

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



*На правах рукописи*  
УДК 556.16.06 (166)

**БЕЛЯКОВА Пелагия Алексеевна**

**ПАВОДКОВЫЙ СТОК РОССИЙСКИХ РЕК ЧЕРНОМОРСКОГО  
ПОБЕРЕЖЬЯ КАВКАЗА**

Специальность 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Москва – 2015

Работа выполнена на кафедре гидрологии суши географического факультета ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»

**Научный руководитель:** **ХРИСТОФОРОВ Андрей Валентинович**  
*доктор географических наук, профессор кафедры гидрологии суши географического факультета МГУ*

**Официальные оппоненты:** **ГАРМАЕВ Ендон Жамьянович**  
*доктор географических наук, доцент, директор Байкальского института природопользования Сибирского отделения РАН*

**ЯСИНСКИЙ Сергей Владимирович**  
*доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Института географии РАН*

**Ведущая организация:** **ФГБУ «Северо-Кавказское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» (г. Ростов-на-Дону)**

Защита состоится **«03» декабря 2015 г. в 17 ч. 00 мин.** на заседании диссертационного совета Д 501.001.68 при Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, 18 этаж, аудитория 1801.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ломоносовский проспект, 27, А8. Автореферат и диссертация размещены на сайте географического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова: [www.geogr.msu.ru](http://www.geogr.msu.ru). Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения) просим направлять по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ, географический факультет, ученому секретарю диссертационного совета Д 501.001.68, e-mail: [science@geogr.msu.ru](mailto:science@geogr.msu.ru), факс: +7 495 9328836.

Автореферат разослан **«\_\_» октября 2015 г.**

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор геолого-минералогических наук, профессор

Савенко В.С.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **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. Наблюдающиеся практически в течение всего года паводки являются характерной особенностью водного режима рек ЧПК.

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 актуальным изучение условий формирования паводков и 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 в отделе 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 (1958), А.Н. Важнова (1966), S.L. Dingman (1993) и в монографии *Studies in Mountain Hydrology* (2004). Различные варианты описания этих процессов содержатся в многочисленных работах, посвященных

моделированию речного стока. Накопленный в этой области опыт обобщен в монографии Л.С. Кучмента (2008), в Руководстве по гидрологической практике Всемирной Метеорологической Организации (2009) и в подготовленной под редакцией Н.И. Алексеевского монографии «Закономерности гидрологических процессов» (2012).

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 (1989) и в подготовленном ВМО руководстве *Manual on Flood Forecasting and Warning* (2011).

Природные условия, процессы формирования стока, водный режим и наиболее выдающиеся паводки на реках Черноморского побережья Кавказа достаточно подробно рассмотрены в монографии П.М. Лурье (2002) и монографии В.Д. Панова, А.А. Базелюка и П.М. Лурье (2012). 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.

**Целью исследования** является разработка методик 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 для шести водосборов;
- 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.

**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** – система методик краткосрочного прогнозирования паводков на реках ЧПК, учитывающих закономерности их формирования и уровень гидрометеорологической изученности данного региона.

**Вклад в науку** состоит в том, что выполненное исследование демонстрирует возможность получения практически полезных 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. 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.

2. 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 прогностической зависимости для каждого месяца в отдельности обеспечивает учет изменения состояния снежного, почвенного и растительного покрова в течение года.

3. 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.

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

**Практическая значимость работы** заключается в том, 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, о чем имеется Акт о внедрении результатов диссертационной работы ФГБУ «Гидрометцентра России».

**Личный вклад автора** состоит в анализе паводкового стока рек исследуемого региона, выборе оптимального варианта формулы получения прогноза расходов и уровней воды, определении ее параметров, оценке погрешности предлагаемой методики прогнозирования, выборе оптимального распределения вероятностей и оценке его параметров при получении вероятностной формы прогноза паводков.

#### **Апробация результатов исследования**

Основные результаты работы докладывались автором 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); на региональной конференции Международного географического союза IGU-2015 (Москва, 2015).

По теме диссертации опубликовано 7 работ, в том числе 3 статьи в рецензируемых научных изданиях, 2 статьи в других научных изданиях, и 2 публикации – тезисы докладов на научных конференциях.

#### **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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, рассмотрено состояние изученности решаемой проблемы, изложены цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость работы, приведены сведения об апробации работы и о структуре и объеме диссертации.

