$ ; минимальная температура, при которой осадки выпадают в жидком виде  $T_{min,P} = 2^{\circ}\text{C}$ ; максимальное значение учитываемой температуры  $T_{max} = 25^{\circ}\text{C}$ .

Прогноз среднесуточного расхода воды предлагается получать по формуле (3.3), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 3.1.

Таблица 3.1. Параметры формулы (3.3) для прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
$a_0$	-2,5	-1,1	-0,1	0,0	-3,2	-0,1
$a_1$	0,87	0,36	0,53	0,78	0,17	0,67
$a_2$	-0,15	0,13	0,04	-0,01	-0,02	-0,02
$a_3$	-0,009	-0,005	-0,001	-0,010	-0,027	-0,004
$a_4$	0,35	0,20	0,03	0,10	1,06	0,16
$a_5$	-0,0011	0,0020	-0,0007	-0,0004	0,0010	-0,0023
$a_6$	0,029	-0,056	0,010	0,005	-0,104	0,071
$a_7$	-0,16	0,44	0,05	0,03	1,28	-0,51
$a_8$	0,003	0,002	0,005	0,008	0,022	0,0025
$a_9$	-0,12	-0,04	-0,02	-0,07	-0,775	-0,14
$a_{10}$	0,001	-0,0008	0,0000	0,0012	-0,0038	0,0007
$a_{11}$	-0,037	0,025	0,000	-0,015	0,128	-0,022
$a_{12}$	0,35	-0,19	-0,02	0,02	-0,95	0,15

Продолжение таблицы 3.1

	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
$a_0$	-3,0	-32,0	-2,5	-1,1	-0,1	0,0
$a_1$	0,48	0,21	0,87	0,36	0,53	0,78
$a_2$	0,30	0,25	-0,15	0,13	0,04	-0,01
$a_3$	0,010	0,002	-0,009	-0,005	-0,001	-0,010
$a_4$	-0,46	-0,12	0,35	0,20	0,03	0,10
$a_5$	0,0013	0,0224	-0,0011	0,0020	-0,0007	-0,0004
$a_6$	-0,052	-0,861	0,029	-0,056	0,010	0,005
$a_7$	0,525	8,255	-0,16	0,44	0,05	0,03
$a_8$	-0,0155	-0,0665	0,003	0,0001	0,0004	0,008
$a_9$	0,725	3,005	-0,115	-0,04	-0,015	-0,07
$a_{10}$	-0,0004	0,0007	0,0010	-0,0008	0,0000	0,0012
$a_{11}$	0,016	-0,027	-0,037	0,025	0,000	-0,015
$a_{12}$	-0,15	0,28	0,35	-0,19	-0,015	0,015

Погрешность методики прогноза среднесуточных расходов воды оценивалась на независимом материале. Для этого исключались данные за один год, производилась переоценка параметров, а данные за исключенный год использовались для сравнения прогноза среднесуточных расходов воды с их фактическими значениями. Для оценки погрешности прогноза эта процедура производилась для всех лет базового периода. На рис. 3.2 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных среднесуточных расходов воды в 2005 г.

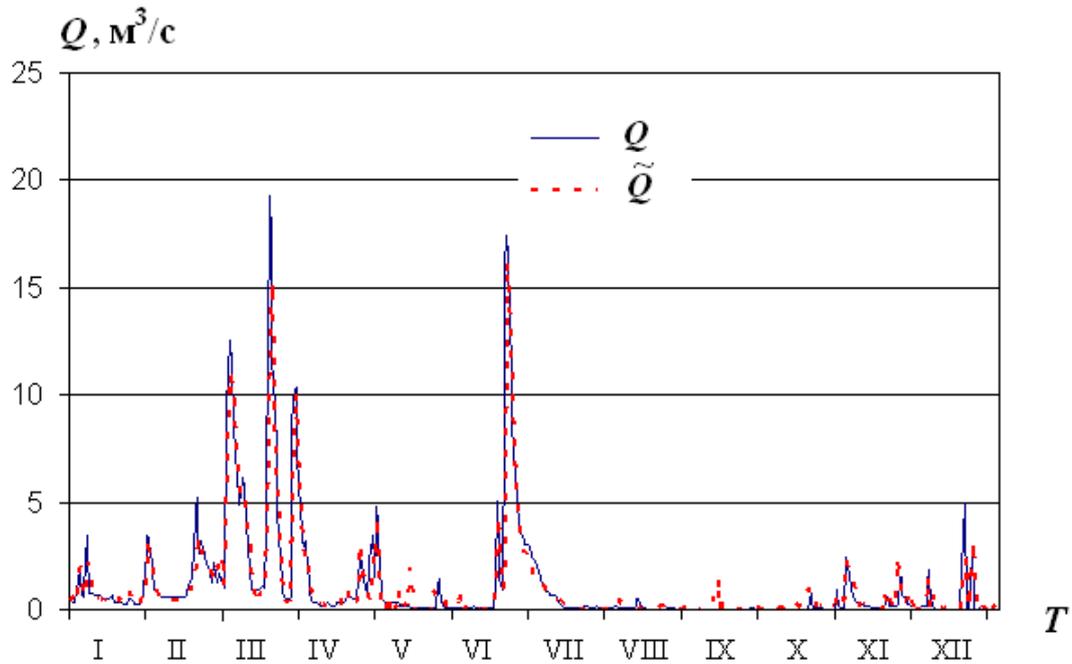


Рисунок 3.2. Графики колебаний фактических  $Q(t)$  и спрогнозированных  $\tilde{Q}(t)$  среднесуточных расходов воды в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель в 2005 г.

Для оценки средней квадратической погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  применялась рассмотренная в главе 3 теоретическая формула (3.10). В ней учтены не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного для каждого месяца ряда наблюдений  $N = 242 - 304$  и числом оцениваемых параметров  $K = 13$ . В табл. 3.2 для каждого месяца приведены общее количество  $N$  использованных суток с синхронными гидрологическими и метеорологическими наблюдениями, множественный коэффициент корреляции между фактическими и прогнозируемыми значениями среднесуточного расхода воды  $R$ , средняя квадратическая погрешность прогноза  $\sigma_{пр}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ , равный отношению  $\sigma_{пр}$  к погрешности инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$ .

Таблица 3.2. Характеристики точности и эффективности прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$N$	523	498	557	568	589	570	588	558	570	558	552	589
$R$	0,87	0,82	0,91	0,85	0,80	0,75	0,79	0,72	0,87	0,64	0,78	0,83
$\sigma_{пр}$	0,58	0,54	0,83	0,57	1,31	0,77	0,36	2,35	0,55	0,90	0,86	1,41
$\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$	0,68	0,78	0,73	0,77	0,5	0,85	0,78	0,55	0,78	0,77	0,67	0,91

В целом предлагаемая методика прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель имеет коэффициент корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями среднесуточных расходов воды  $R = 0,80$ ; среднюю квадратическую погрешность ошибки прогноза  $\sigma_{пр} = 0,85 \text{ м}^3/\text{с}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta} = 0,62$ . Таким образом, при условии точного метеорологического прогноза предлагаемая методика достаточно точна и эффективна по сравнению с инерционным прогнозом.

С целью проверки предлагаемой схемы получения прогноза для случаев экстремально большого увеличения расходов воды в течение суток из всего набора 6691 фактических и прогнозируемых среднесуточных расходов воды было выбрано 68 пар с наибольшими значениями суточного роста расходов. Таким образом, были выделены случаи увеличения расхода воды за сутки обеспеченности не выше 1%. Для них была получена оценка средней квадратической погрешности прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр} = 7,42 \text{ м}^3/\text{с}$  и показателя его эффективности  $\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta} = 0,57$ .

Для получения прогноза суточных максимумов расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  прогнозируемые значения  $\tilde{Q}(t+1)$  среднесуточных расходов (при ожидании паводков) следует умножать на коэффициент  $\bar{k}$ . Для подстраховки средние для каждого месяца значения  $\bar{k}$  можно заменять их значением  $k(5\%)$ , соответствующим обеспеченности 5%. Для каждого месяца значения  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  помещены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Значения переходных коэффициентов  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  для створа р. Куапсе – с. Мамедова Щель

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\bar{k}$	2,04	1,83	1,70	1,71	2,08	3,44	2,04	3,91	2,57	2,49	2,15	1,99
$k(5\%)$	3,89	3,13	2,84	2,92	5,10	10,91	5,29	12,09	8,00	5,41	4,51	3,95

Оценки средней квадратической погрешности и показателя эффективности прогноза максимальных расходов воды в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель равны:  $\hat{\sigma}_{np}(\tilde{Q}_{max})=3,6 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\hat{\sigma}_{np}/\hat{\sigma}_{\Delta} = 0,64$  [91].

Прогноз среднесуточных  $\tilde{H}(t+1)$  и максимальных  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  уровней воды в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель следует получать на основе соответствующих прогнозов среднесуточного  $\tilde{Q}(t+1)$  и максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ , используя обратное преобразование  $H(Q)$  с помощью графика на рис. 3.1. При выпуске прогноза максимальных расходов и уровней воды в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель в 19<sup>00</sup> по местному времени, его заблаговременность составляет 14 - 26 часов.

Методика вероятностного прогнозирования максимальных расходов и уровней воды в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях и результатах статистического анализа, изложенных в главе 4. Для данного речного створа соответствующие различным уровням опасности критические значения уровня и расхода воды помещены в табл. 3.4.

Таблица 3.4. Критические уровни воды  $H_{кр}$  над «0» графика поста и соответствующие им расходы воды  $Q_{кр}$  в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель

Уровень опасности	$H_{кр}$ см	$Q_{кр}$ м <sup>3</sup> /с
отметка для подачи штормовых телеграмм	260	35
отметка неблагоприятного явления	310	75
отметка опасного явления	330	95

Оценки вероятностей превышения критических расходов и уровней воды в течение всего года и каждого месяца, полученные по многолетним рядам соответствующих максимумов расхода воды, помещены в табл. 3.5.

Таблица 3.5. Вероятности превышения критических значений уровня  $H_{кр}$  и расхода воды  $Q_{кр}$  (%) в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$Q_{кр} = 35$	4,1	3,6	1,6	2,4	7,9	7,0	5,9	6,7	8,1	8,0	5,4	5,5	37
$Q_{кр} = 75$	0,57	0,47	0,13	0,32	2,9	2,9	2,5	3,1	3,9	3,4	1,1	0,61	5,4
$Q_{кр} = 95$	0,27	0,22	0,05	0,16	2,1	2,2	1,9	2,4	3,0	2,5	0,65	0,26	2,3

При известном прогнозе максимального расхода  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  и уровня воды  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  на сутки  $t+1$  вероятность того, что в течение этих суток фактический максимальный расход  $Q_{max}(t+1)$  превысит критическое значение  $Q_{кр}$ , а фактический максимальный уровень воды  $H_{max}(t+1)$  превысит  $H_{кр}$ , определяется формулой (4.16), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 3.6.

Таблица 3.6. Параметры распределения вероятностей логарифма величины  $\varepsilon(t+1)$  для р. Куапсе – с. Мамедова Щель

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$m_{\ln \varepsilon}$	-0,15	-0,10	-0,03	-0,13	-0,12	-0,23	-0,21	-0,25	-0,10	-0,52	-0,20	-0,24
$\sigma_{\ln \varepsilon}$	0,60	0,52	0,67	0,50	1,11	0,73	0,62	1,39	0,93	1,11	0,85	0,88

На рис. 3.3 для двух месяцев – февраля (сезон дождевых паводков) и августа (летняя межень) приведены графики функции  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$ , определяющей вероятностный прогноз максимальных расходов и уровней воды на одни сутки.