**В первой главе** приводится общая характеристика региона, анализируются условия формирования стока и водный режим рек российской территории Черноморского побережья Кавказа. Анализ паводкового стока выполнялся для 8 речных створов, расположенных на 6 реках Черноморского побережья Кавказа. Для соответствующих водосборов в таблице 1 помещены основные морфометрические и гидрологические характеристики.

Таблица 1. Основные характеристики исследуемых водосборов

Река – пост	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Длина реки, км	Средняя высота водосбора, м	Средний годовой расход воды, м <sup>3</sup> /с
Вулан – с. Архипо-Осиповка	265	27	240	5,71
Туапсе – г. Туапсе	350	29	390	13,1
Куапсе – с. Мамедова Щель	14	6,2	380	0,72
Западный 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

Исследуемые в работе водосборы расположены на южном склоне Большого Кавказского хребта и обращены в сторону Черного моря. Расположение рассматриваемых речных створов и метеостанций показано на рисунке 1.



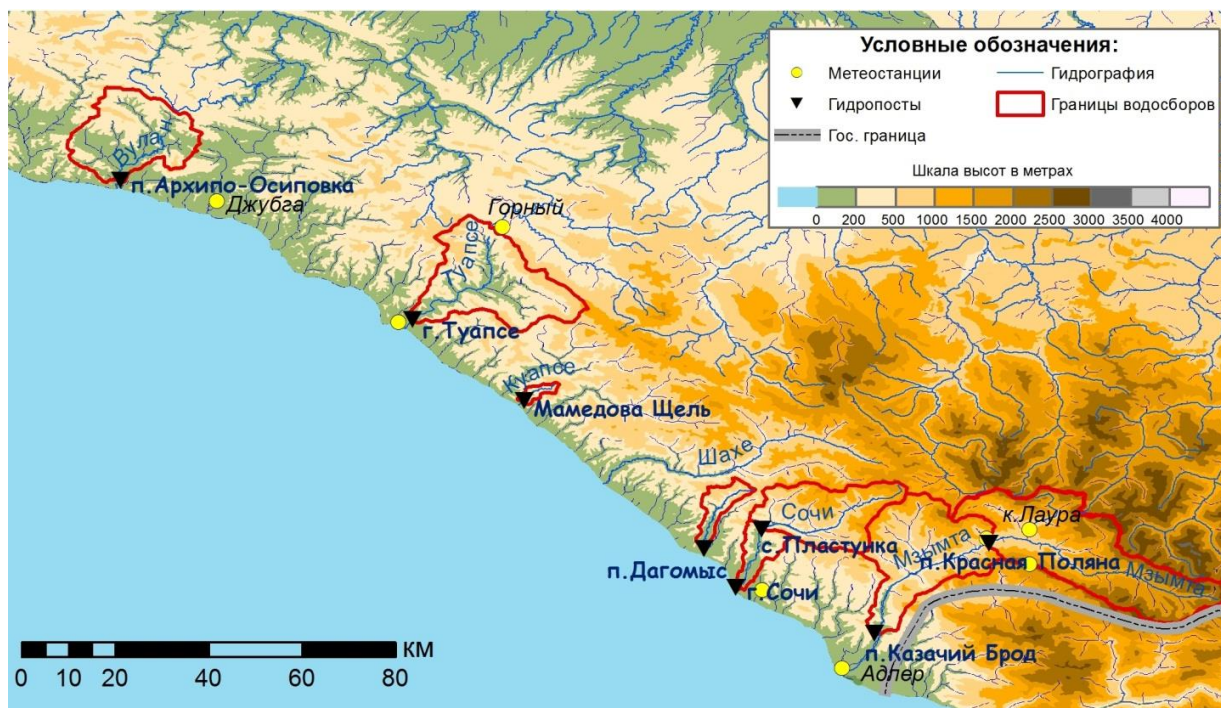


Рисунок 1 – Физико-географическое положение изучаемых рек Черноморского побережья Кавказа

Рельеф речных бассейнов в основном горный, сильно расчлененный. По мере приближения к морю рельеф приобретает холмистый характер с малыми уклонами. Развит карст, способствующий увеличению доли подземного питания и повышению минимального стока. Субтропические, буковые и каштановые леса покрывают водосборы до высот 1500–1600 м. Выше до высот 1900–2000 м произрастают темнохвойные леса. До высот 2300–2400 м расположен субальпийский пояс, еще выше – альпийский. Незначительные ледники имеются только в бассейне р. Мзымта.