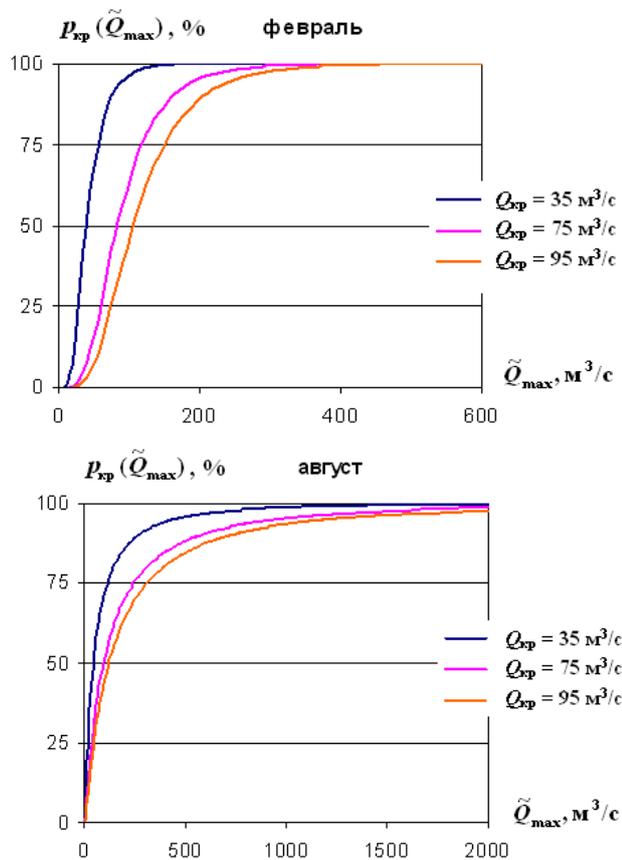


Рисунок 3.3. Графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  для февраля и августа в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель

Методика вероятностного прогнозирования критического значения осредненного по двум метеостанциям г. Туапсе и г. Сочи суточного слоя осадков с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях, изложенных в главе 4. При известных на дату составления

прогноза  $t$  значениях  $Q_{max}(t)$ ,  $Q_{max}(t-1)$ ,  $P(t)$ ,  $T(t)$  и прогнозе  $T(t+1)$  среднесуточной приземной температуры воздуха критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  определяется, исходя из заданной вероятности  $q$  превышения расходом и уровнем воды в створе р. Куапсе – с. Мамедова Щель своих критических значений. Критический слой осадков, осредненных по двум метеостанциям г. Туапсе и г. Сочи, в течение суток  $t+1$  на метеостанции г. Туапсе определяется формулами (4.18), (4.21) и (4.23). Среднемесячные значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$ , соответствующие обеспеченности  $q=5\%$ , приведены в табл. 3.7 для февраля и августа.

Таблица 3.7. Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм), осредненного по двум метеостанциям г. Туапсе и г. Сочи, обеспеченностью 5% для створа р. Куапсе – с. Мамедова Щель

Месяц	$Q_{кр} = 600 \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{кр} = 880 \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{кр} = 980 \text{ м}^3/\text{с}$
февраль	152	340	434
август	6	14	18

4. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс.

Для створа р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс использовались данные гидрометрических наблюдений за период с 1974 г. по 2010 г. Отсутствуют гидрометрические данные за 2004 г. На основе этих данных была построена и уточнена для условий 2015 г. кривая расходов  $Q(H)$ , представленная на рис. 4.1.

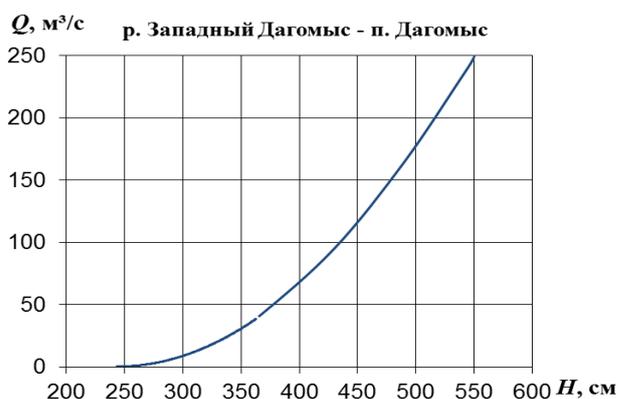


Рисунок 4.1. Кривая зависимости между расходами  $Q$  и уровнями воды  $H$  в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс

В распоряжении имелись только данные о среднесуточных значениях уровней и расходов воды. Использовались данные метеорологических наблюдений за период с 1984 по 1987 г. и с 1990 по 2003 г. и за 2005 г. на метеостанции г. Сочи, расположенной за пределами водосбора на расстоянии 12 км от створа гидрометрического поста р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс. Базовый период за 17 лет включает 6204 ежесуточных совместных гидрологических и метеорологических наблюдений.

Методика прогнозирования среднесуточных расходов воды в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс с заблаговременностью одни сутки основана на общей схеме, изложенной в главе 3. Для данного створа приняты следующие критические значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха на метеостанции: минимальная температура, при которой происходит снеготаяние  $T_{min,S} = 0^{\circ}\text{C}$ ; минимальная температура, при которой осадки выпадают в жидком виде  $T_{min,P} = 2^{\circ}\text{C}$ ; максимальное значение учитываемой температуры  $T_{max} = 27^{\circ}\text{C}$ .

Прогноз среднесуточного расхода воды предлагается получать по формуле (3.3), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 4.1.

Таблица 4.1. Параметры формулы (3.3) для прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
$a_0$	0,9	0,4	0,9	-0,1	-0,7	-23,0
$a_1$	0,29	0,31	0,52	0,43	0,19	0,22
$a_2$	0,06	0,05	-0,03	0,08	0,01	0,14
$a_3$	0,008	0,016	0,009	-0,008	-0,030	-0,027
$a_4$	0,10	-0,18	0,09	0,31	1,28	1,09
$a_5$	0,0066	-0,0053	-0,0106	-0,0037	0,0059	0,0188
$a_6$	0,066	0,112	0,145	0,043	-0,230	-0,624
$a_7$	0,09	0,00	0,01	0,19	2,365	5,15
$a_8$	0,0055	-0,030	0,000	0,0055	0,03	-0,028
$a_9$	-0,31	0,37	-0,21	-0,25	-1,235	1,19
$a_{10}$	-0,0072	0,0029	0,0034	0,0018	-0,0156	0,0004
$a_{11}$	0,046	-0,015	-0,041	-0,018	0,450	-0,019
$a_{12}$	-0,05	-0,01	0,02	-0,01	-3,15	0,24
	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
$a_0$	15,7	-4,1	-3,0	-4,2	0,8	0,6
$a_1$	0,23	0,47	0,14	0,17	0,22	0,28
$a_2$	0,05	-0,16	0,09	0,07	0,14	0,07
$a_3$	0,040	0,057	-0,004	0,004	-0,009	-0,006
$a_4$	-1,91	-2,70	0,18	0,12	0,23	0,15
$a_5$	-0,0012	-0,0119	-0,0053	-0,0039	0,0002	-0,0062
$a_6$	0,041	0,476	0,159	0,078	0,020	0,120
$a_7$	-0,285	-4,625	-1,01	0,04	0,19	-0,05
$a_8$	-0,0145	-0,072	-0,005	-0,0205	0,02	0,0065
$a_9$	0,645	3,26	0,17	0,44	-0,45	-0,17
$a_{10}$	-0,0001	-0,0013	-0,0015	-0,0027	-0,0012	0,0005
$a_{11}$	0,003	0,047	0,026	0,058	0,019	-0,004
$a_{12}$	-0,03	-0,47	-0,035	-0,285	-0,05	0,035

Погрешность методики прогноза среднесуточных расходов воды оценивалась на независимом материале. Для этого исключались данные за один год, производилась переоценка параметров, а данные за исключенный год использовались для сравнения прогноза среднесуточных расходов воды с их фактическими значениями. Для оценки погрешности прогноза эта процедура производилась для всех лет базового периода. На рис. 4.2 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных среднесуточных расходов воды в 1984 г.

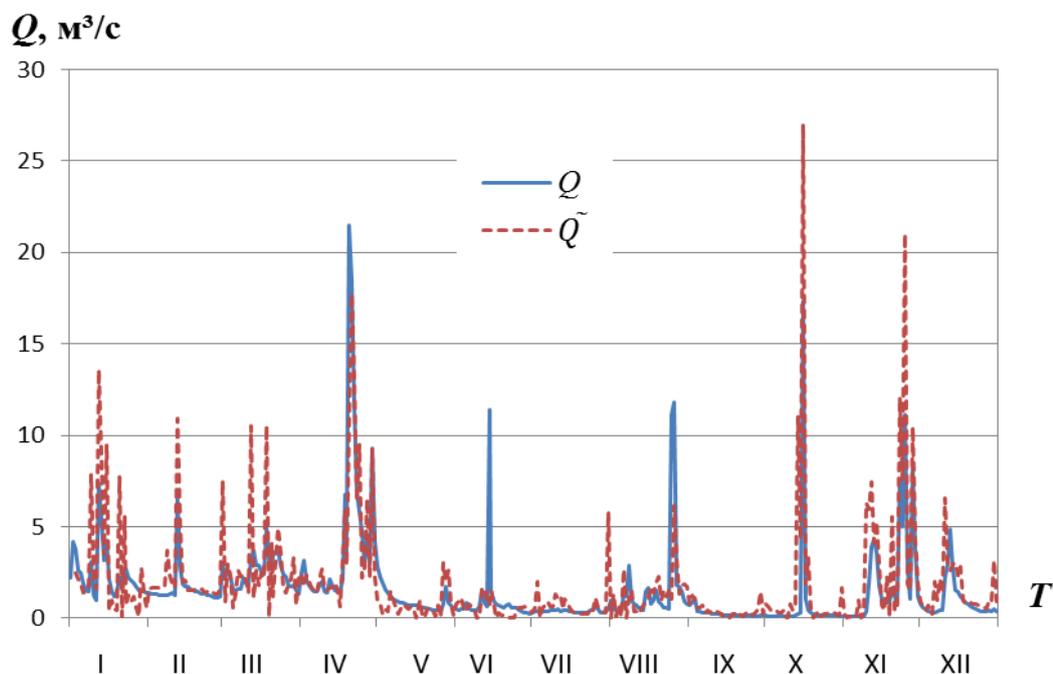


Рисунок 4.2. Графики колебаний фактических  $Q(t)$  и спрогнозированных  $\tilde{Q}(t)$  среднесуточных расходов воды в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс в 1984 г.

Для оценки средней квадратической погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  применялась рассмотренная в главе 3 теоретическая формула (3.10). В ней учтены не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного для каждого месяца ряда наблюдений  $N = 238 - 272$  и числом оцениваемых параметров  $K = 13$ . В табл. 4.2 для каждого месяца приведены общее количество  $N$  использованных суток с синхронными гидрологическими и метеорологическими наблюдениями, множественный коэффициент корреляции между фактическими и прогнозируемыми значениями среднесуточного расхода воды  $R$ , средняя квадратическая погрешность прогноза  $\sigma_{пр}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ , равный отношению  $\sigma_{пр}$  к погрешности инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$ .

Таблица 4.2. Характеристики точности и эффективности прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$N$	523	479	527	510	527	510	527	527	510	527	510	527
$R$	0,84	0,79	0,82	0,88	0,88	0,78	0,58	0,60	0,57	0,78	0,82	0,82
$\sigma_{пр}$	3,9	2,8	2,7	1,6	2,6	1,8	2,1	4,6	3,5	4,5	3,6	4,0
$\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$	0,61	0,59	0,59	0,51	0,42	0,56	0,71	0,78	0,71	0,56	0,53	0,57

В целом предлагаемая методика прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс имеет коэффициент корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями среднесуточных расходов воды  $R = 0,76$ ; среднюю квадратическую погрешность ошибки прогноза  $\sigma_{пр} = 3,3 \text{ м}^3/\text{с}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta} = 0,59$ . Таким образом, при условии точного метеорологического прогноза предлагаемая методика достаточно точна и эффективна по сравнению с инерционным прогнозом.

С целью проверки предлагаемой схемы получения прогноза для случаев экстремально большого увеличения расходов воды в течение суток из всего набора 6204 фактических и прогнозируемых среднесуточных расходов воды были выбраны 62 пары с наибольшими значениями суточного роста расходов. Таким образом, были выделены случаи увеличения расхода воды за сутки обеспеченности не выше 1%. Для них была получена оценка средней квадратической погрешности прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр} = 24,3 \text{ м}^3/\text{с}$  и показателя его эффективности  $\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta} = 0,56$ .

Для получения прогноза суточных максимумов расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  прогнозируемые значения  $\tilde{Q}(t+1)$  среднесуточных расходов следует умножать на коэффициент  $\bar{k}$ . Для подстраховки средние для каждого месяца значения  $\bar{k}$  можно заменять их значением  $k(5\%)$ , соответствующим обеспеченности 5%. Для каждого месяца значения  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  помещены в табл. 4.3.

Таблица 4.3. Значения переходных коэффициентов  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  для створа р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\bar{k}$	2,28	2,17	2,42	2,69	2,34	4,05	4,54	4,68	3,57	3,12	3,83	3,07
$k(5\%)$	3,99	3,80	4,71	4,71	4,78	8,65	10,51	12,35	8,26	7,22	8,18	6,55

Оценки средней квадратической погрешности и показателя эффективности прогноза максимальных расходов воды в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс равны:  $\hat{\sigma}_{np}(\tilde{Q}_{max})=13,8 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\hat{\sigma}_{np}/\hat{\sigma}_{\Delta} = 0,62$  [91].

Прогноз среднесуточных  $\tilde{H}(t+1)$  и максимальных  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  уровней воды в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс следует получать на основе соответствующих прогнозов среднесуточного  $\tilde{Q}(t+1)$  и максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ , используя обратное преобразование  $H(Q)$  с помощью графика на рис. 4.1. При выпуске прогноза максимальных расходов и уровней воды в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс в 19<sup>00</sup> по местному времени, его заблаговременность составляет 14 - 26 часов.

Методика вероятностного прогнозирования максимальных расходов и уровней воды в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях и результатах статистического анализа, изложенных в главе 4. Для данного речного створа соответствующие различным уровням опасности критические значения уровня и расхода воды помещены в табл. 4.4.

Таблица 4.4. Критические уровни воды  $H_{кр}$  над «0» графика поста и соответствующие им расходы воды  $Q_{кр}$  в створе р. Западный Дагомыс–  
п. Дагомыс

Уровень опасности	$H_{кр}$ см	$Q_{кр}$ м <sup>3</sup> /с
отметка для подачи штормовых телеграмм	450	110
отметка неблагоприятного явления	480	145
отметка опасного явления	540	220

Оценки вероятностей превышения критических расходов и уровней воды в течение всего года и каждого месяца, полученные по многолетним рядам соответствующих максимумов расхода воды, помещены в табл. 4.5.

Таблица 4.5. Вероятности превышения критических значений уровня  $H_{кр}$  и расхода воды  $Q_{кр}$  (%) в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$Q_{кр} = 110$	8,8	3,3	3,1	5,1	8,9	6,4	12	16	15	15	17	5,3	52
$Q_{кр} = 145$	5,3	1,4	1,4	2,7	6,2	4,4	9,4	13	12	12	12	1,9	35
$Q_{кр} = 220$	2,1	0,33	0,39	0,92	3,3	2,3	6,2	10	8,2	7,7	6,0	0,27	15

При известном прогнозе максимального расхода  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  и уровня воды  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  на сутки  $t+1$  вероятность того, что в течение этих суток фактический максимальный расход  $Q_{max}(t+1)$  превысит критическое значение  $Q_{кр}$ , а фактический максимальный уровень воды  $H_{max}(t+1)$  превысит  $H_{кр}$ , определяется формулой (4.16), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 4.6.

Таблица 4.6. Параметры распределения вероятностей логарифма величины  $\varepsilon(t+1)$  для р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$m_{\ln \varepsilon}$	0,09	-0,07	-0,06	-0,08	0,06	-0,29	-0,30	-0,76	-0,45	-0,46	-0,03	-0,12
$\sigma_{\ln \varepsilon}$	0,83	0,55	0,64	0,53	1,04	0,93	0,92	1,23	1,25	1,20	1,24	0,78

На рис. 4.3 для двух месяцев – февраля (сезон дождевых паводков) и августа (летняя межень) приведены графики функции  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$ , определяющей вероятностный прогноз максимальных расходов и уровней воды на одни сутки.

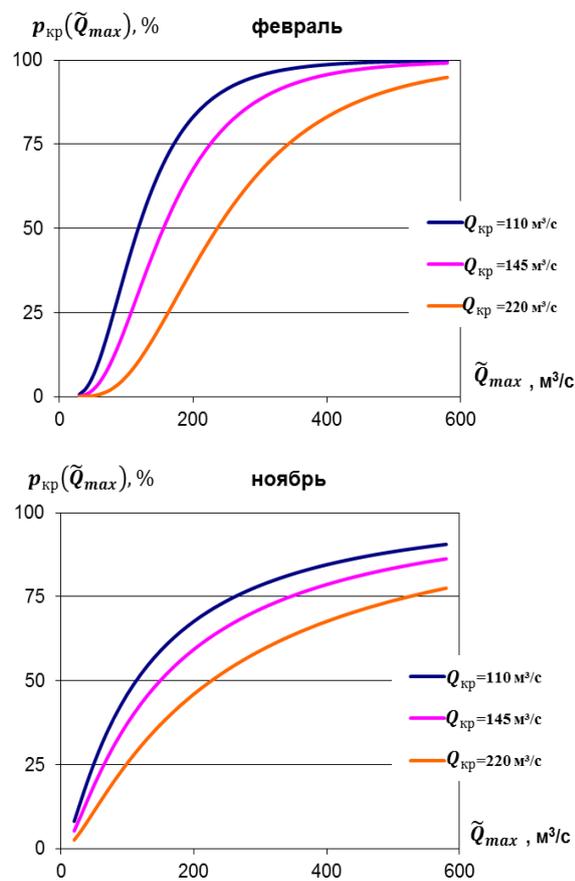


Рисунок 4.3. Графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  для февраля и ноябре в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс

Методика вероятностного прогнозирования критического значения суточного слоя осадков на метеостанции г. Сочи с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях, изложенных в главе 4. При известных на дату составления прогноза  $t$  значениях  $Q_{max}(t)$ ,  $Q_{max}(t-1)$ ,  $P(t)$ ,

$T(t)$  и прогнозе  $T(t+1)$  среднесуточной приземной температуры воздуха критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  определяется, исходя из заданной вероятности  $q$  превышения расходом и уровнем воды в створе р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс своих критических значений. Критический слой осадков в течение суток  $t+1$  на метеостанции г. Сочи определяется формулами (4.18), (4.21) и (4.23). Среднемесячные значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$  на метеостанции г. Сочи, соответствующие обеспеченности  $q = 5\%$ , приведены в табл. 4.7 для февраля и августа.

Таблица 4.7. Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм) на метеостанции г. Сочи обесп. 5% для створа р. Западный Дагомыс – п. Дагомыс

Месяц	$Q_{кр} = 110 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 145 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 220 \text{ м}^3/\text{с}$
февраль	63	85	133
ноябрь	7	10	17

5. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Сочи – с. Пластунка.

Для створа р. Сочи – с. Пластунка использовались данные гидрометрических наблюдений за период с 1945 г. по 2010 г. В данных о расходах воды имеются пропуски: с 1 января 1992 г. по 31 марта 1993г. и с 1 июля по 25 августа 1995 г. На основе имеющихся данных была построена и уточнена для условий 2015 г. кривая расходов  $Q(H)$ , представленная на рис. 5.1.

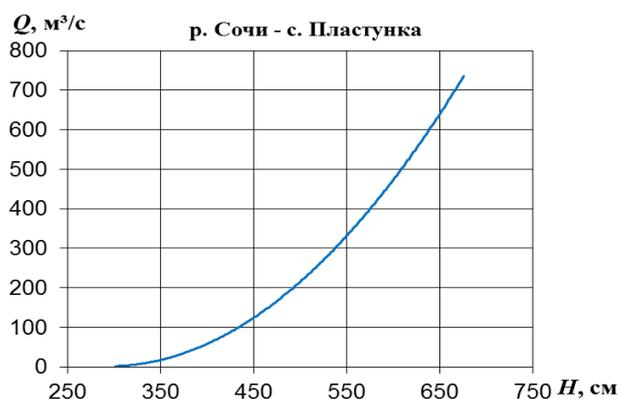


Рисунок 5.1. Кривая зависимости между расходами  $Q$  и уровнями воды  $H$  в створе р. Сочи – с. Пластунка

В распоряжении имелись данные только о среднесуточных значениях уровней и расходов воды. Использовались данные метеорологических наблюдений за период с 1984 по 1987 г. и с 1990 по 2003 г. и за 2005 г. на метеостанции г. Сочи, расположенной вблизи устья реки ниже водосбора к створу с. Пластунка. Базовый период за 17 лет включает 6020 ежедневных совместных гидрологических и метеорологических наблюдений.

Методика прогнозирования среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – с. Пластунка с заблаговременностью одни сутки основана на общей схеме, изложенной в главе 3. Для данного створа приняты следующие критические значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха на метеостанции: минимальная температура, при которой происходит снеготаяние  $T_{min,S} = 2^{\circ}\text{C}$ ; минимальная температура, при которой осадки выпадают в жидком виде  $T_{min,P} = 3,5^{\circ}\text{C}$ ; максимальное значение учитываемой температуры  $T_{max} = 27^{\circ}\text{C}$ .

Прогноз среднесуточного расхода воды предлагается получать по формуле (3.3), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Параметры формулы (3.3) для прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – с. Пластунка

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
$a_0$	3,7	2,4	2,6	-1,1	20,6	-21,8
$a_1$	0,63	0,77	0,54	0,87	0,66	0,41
$a_2$	-0,06	-0,12	0,12	-0,04	-0,08	0,13
$a_3$	0,016	-0,011	0,004	-0,014	0,011	-0,033
$a_4$	0,17	0,46	0,39	0,67	0,00	1,15
$a_5$	0,0040	-0,0182	-0,0250	-0,0198	-0,0242	0,0035
$a_6$	0,393	0,287	0,426	0,259	0,567	-0,148
$a_7$	-0,12	-0,09	0,02	-0,13	-1,955	1,78
$a_8$	0,0245	0,008	0,013	0,0215	0,063	-0,0425
$a_9$	-0,74	-0,29	-0,35	-0,36	-2,0626	1,62
$a_{10}$	-0,0069	0,0173	0,0101	0,0176	-0,0735	0,0079
$a_{11}$	-0,023	-0,063	-0,135	-0,161	1,969	-0,212
$a_{12}$	0,03	-0,11	0,02	0,04	-12,77	1,52
	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
$a_0$	20,0	-9,2	-8,4	-1,7	2,4	3,6
$a_1$	0,43	0,55	0,60	0,50	0,56	0,35
$a_2$	0,10	0,04	0,07	0,10	0,07	0,13
$a_3$	0,142	0,077	-0,015	0,018	0,024	0,007
$a_4$	-6,35	-3,75	0,14	-0,46	-0,16	0,11
$a_5$	0,0221	-0,0083	-0,0081	-0,0172	0,0090	-0,0155
$a_6$	-0,731	0,328	0,183	0,289	0,049	0,336
$a_7$	6,14	-3,045	-0,61	-0,40	0,18	0,01
$a_8$	-0,111	-0,1215	-0,0145	-0,0245	-0,0195	0,0275
$a_9$	4,855	5,225	0,94	0,795	0,07	-0,32
$a_{10}$	0,0007	-0,0092	-0,0102	-0,0063	-0,0052	0,0030
$a_{11}$	-0,029	0,364	0,261	0,176	0,047	0,010
$a_{12}$	0,27	-3,60	-1,7	-1,135	-0,2	-0,045

Погрешность методики прогноза среднесуточных расходов воды оценивалась на независимом материале. Для этого исключались данные за один год, производилась переоценка параметров, а данные за исключенный год использовались для сравнения прогноза среднесуточных расходов воды с их фактическими значениями. Для оценки погрешности прогноза эта процедура производилась для всех лет базового периода. На рис. 5.2 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных среднесуточных расходов воды в 1985 г.

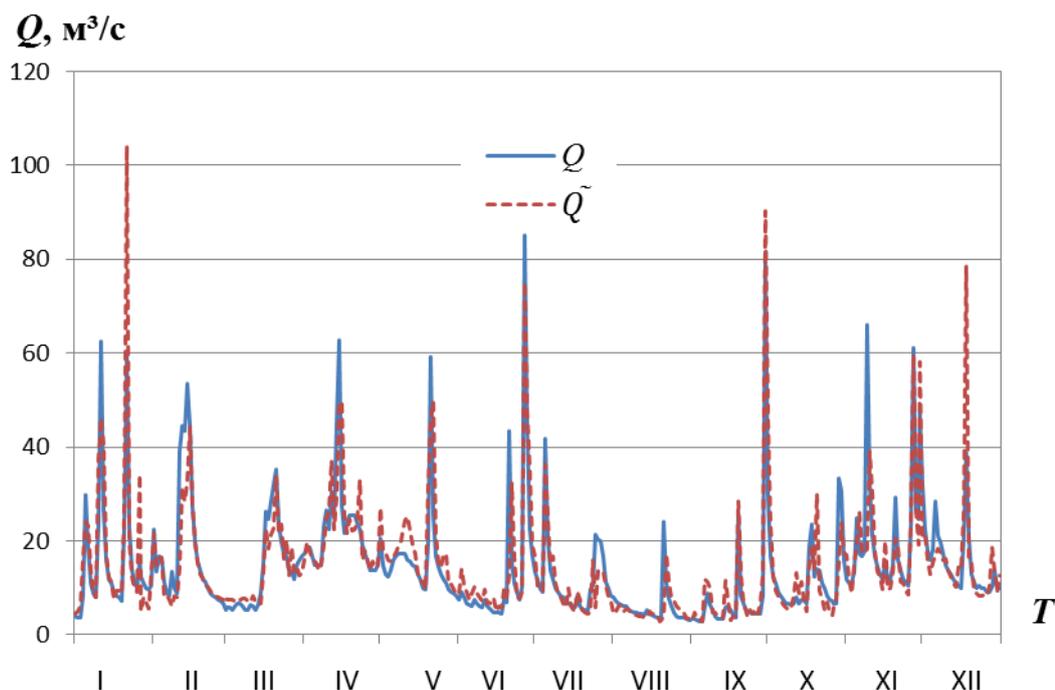


Рисунок 5.2. Графики колебаний фактических  $Q(t)$  и спрогнозированных  $\tilde{Q}(t)$  среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – с. Пластунка в 1985 г.

Для оценки средней квадратической погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  применялась рассмотренная в главе 3 теоретическая формула (3.10). В ней учтены не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного для каждого месяца ряда наблюдений  $N = 224 - 272$  и числом оцениваемых параметров  $K = 13$ . В табл. 5.2 для каждого месяца приведены общее количество  $N$  использованных суток с синхронными гидрологическими и метеорологическими наблюдениями, множественный коэффициент корреляции между фактическими и прогнозируемыми значениями среднесуточного расхода воды  $R$ , средняя квадратическая погрешность прогноза  $\sigma_{пр}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ , равный отношению  $\sigma_{пр}$  к погрешности инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$ .

Таблица 5.2. Характеристики точности и эффективности прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – с. Пластунка

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$N$	488	451	496	508	527	510	496	501	510	527	510	496
$R$	0,91	0,88	0,87	0,91	0,87	0,69	0,76	0,70	0,80	0,83	0,83	0,84
$\sigma_{пр}$	8,4	5,2	7,2	5,7	10,4	9,9	4,2	7,3	4,9	10,6	11,1	12,7
$\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$	0,60	0,63	0,56	0,70	0,58	0,76	0,69	0,82	0,76	0,69	0,63	0,64

В целом предлагаемая методика прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – с. Пластунка имеет коэффициент корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями среднесуточных расходов воды  $R = 0,82$ ; среднюю квадратическую погрешность ошибки прогноза  $\sigma_{пр} = 8,6 \text{ м}^3/\text{с}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta} = 0,65$ . Таким образом, при условии точного метеорологического прогноза предлагаемая методика достаточно точна и эффективна по сравнению с инерционным прогнозом.

С целью проверки предлагаемой схемы получения прогноза для случаев экстремально большого увеличения расходов воды в течение суток из всего набора 6020 фактических и прогнозируемых среднесуточных расходов воды были выбраны 62 пары с наибольшими значениями суточного роста расходов. Таким образом, были выделены случаи увеличения расхода воды за сутки обеспеченности не выше 1%. Для них была получена оценка средней квадратической погрешности прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр} = 54,1 \text{ м}^3/\text{с}$  и показателя его эффективности  $\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta} = 0,62$ .

Для получения прогноза суточных максимумов расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  (в случае ожидания паводка) прогнозируемые значения  $\tilde{Q}(t+1)$  среднесуточных расходов следует умножать на коэффициент  $\bar{k}$ . Для подстраховки средние для каждого месяца значения  $\bar{k}$  можно заменять их значением  $k(5\%)$ , соответствующим обеспеченности 5%. Для каждого месяца значения  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  помещены в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Значения переходных коэффициентов  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  для створа р. Сочи – с. Пластунка

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\bar{k}$	1,97	2,10	2,27	1,83	1,96	2,72	2,96	3,79	3,32	2,48	2,67	1,99
$k(5\%)$	3,06	4,86	5,64	3,20	3,43	5,29	5,76	8,77	7,09	4,82	4,67	3,48

Оценки средней квадратической погрешности и показателя эффективности прогноза максимальных расходов воды в створе р. Сочи – с. Пластунка равны:  $\hat{\sigma}_{np}(\tilde{Q}_{max})=25,6 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\hat{\sigma}_{np}/\hat{\sigma}_{\Delta} = 0,67$  [91].

Прогноз среднесуточных  $\tilde{H}(t+1)$  и максимальных  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  уровней воды в створе р. Сочи – с. Пластунка следует получать на основе соответствующих прогнозов среднесуточного  $\tilde{Q}(t+1)$  и максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ , используя обратное преобразование  $H(Q)$  с помощью графика на рис. 5.1. При выпуске прогноза максимальных расходов и уровней воды в створе р. Сочи – с. Пластунка в 19<sup>00</sup> по местному времени, его заблаговременность составляет 14 - 26 часов.

Методика вероятностного прогнозирования максимальных расходов и уровней воды в створе р. Сочи – с. Пластунка с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях и результатах статистического анализа, изложенных в главе 4. Для данного речного створа соответствующие различным уровням опасности критические значения уровня и расхода воды помещены в табл. 5.4.

Таблица 5.4. Критические уровни воды  $H_{кр}$  см над «0» графика поста и соответствующие им расходы воды  $Q_{кр}$  м<sup>3</sup>/с в створе р. Сочи – с. Пластунка

Уровень опасности	$H_{кр}$ см	$Q_{кр}$ м <sup>3</sup> /с
отметка для подачи штормовых телеграмм	550	330
отметка неблагоприятного явления	600	475
отметка опасного явления	650	640

Оценки вероятностей превышения критических расходов и уровней воды в течение всего года и каждого месяца, полученные по многолетним рядам соответствующих максимумов расхода воды, помещены в табл. 5.5.

Таблица 5.5. Вероятности превышения критических значений уровня  $H_{кр}$  и расхода воды  $Q_{кр}$  (%) в створе р. Сочи – с. Пластунка

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$Q_{кр}=330$	4,8	2,7	1,9	0,53	5,0	7,5	4,6	7,7	8,8	8,5	12	8,7	29
$Q_{кр}=475$	1,7	0,85	0,42	0,06	2,0	3,8	2,1	4,3	5,1	4,5	6,6	3,7	8,5
$Q_{кр}=640$	0,64	0,29	0,10	0,01	0,83	2,0	1,00	2,5	3,1	2,5	3,6	1,59	2,0

При известном прогнозе максимального расхода  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  и уровня воды  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  на сутки  $t+1$  вероятность того, что в течение этих суток фактический максимальный расход  $Q_{max}(t+1)$  превысит критическое значение  $Q_{кр}$ , а фактический максимальный уровень воды  $H_{max}(t+1)$  превысит  $H_{кр}$ , определяется формулой (4.16), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 5.6.

Таблица 5.6. Параметры распределения вероятностей логарифма величины  $\epsilon(t+1)$  для р. Сочи – с. Пластунка

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$m_{\ln \epsilon}$	-0,04	-0,03	-0,03	-0,02	-0,04	-0,11	-0,08	-0,09	-0,09	-0,12	-0,08	-0,12
$\sigma_{\ln \epsilon}$	0,39	0,29	0,30	0,18	0,29	0,36	0,36	0,52	0,41	0,52	0,50	0,46

На рис. 5.3 для двух месяцев – февраля (сезон дождевых паводков) и августа (летняя межень) приведены графики функции  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$ , определяющей вероятностный прогноз максимальных расходов и уровней воды на одни сутки.

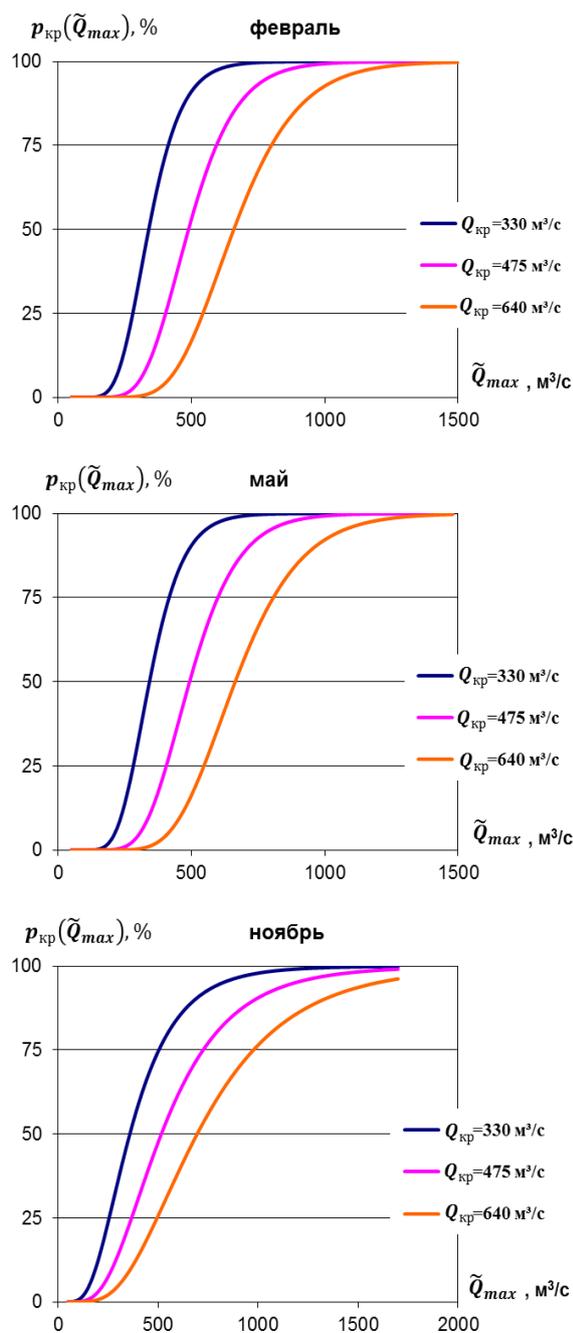


Рисунок 5.3. Графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  для февраля, мая и ноябре в створе р. Сочи – с. Пластунка

Методика вероятностного прогнозирования критического значения суточного слоя осадков на метеостанции г. Сочи с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях, изложенных в главе 4. При известных на дату составления прогноза  $t$  значениях  $Q_{max}(t)$ ,  $Q_{max}(t-1)$ ,  $P(t)$ ,  $T(t)$  и прогнозе  $T(t+1)$  среднесуточной приземной температуры воздуха

критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  определяется, исходя из заданной вероятности  $q$  превышения расходом и уровнем воды в створе р. Сочи – с. Пластунка своих критических значений. Критический слой осадков в течение суток  $t+1$  на метеостанции г. Сочи определяется формулами (4.18), (4.21) и (4.23). Среднемесячные значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$  на метеостанции г. Сочи, соответствующие обеспеченности  $q=5\%$ , приведены в табл. 5.7 для февраля и августа.

Таблица 5.7. Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм) на метеостанции г. Сочи обеспеченностью 5% для створа р. Сочи – с. Пластунка

Месяц	$Q_{кр} = 330 \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{кр} = 475 \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{кр} = 640 \text{ м}^3/\text{с}$
февраль	190	284	392
май	100	153	214
ноябрь	42	65	91

6. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Сочи – г. Сочи.

Для створа р. Сочи – г. Сочи использовались данные гидрометрических наблюдений за период с 1945 г. по 2010 г. В данных о расходах воды имеются пропуски: с 1 января 1992 г. по 31 марта 1993г. и с 1 июля по 25 августа 1995 г. На основе имеющихся данных была построена и уточнена для условий 2015 г. кривая расходов  $Q(H)$ , представленная на рис. 6.1.

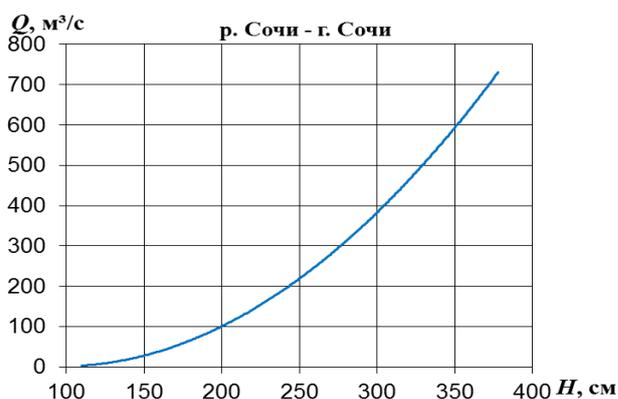


Рисунок 6.1. Кривая зависимости между расходами  $Q$  и уровнями воды  $H$  в створе р. Сочи – г. Сочи

В распоряжении имелись данные только о среднесуточных значениях уровней и расходов воды. Использовались данные метеорологических наблюдений за период с 1984 по 1987 г. и с 1990 по 2005 г. на метеостанции г. Сочи, расположенной недалеко от замыкающего створа в самой нижней части водосбора на высоте  $z_0 = 142$  м. Базовый период за 18 лет включает 6506 ежесуточных совместных гидрологических и метеорологических наблюдений.

Методика прогнозирования среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи с заблаговременностью одни сутки основана на общей схеме, изложенной в главе 3. Для данного створа приняты следующие критические значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха на метеостанции: минимальная температура, при которой происходит снеготаяние  $T_{min,S} = 0^\circ\text{C}$ ; минимальная температура, при которой осадки выпадают в жидком виде  $T_{min,P} = 2^\circ\text{C}$ ; максимальное значение учитываемой температуры  $T_{max} = 27^\circ\text{C}$ .

Прогноз среднесуточного расхода воды предлагается получать по формуле (3.3), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 6.1.

Таблица 6.1. Параметры формулы (3.3) для прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
$a_0$	3,4	1,5	5,6	-2,0	44,4	-91,7
$a_1$	0,61	0,60	0,57	0,78	0,34	0,48
$a_2$	-0,05	0,01	-0,02	-0,02	0,09	0,11
$a_3$	0,011	0,016	0,051	-0,010	0,051	-0,108
$a_4$	0,10	0,06	-0,13	0,54	-0,99	4,56
$a_5$	0,0273	-0,0049	-0,0197	-0,0301	0,0263	0,0162
$a_6$	0,154	0,241	0,529	0,463	-0,567	-0,590
$a_7$	0,28	0,08	-0,25	-0,54	4,83	5,85
$a_8$	0,001	-0,027	0,020	0,02	0,0715	-0,12
$a_9$	-0,37	0,35	-0,71	-0,19	-3,28	4,775
$a_{10}$	0,0033	0,0267	0,0050	0,0190	-0,1239	0,0160
$a_{11}$	0,008	-0,165	-0,045	-0,224	3,573	-0,540
$a_{12}$	-0,22	-0,01	-0,19	0,24	-24,69	4,52
	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
$a_0$	66,9	-48,1	-22,8	-0,8	1,6	2,0
$a_1$	0,42	0,39	0,43	0,48	0,58	0,51
$a_2$	0,10	0,06	0,05	0,06	0,07	0,07
$a_3$	0,282	0,085	-0,049	0,023	0,009	-0,013
$a_4$	-13,52	-4,74	1,55	-0,27	0,28	0,32
$a_5$	0,0084	0,0027	-0,0080	-0,0153	0,0003	-0,0080
$a_6$	-0,345	-0,065	0,126	0,194	0,148	0,305
$a_7$	3,905	0,515	0,83	1,11	0,26	0,09
$a_8$	-0,182	-0,204	-0,01	-0,0155	0,0125	0,0395
$a_9$	8,405	9,695	0,85	0,3	-0,585	-0,5
$a_{10}$	0,0060	-0,0290	-0,0142	-0,0149	0,0072	0,0032
$a_{11}$	-0,228	1,181	0,389	0,416	-0,090	-0,044
$a_{12}$	2,12	-12,00	-2,7	-2,835	0,01	0,05

Погрешность методики прогноза среднесуточных расходов воды оценивалась на независимом материале. Для этого исключались данные за один год, производилась переоценка параметров, а данные за исключенный год использовались для сравнения прогноза среднесуточных расходов воды с их фактическими значениями. Для оценки погрешности прогноза эта процедура производилась для всех лет базового периода. На рис. 6.2 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных среднесуточных расходов воды в 1985 г.

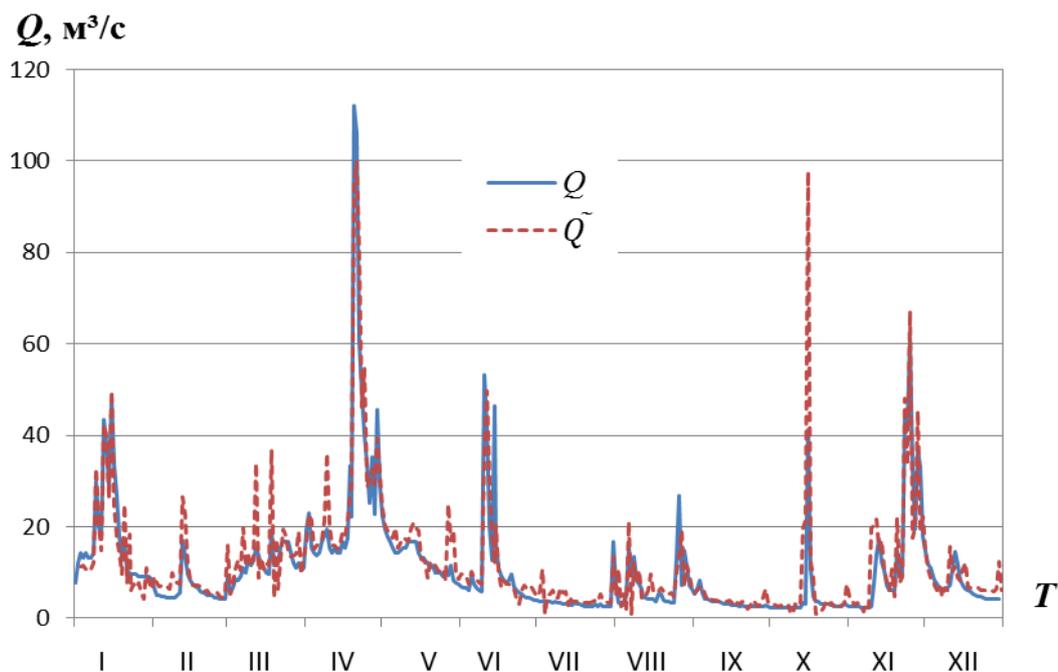


Рисунок 6.2. Графики колебаний фактических  $Q(t)$  и спрогнозированных  $\tilde{Q}(t)$  среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи в 1984 г.

Для оценки средней квадратической погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  применялась рассмотренная в главе 3 теоретическая формула (3.10). В ней учтены не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного для каждого месяца ряда наблюдений  $N = 252 - 288$  и числом оцениваемых параметров  $K = 13$ . В табл. 6.2 для каждого месяца приведены общее количество  $N$  использованных суток с синхронными гидрологическими и метеорологическими наблюдениями, множественный коэффициент корреляции между фактическими и прогнозируемыми значениями среднесуточного расхода воды  $R$ , средняя квадратическая погрешность прогноза  $\sigma_{пр}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ , равный отношению  $\sigma_{пр}$  к погрешности инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$ .

Таблица 6.2. Характеристики точности и эффективности прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$N$	554	508	526	540	558	540	558	526	540	558	540	558
$R$	0,92	0,86	0,86	0,90	0,79	0,73	0,73	0,62	0,76	0,84	0,86	0,86
$\sigma_{пр}$	10,4	8,5	10,7	8,6	14,8	12,1	9,2	11,2	8,8	15,3	14,5	16,2
$\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$	0,58	0,62	0,55	0,63	0,56	0,75	0,72	0,74	0,64	0,64	0,57	0,64

В целом предлагаемая методика прогноза среднесуточных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи имеет коэффициент корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями среднесуточных расходов воды  $R = 0,81$ ; среднюю квадратическую погрешность ошибки прогноза  $\sigma_{пр} = 12,0 \text{ м}^3/\text{с}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta} = 0,62$ . Таким образом, при условии точного метеорологического прогноза предлагаемая методика достаточно точна и эффективна по сравнению с инерционным прогнозом.

С целью проверки предлагаемой схемы получения прогноза для случаев экстремально большого увеличения расходов воды в течение суток из всего набора 6506 фактических и прогнозируемых среднесуточных расходов воды было выбрано 65 пар с наибольшими значениями суточного роста максимальных расходов. Таким образом, были выделены случаи увеличения расхода воды за сутки обеспеченности не выше 1%. Для них была получена оценка средней квадратической погрешности прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр} = 74,6 \text{ м}^3/\text{с}$  и показателя его эффективности  $\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta} = 0,60$ .

Для получения прогноза суточных максимумов расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  прогнозируемые значения  $\tilde{Q}(t+1)$  среднесуточных расходов следует умножить на коэффициент  $\bar{k}$ . Для подстраховки средние для каждого месяца значения  $\bar{k}$  можно заменять их значением  $k(5\%)$ , соответствующим обеспеченности 5%. Для каждого месяца значения  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  помещены в табл. 6.3.

Таблица 6.3. Значения переходных коэффициентов  $\bar{k}$  и  $k(5\%)$  для створа р. Сочи – г. Сочи

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\bar{k}$	2,00	2,07	2,19	1,77	2,66	3,57	3,47	4,32	3,30	2,60	2,64	1,97
$k(5\%)$	3,10	3,62	5,78	2,57	8,90	10,39	8,62	10,00	6,42	5,06	4,62	3,06

Оценки средней квадратической погрешности и показателя эффективности прогноза максимальных расходов воды в створе р. Сочи – г. Сочи равны:  $\hat{\sigma}_{np}(\tilde{Q}_{max})=40,8 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\hat{\sigma}_{np}/\hat{\sigma}_{\Delta} = 0,65$  [91].

Прогноз среднесуточных  $\tilde{H}(t+1)$  и максимальных  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  уровней воды в створе р. Сочи – с. Пластунка следует получать на основе соответствующих прогнозов среднесуточного  $\tilde{Q}(t+1)$  и максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ , используя обратное преобразование  $H(Q)$  с помощью графика на рис. 6.1. При выпуске прогноза максимальных расходов и уровней воды в створе р. Сочи – г. Сочи в 19<sup>00</sup> по местному времени, его заблаговременность составляет 14 - 26 часов.

Методика вероятностного прогнозирования максимальных расходов и уровней воды в створе р. Сочи – г. Сочи с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях и результатах статистического анализа, изложенных в главе 4. Для данного речного створа соответствующие различным уровням опасности критические значения уровня и расхода воды помещены в табл. 6.4.

Таблица 6.4. Критические уровни воды  $H_{кр}$  см над «0» графика поста и соответствующие им расходы воды  $Q_{кр}$  м<sup>3</sup>/с в створе р. Сочи – г. Сочи

Уровень опасности	$H_{кр}$ см	$Q_{кр}$ м <sup>3</sup> /с
отметка для подачи штормовых телеграмм	280	300
отметка неблагоприятного явления	330	500
отметка опасного явления	360	640

Оценки вероятностей превышения критических расходов и уровней воды в течение всего года и каждого месяца, полученные по многолетним рядам соответствующих максимумов расхода воды, помещены в табл. 6.5.

Таблица 6.5. Вероятности превышения критических значений уровня  $H_{кр}$  и расхода воды  $Q_{кр}$  (%) в створе р. Сочи – г. Сочи

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$Q_{кр}=300$	7,3	6,9	4,8	2,6	9,5	9,9	10	12	14	15	18	15	61
$Q_{кр}=500$	1,5	1,6	0,68	0,23	3,2	3,8	4,4	5,8	7,5	7,3	8,5	4,6	16
$Q_{кр}=640$	0,60	0,72	0,22	0,06	1,7	2,2	2,7	4,0	5,3	5,0	5,5	2,2	5,8

При известном прогнозе максимального расхода  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  и уровня воды  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  на сутки  $t+1$  вероятность того, что в течение этих суток фактический максимальный расход  $Q_{max}(t+1)$  превысит критическое значение  $Q_{кр}$ , а фактический максимальный уровень воды  $H_{max}(t+1)$  превысит  $H_{кр}$ , определяется формулой (4.16), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 6.6.

Таблица 6.6. Параметры распределения вероятностей логарифма величины  $\varepsilon(t+1)$  для р. Сочи – г. Сочи

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$m_{\ln \varepsilon}$	-0,01	-0,03	-0,02	-0,03	-0,05	-0,14	-0,19	-0,32	-0,31	-0,42	-0,13	-0,12
$\sigma_{\ln \varepsilon}$	0,43	0,37	0,37	0,22	0,37	0,44	0,61	0,87	0,90	0,99	0,66	0,52

На рис. 6.3 для двух месяцев – февраля (сезон дождевых паводков) и августа (летняя межень) приведены графики функции  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$ , определяющей вероятностный прогноз максимальных расходов и уровней воды на одни сутки.

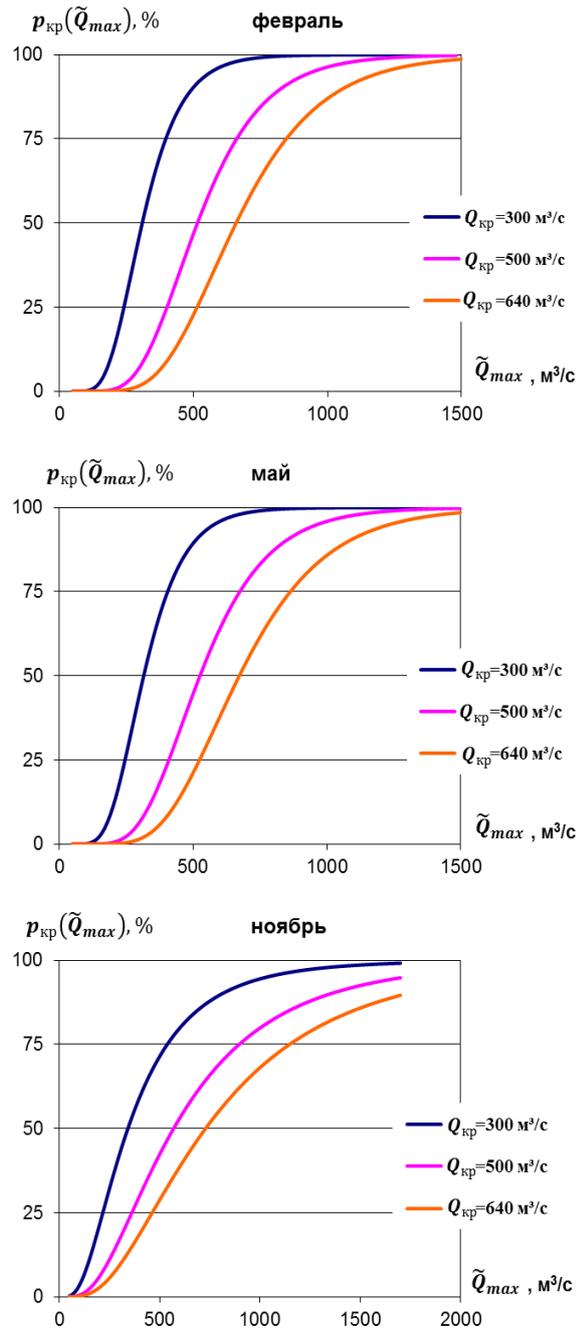


Рисунок 6.3. Графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  для февраля, мая и ноябре в створе р. Сочи – г. Сочи

Методика вероятностного прогнозирования критического значения суточного слоя осадков на метеостанции г. Сочи с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях, изложенных в главе 4. При известных на дату составления прогноза  $t$  значениях  $Q_{max}(t)$ ,  $Q_{max}(t-1)$ ,  $P(t)$ ,  $T(t)$  и прогнозе  $T(t+1)$  среднесуточной приземной температуры воздуха критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  определяется, исходя из заданной вероятности

$q$  превышения расходом и уровнем воды в створе р. Сочи – г. Сочи своих критических значений. Критический слой осадков в течение суток  $t+1$  на метеостанции г. Сочи определяется формулами (4.18), (4.21) и (4.23). Среднемесячные значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$  на метеостанции г. Сочи, соответствующие обеспеченности  $q=5\%$ , приведены в табл. 6.7 для февраля, мая и ноября.

Таблица 6.7. Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм) на метеостанции г. Сочи обеспеченностью 5% для створа р. Сочи – г. Сочи

Месяц	$Q_{кр} = 300 \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{кр} = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$	$Q_{кр} = 640 \text{ м}^3/\text{ч}$
февраль	69	124	162
май	28	56	75

7. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Мзымта – п. Красная Поляна.

Для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна использовались данные гидрометрических наблюдений за период с 1947 г. по настоящее время. Они были прерваны в 2003 г. и возобновлены в 2011 г. На основе этих данных была построена и уточнена для условий 2015 г.  $Q(H)$ , представленная на рис. 7.1.

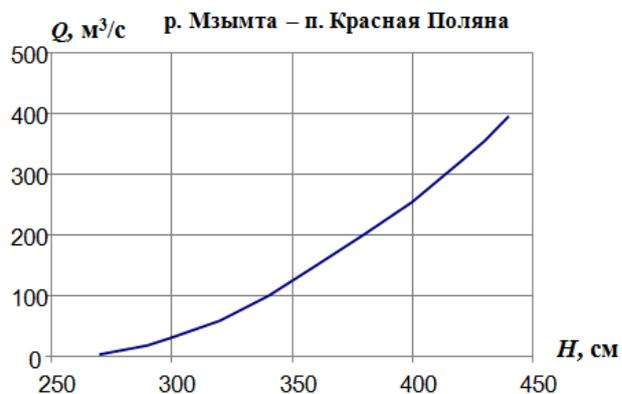


Рисунок 7.1. Кривая зависимости между расходами  $Q$  и уровнями воды  $H$  в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

При определении суточных максимумов расходов воды использовались данные самописца уровня воды за период с 1994 по 1997 и с 1999 по 2002 г. За этот же период использовались данные метеорологических наблюдений на метеостанции п. Красная Поляна, расположенной недалеко от замыкающего створа в самой нижней части водосбора на высоте  $z_0 = 550$  м. Базовый период за 8 лет включает 2761 ежесуточных совместных гидрологических и метеорологических наблюдений.

Методика прогнозирования максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна с заблаговременностью одни сутки основана на общей схеме, изложенной в главе 3. Для данного створа приняты следующие критические значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха на метеостанции: минимальная температура, при которой происходит снеготаяние  $T_{min,S} = 0^\circ\text{C}$ ; минимальная температура, при которой осадки выпадают в жидком виде  $T_{min,P} = 2^\circ\text{C}$ ; максимальное значение учитываемой температуры  $T_{max} = 25^\circ\text{C}$ .

Прогноз среднесуточного расхода воды предлагается получать по формуле (3.3), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 7.1.

Таблица 7.1. Параметры формулы (3.3) для прогноза максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
$a_0$	3,1	1,7	2,6	7,1	7,0	-16,1
$a_1$	0,93	1,12	0,90	0,88	1,08	0,88
$a_2$	-0,13	-0,26	-0,11	-0,14	-0,25	-0,08
$a_3$	-0,136	-0,007	0,066	0,151	0,097	0,018
$a_4$	0,93	0,42	-0,56	-1,69	-1,74	1,55
$a_5$	0,0393	0,0135	-0,0017	0,0149	-0,0231	0,0175
$a_6$	0,157	0,112	0,205	0,038	0,546	-0,495
$a_7$	0,04	0,08	-0,04	0,00	-2,015	4,54
$a_8$	-0,002	0,043	0,015	0,0025	-0,0565	-0,016
$a_9$	-0,40	-0,51	0,21	0,39	1,645	-0,005
$a_{10}$	0,1672	-0,0085	-0,0029	0,0113	0,0051	-0,0314
$a_{11}$	-0,543	0,031	0,048	-0,104	-0,153	0,884
$a_{12}$	0,43	-0,05	-0,10	0,38	0,45	-6,19

Продолжение таблицы 7.1

	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
$a_0$	-83,5	-32,4	-3,1	8,7	9,6	2,5
$a_1$	0,66	0,54	0,55	0,75	0,58	1,02
$a_2$	0,07	0,05	0,11	-0,13	0,05	-0,18
$a_3$	-0,112	0,047	-0,021	0,083	0,042	0,060
$a_4$	4,74	-1,33	1,00	0,08	0,31	-0,16
$a_5$	0,0516	0,0030	-0,0304	-0,1002	0,0029	0,0177
$a_6$	-1,597	-0,043	0,671	1,986	0,176	0,008
$a_7$	12,955	0,78	-2,63	-7,95	-0,14	0,24
$a_8$	-0,07	-0,128	0,002	-0,092	0,025	-0,075
$a_9$	3,555	4,99	-0,215	-0,24	-1,44	0,15
$a_{10}$	-0,0463	-0,0180	-0,0081	-0,0136	0,0075	-0,0195
$a_{11}$	1,348	0,590	0,120	0,192	-0,040	0,087
$a_{12}$	-9,53	-4,81	-0,245	-0,57	0,365	-0,1

Погрешность методики прогноза максимальных расходов воды оценивалась на независимом материале. Для этого исключались данные за один год, производилась переоценка параметров, а данные за исключенный год использовались для сравнения прогноза максимальных расходов воды с их фактическими значениями. Для оценки погрешности прогноза эта процедура производилась для всех лет базового периода. На рис. 7.2 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных максимальных расходов воды в 2002 г.

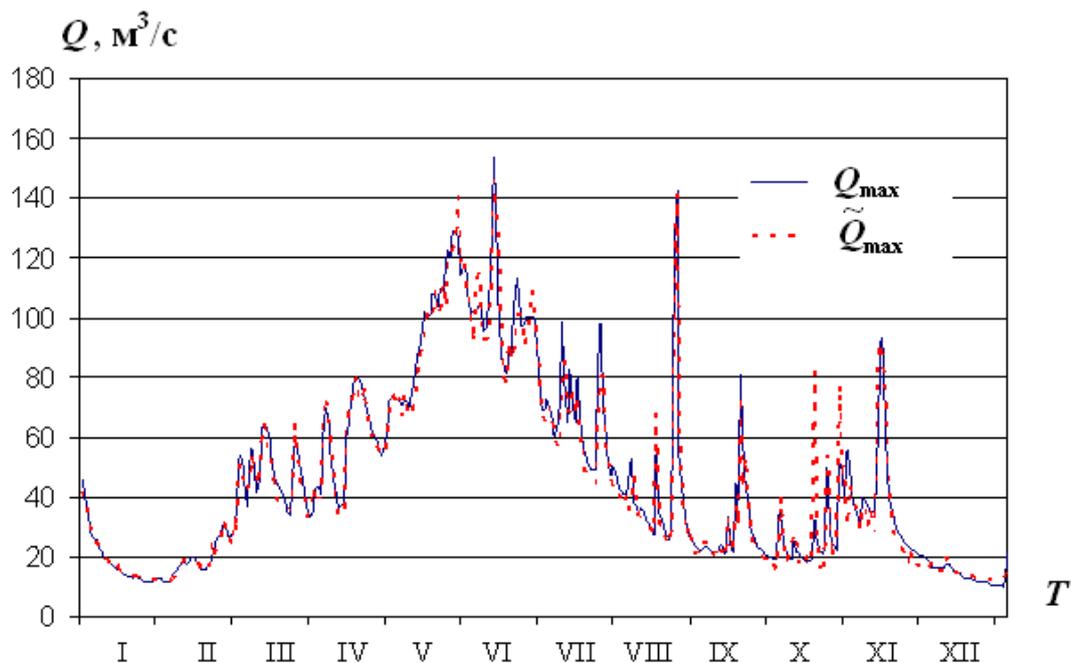


Рисунок 7.2. Графики колебаний фактических  $Q(t)$  и спрогнозированных  $\tilde{Q}(t)$  максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна в 2002 г.

Для оценки средней квадратической погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  применялась рассмотренная в главе 3 теоретическая формула (3.10). В ней учтены не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного для каждого месяца ряда наблюдений  $N = 76–128$  и числом оцениваемых параметров  $K = 13$ . В табл. 7.2 для каждого месяца приведены общее количество  $N$  использованных суток с синхронными гидрологическими и метеорологическими наблюдениями, множественный коэффициент корреляции между фактическими и прогнозируемыми значениями максимального расхода воды  $R$ , средняя квадратическая погрешность прогноза  $\sigma_{пр}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ , равный отношению  $\sigma_{пр}$  к погрешности инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$ .

Таблица 7.2. Характеристики точности и эффективности прогноза максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$N$	153	193	217	238	248	240	248	248	240	248	240	248
$R$	0,97	0,97	0,98	0,96	0,96	0,94	0,9	0,91	0,95	0,91	0,96	0,96
$\sigma_{пр}$	5,5	2,1	4,3	8,5	8,3	8,6	7,5	8,8	6,7	17,3	9,3	7,5
$\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$	0,66	0,63	0,53	0,65	0,65	0,71	0,63	0,57	0,46	0,65	0,5	0,79

В целом предлагаемая методика прогноза максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна имеет коэффициент корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями максимальных расходов воды  $R = 0,95$ ; среднюю квадратическую погрешность ошибки прогноза  $\sigma_{пр} = 8,6 \text{ м}^3/\text{с}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta} = 0,60$ . Таким образом, при условии точного метеорологического прогноза предлагаемая методика достаточно точна и эффективна по сравнению с инерционным прогнозом.

С целью проверки предлагаемой схемы получения прогноза для случаев экстремально большого увеличения расходов воды в течение суток из всего набора 2761 фактических и прогнозируемых максимальных расходов воды было выбрано 28 пар с наибольшими значениями суточного роста максимальных расходов. Таким образом, были выделены случаи увеличения расхода воды за сутки обеспеченности не выше 1%. Для них была получена оценка средней квадратической погрешности прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр} = 46,7 \text{ м}^3/\text{с}$  и показателя его эффективности  $\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta} = 0,51$ .

Прогноз максимальных  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  уровней воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна следует получать на основе прогноза максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ , используя обратное преобразование  $H(Q)$  с помощью графика на рис. 7.1. При выпуске прогноза максимальных расходов и уровней воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна в 19<sup>00</sup> по местному времени, его заблаговременность составляет 14 - 26 часов.

Методика вероятностного прогнозирования максимальных расходов и уровней воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях и результатах статистического анализа, изложенных в главе 4. Для данного речного створа соответствующие различным уровням опасности критические значения уровня и расхода воды помещены в табл. 7.4.

Таблица 7.4. Критические уровни воды  $H_{кр}$  см над «0» графика поста и соответствующие им расходы воды  $Q_{кр}$  м<sup>3</sup>/с в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

Уровень опасности	$H_{кр}$ см	$Q_{кр}$ м <sup>3</sup> /с
отметка для подачи штормовых телеграмм	360	150
отметка неблагоприятного явления	400	255
отметка опасного явления	430	355

Оценки вероятностей превышения критических расходов и уровней воды в течение всего года и каждого месяца, полученные по многолетним рядам соответствующих максимумов расхода воды, помещены в табл. 7.5.

Таблица 7.5. Вероятности превышения критических значений уровня  $H_{кр}$  и расхода воды  $Q_{кр}$  (%) в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$Q_{кр}=150$	0,7	0,4	1,4	13	22	24	6,7	7,6	5,5	11	10	8	65
$Q_{кр}=255$	0,07	0,03	0,07	0,48	0,08	1,1	0,16	1,0	0,56	2,7	2,3	1,8	10
$Q_{кр}=355$	0,01	0,00	0,01	0,02	0,00	0,05	0,01	0,21	0,09	0,90	0,77	0,61	1,1

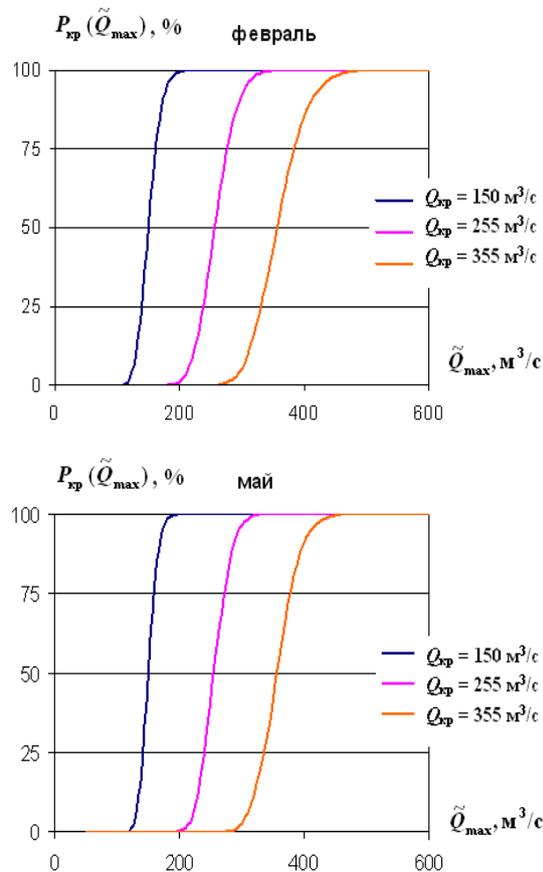
При известном прогнозе максимального расхода  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  и уровня воды  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  на сутки  $t+1$  вероятность того, что в течение этих суток фактический максимальный расход  $Q_{max}(t+1)$  превысит критическое значение

$Q_{кр}$ , а фактический максимальный уровень воды  $H_{max}(t+1)$  превысит  $H_{кр}$ , определяется формулой (4.16), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 7.6.

Таблица 7.6. Параметры распределения вероятностей логарифма величины  $\varepsilon(t+1)$  для р. Мзымта – п. Красная Поляна

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$m_{\ln \varepsilon}$	-0,01	-0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,03	-0,02	-0,02
$\sigma_{\ln \varepsilon}$	0,11	0,11	0,11	0,11	0,09	0,10	0,14	0,20	0,19	0,31	0,25	0,18

На рис. 7.3 для двух месяцев – февраля (сезон дождевых паводков) и августа (летняя межень) приведены графики функции  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$ , определяющей вероятностный прогноз максимальных расходов и уровней воды на одни сутки.



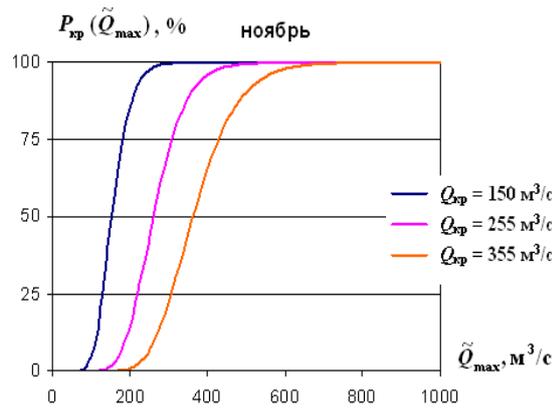


Рисунок 7.3. Графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  для февраля, мая и ноября в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

Методика вероятностного прогнозирования критического значения суточного слоя осадков на метеостанции п. Красная Поляна с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях, изложенных в главе 4. При известных на дату составления прогноза  $t$  значениях  $Q_{max}(t)$ ,  $Q_{max}(t-1)$ ,  $P(t)$ ,  $T(t)$  и прогнозе  $T(t+1)$  среднесуточной приземной температуры воздуха критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  определяется, исходя из заданной вероятности  $q$  превышения расходом и уровнем воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна своих критических значений. Критический слой осадков в течение суток  $t+1$  на метеостанции г. Сочи определяется формулами (4.18), (4.21) и (4.23). Среднемесячные значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$  на метеостанции п. Красная Поляна, соответствующие обеспеченности  $q = 5\%$ , приведены в табл. 7.7 для февраля, мая и ноября.

Таблица 7.7. Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм) на метеостанции Красная Поляна обеспеченностью 5% для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна

Месяц	$Q_{кр} = 150 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 255 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 355 \text{ м}^3/\text{с}$
февраль	434	781	1112
май	59	180	296
ноябрь	98	196	289

8. Прогнозирование максимальных расходов, уровней воды и критических осадков для р. Мзымта – п. Казачий Брод.

Для створа р. Мзымта – п. Казачий Брод использовались данные гидрометрических наблюдений за период с 1968 г. по настоящее время. На основе этих данных была построена и уточнена для условий 2015 г.  $Q(H)$ , представленная на рис. 8.1.



Рисунок 8.1. Кривая зависимости между расходами  $Q$  и уровнями воды  $H$  в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод

При определении суточных максимумов расходов воды использовались данные самописца уровня воды за период с 1992 по 1997 и с 1999 по 2002 г. и 2005 г. За этот же период использовались данные метеорологических наблюдений на метеостанции п. Красная Поляна, расположенной на высоте  $z_0 = 550$  м. Базовый период за 11 лет включает 4012 ежесуточных совместных гидрологических и метеорологических наблюдений.

Методика прогнозирования максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод с заблаговременностью одни сутки основана на общей схеме, изложенной в главе 3. Для данного створа приняты следующие критические значения среднесуточной температуры приземного слоя воздуха на метеостанции: минимальная температура, при которой происходит снеготаяние  $T_{min,S} = -2^{\circ}\text{C}$ ; минимальная температура, при которой осадки выпадают в жидком виде  $T_{min,P} = 0,5^{\circ}\text{C}$ ; максимальное значение учитываемой температуры  $T_{max} = 25^{\circ}\text{C}$ .

Прогноз среднесуточного расхода воды предлагается получать по формуле (3.3), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 8.1.

Таблица 8.1. Параметры формулы (3.3) для прогноза максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод

	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
$a_0$	5,2	7,6	3,3	-3,4	-13,8	-61,5
$a_1$	0,79	0,69	0,74	0,87	0,73	0,73
$a_2$	-0,02	-0,06	-0,05	-0,06	0,03	0,06
$a_3$	-0,052	0,105	0,103	0,031	0,087	-0,134
$a_4$	0,88	-0,67	-0,07	0,67	-1,29	7,06
$a_5$	-0,1114	-0,0621	0,0098	-0,0330	-0,0457	0,0469
$a_6$	0,910	0,596	0,075	0,522	0,962	-1,514
$a_7$	-0,18	0,42	1,80	-0,41	-3,33	13,835
$a_8$	-0,0375	-0,116	-0,012	0,05	-0,0865	0,0715
$a_9$	-0,37	1,16	0,06	-0,53	3,38	-2,015
$a_{10}$	0,1052	-0,0016	0,0566	0,0546	-0,0092	-0,0380
$a_{11}$	-0,014	0,072	-0,409	-0,574	0,179	1,093
$a_{12}$	0,13	-0,20	0,58	1,18	-0,51	-7,63
	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
$a_0$	-111,4	6,1	54,2	-24,4	19,0	14,4
$a_1$	0,64	0,52	0,45	0,61	0,56	0,66
$a_2$	0,10	0,05	0,13	0,00	0,05	-0,10
$a_3$	-0,271	0,185	0,170	-0,064	0,054	0,010
$a_4$	12,14	-7,17	-4,94	3,16	-0,40	0,56
$a_5$	-0,0199	-0,0187	0,0154	-0,0514	-0,0084	0,0323
$a_6$	0,406	0,535	-0,407	1,204	0,229	-0,306
$a_7$	0,78	-2,22	4,13	-4,74	0,95	1,59
$a_8$	0,0775	-0,214	-0,0425	-0,1465	0,0555	0,077
$a_9$	-2,29	8,125	0,035	2,095	-1,78	-1,685
$a_{10}$	-0,0071	-0,0080	-0,0191	0,0111	0,0148	0,0456
$a_{11}$	0,251	0,392	0,611	-0,260	-0,098	-0,249
$a_{12}$	-2,28	-4,45	-4,535	1,7	-0,01	0,335

Погрешность методики прогноза максимальных расходов воды оценивалась на независимом материале. Для этого исключались данные за один год, производилась переоценка параметров, а данные за исключенный год использовались для сравнения прогноза максимальных расходов воды с их фактическими значениями. Для оценки погрешности прогноза эта процедура производилась для всех лет базового периода. На рис. 8.2 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных максимальных расходов воды в 2005 г.

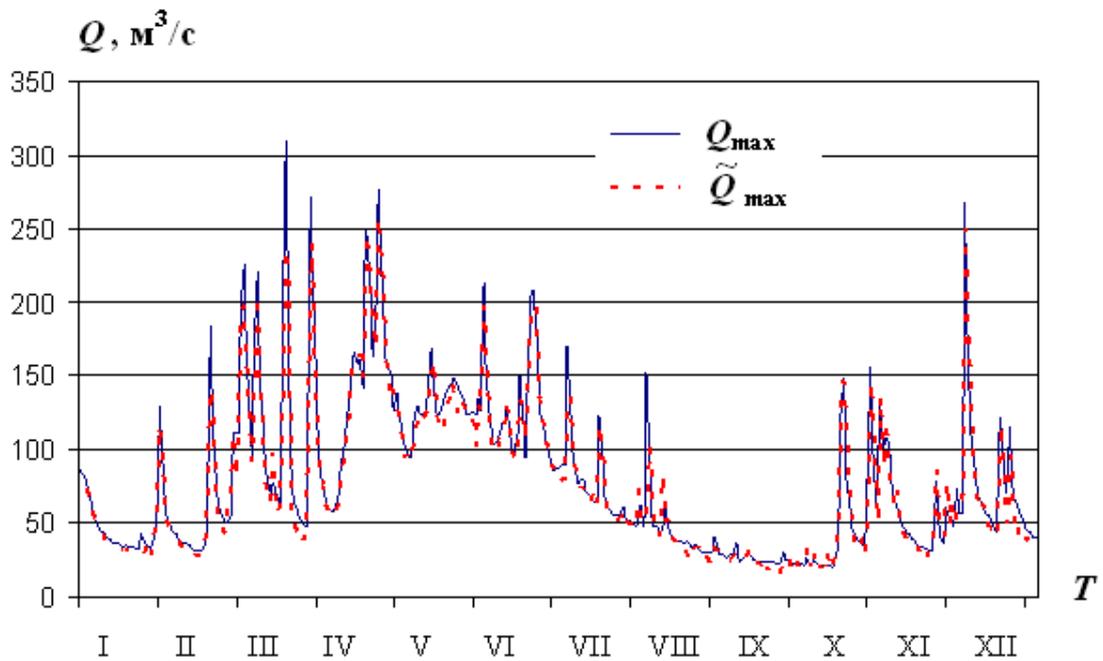


Рисунок 8.2. Графики колебаний фактических  $Q(t)$  и спрогнозированных  $\tilde{Q}(t)$  максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод в 2005 г.

Для оценки средней квадратической погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  применялась рассмотренная в главе 3 теоретическая формула (3.10). В ней учтены не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного для каждого месяца ряда наблюдений  $N = 154 - 176$  и числом оцениваемых параметров  $K = 13$ . В табл. 8.2 для каждого месяца приведены общее количество  $N$  использованных суток с синхронными гидрологическими и

метеорологическими наблюдениями, множественный коэффициент корреляции между фактическими и прогнозируемыми значениями максимального расхода воды  $R$ , средняя квадратическая погрешность прогноза  $\sigma_{пр}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ , равный отношению  $\sigma_{пр}$  к погрешности инерционного прогноза  $\sigma_{\Delta}$ .

Таблица 8.2. Характеристики точности и эффективности прогноза максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод

месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$N$	336	311	341	330	341	330	341	341	330	341	330	341
$R$	0,94	0,94	0,93	0,96	0,89	0,95	0,93	0,85	0,87	0,93	0,93	0,94
$\sigma_{пр}$	10,0	9,3	17,9	13,9	19,2	14,4	11,7	16,8	15,1	21,6	19,9	18,7
$\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$	0,73	0,53	0,59	0,65	0,76	0,63	0,58	0,62	0,57	0,55	0,56	0,53

В целом предлагаемая методика прогноза максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод имеет коэффициент корреляции между прогнозируемыми и фактическими значениями максимальных расходов воды  $R = 0,92$ ; среднюю квадратическую погрешность ошибки прогноза  $\sigma_{пр} = 15,3 \text{ м}^3/\text{с}$  и показатель эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta} = 0,60$ . Таким образом, при условии точного метеорологического прогноза предлагаемая методика достаточно точна и эффективна по сравнению с инерционным прогнозом.

С целью проверки предлагаемой схемы получения прогноза для случаев экстремально большого увеличения расходов воды в течение суток из всего набора 4012 фактических и прогнозируемых максимальных расходов воды было выбрано 40 пар с наибольшими значениями суточного роста максимальных расходов. Таким образом, были выделены случаи увеличения расхода воды за сутки обеспеченности не выше 1%. Для них была получена оценка средней квадратической погрешности прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр} = 80,5 \text{ м}^3/\text{с}$  и показателя его эффективности  $\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta} = 0,48$ .

Прогноз максимальных  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  уровней воды в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод следует получать на основе прогноза максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ , используя обратное преобразование  $H(Q)$  с помощью графика на рис. 8.1. При выпуске прогноза максимальных расходов и уровней воды в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод в 19<sup>00</sup> по местному времени, его заблаговременность составляет 14 - 26 часов.

Методика вероятностного прогнозирования максимальных расходов и уровней воды в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях и результатах статистического анализа, изложенных в главе 4. Для данного речного створа соответствующие различным уровням опасности критические значения уровня и расхода воды помещены в табл. 8.4.

Таблица 8.4. Критические уровни воды  $H_{кр}$  см над «0» графика поста и соответствующие им расходы воды  $Q_{кр}$  м<sup>3</sup>/с в створе р. Мзымта – п. Казачий

Брод

Уровень опасности	$H_{кр}$ см	$Q_{кр}$ м <sup>3</sup> /с
отметка для подачи штормовых телеграмм	300	330
отметка неблагоприятного явления	340	450
отметка опасного явления	380	585

Оценки вероятностей превышения критических расходов и уровней воды в течение всего года и каждого месяца, полученные по многолетним рядам соответствующих максимумов расхода воды, помещены в табл. 8.5.

Таблица 8.5. Вероятности превышения критических значений уровня  $H_{кр}$  и расхода воды  $Q_{кр}$  (%) в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	год
$Q_{кр} = 150$	4,7	3,4	5,1	5,9	5,1	6,6	2,5	3,0	5,5	14	12	9,1	55
$Q_{кр} = 255$	1,6	1,1	1,5	1,1	0,71	1,6	0,47	0,92	2,1	6,5	5,1	3,4	21
$Q_{кр} = 355$	0,53	0,34	0,47	0,19	0,08	0,35	0,09	0,29	0,85	2,9	2,1	1,3	5,7

При известном прогнозе максимального расхода  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$  и уровня воды  $\tilde{H}_{max}(t+1)$  на сутки  $t+1$  вероятность того, что в течение этих суток фактический максимальный расход  $Q_{max}(t+1)$  превысит критическое значение  $Q_{кр}$ , а фактический максимальный уровень воды  $H_{max}(t+1)$  превысит  $H_{кр}$ , определяется формулой (4.16), параметры которой для каждого месяца помещены в табл. 8.6.

Таблица 8.6. Параметры распределения вероятностей логарифма величины  $\varepsilon(t+1)$  для р. Мзымта – п. Казачий Брод

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$m_{\ln \varepsilon}$	-0,02	-0,02	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,03	-0,03
$\sigma_{\ln \varepsilon}$	0,18	0,17	0,23	0,13	0,13	0,12	0,15	0,26	0,28	0,29	0,27	0,27

На рис. 8.3 для двух месяцев – февраля (сезон дождевых паводков) и августа (летняя межень) приведены графики функции  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$ , определяющей вероятностный прогноз максимальных расходов и уровней воды на одни сутки.

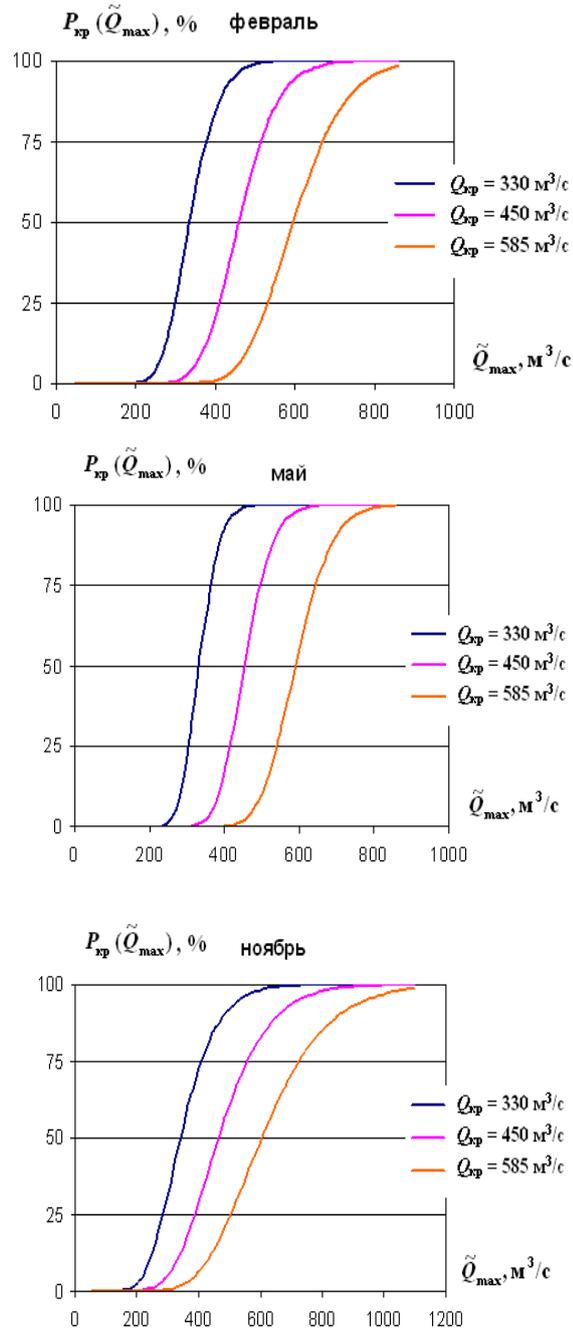


Рисунок 8.3. Графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  для февраля, мая и ноябре в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод

Методика вероятностного прогнозирования критического значения суточного слоя осадков на метеостанции п. Красная Поляна с заблаговременностью одни сутки основана на теоретических положениях, изложенных в главе 4. При известных на дату составления прогноза  $t$  значениях  $Q_{max}(t)$ ,  $Q_{max}(t-1)$ ,  $P(t)$ ,  $T(t)$  и прогнозе  $T(t+1)$  среднесуточной

приземной температуры воздуха критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$  определяется, исходя из заданной вероятности  $q$  превышения расходом и уровнем воды в створе р. Мзымта – п. Казачий Брод своих критических значений. Критический слой осадков в течение суток  $t+1$  на метеостанции г. Сочи определяется формулами (4.18), (4.21) и (4.23). Среднемесячные значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$  на метеостанции п. Красная Поляна, соответствующие обеспеченности  $q=5\%$ , приведены в табл. 8.7 для февраля, мая и ноября.

Таблица 8.7. Среднемесячные значения критического слоя осадков (мм) на метеостанции Красная Поляна обеспеченностью 5% для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна

Месяц	$Q_{кр} = 330 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 450 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q_{кр} = 585 \text{ м}^3/\text{с}$
февраль	528	751	1003
май	262	414	584
ноябрь	172	256	349