Климат региона достаточно теплый и влажный. Внутригодовое распределение осадков достаточно равномерное с максимумом зимой и минимумом весной или летом. Характерна высотная поясность со значительными вертикальными градиентами температуры и осадков. На высотах менее 600–800 м зимой часто наблюдаются оттепели, приводящие к формированию снеговых и смешанных паводков. На высотах более 2000 м жидкие осадки выпадают только с апреля по ноябрь. В зависимости от высоты

местности и экспозиции склонов суточный слой осадков может достигать 100–300 мм. Неустойчивый снежный покров и бесснежные зимы наблюдаются на высотах до 600–1300 м. Выше до высот 3200 м наблюдается переменный снежный покров с продолжительностью залегания более 120 дней.

Питание рек преимущественно дождевое и может достигать 90% (р. Вулан). С увеличением высоты водосбора его доля снижается, а доля снегового питания, наоборот, возрастает и может достигать 40% (р. Мзымта). Подземное питание значительно и составляет 15–30%. Ледниковое питание практически отсутствует. Весенне-летнее снеговое половодье характерно только для наиболее крупных рек Мзымта и Сочи с наибольшими высотами водосборов.

Дождевые и тало-дождевые паводки наблюдаются в течение всего года, придают гидрографу гребенчатый вид и в отдельные годы могут приводить к опасным наводнениям. Представление о колебаниях водности реки и влиянии на него хода метеорологических элементов демонстрирует рисунок 2, на котором представлены сосмещенные графики колебаний ежедневных среднесуточных расходов воды р. Вулан, суточного слоя осадков и среднесуточной температуры воздуха.

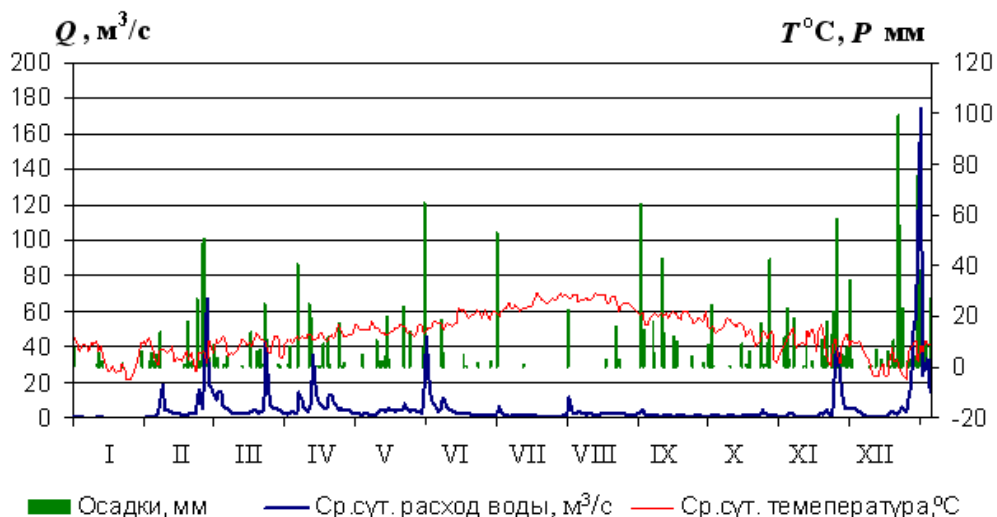


Рисунок 2 – Гидрограф р. Вулан – с. Архипо-Осиповка и ход осадков и температуры воздуха на метеостанции Джубга в 2001 г.

Отмеченные в ряде публикаций [Битюков и др., 2011; Панов и др., 2012] изменения климатических условий рассматриваемого региона выражаются в повышении с начала 1970-х годов температуры воздуха, количества атмосферных осадков и в сокращении продолжительности залегания снежного покрова. Анализ многолетних колебаний годовых максимумов расхода воды показал статистически достоверную тенденцию к их росту.

Полученные в главе 1 результаты подтверждают выводы других авторов об увеличении максимального стока и частоты опасных наводнений в исследуемом регионе в последние годы [Магрицкий, 2013; Ткаченко, Волосухин, 2013; Экстремальные гидрологические..., 2010]. Предполагается дальнейший рост числа экстремально обильных осадков и, следовательно, опасных дождевых паводков, в связи с ожидаемым увеличением возникновения интенсивной фронтальной зоны над Черноморским побережьем Кавказа [Матвеева и др., 2013].

**Во второй главе** на основе анализа процессов формирования паводков на реках Черноморского побережья Кавказа определена возможная заблаговременность их прогнозирования, рассмотрены различные подходы к краткосрочному прогнозированию талого и дождевого стока горных рек и изложена региональная модель, которая описывает эти процессы и положена в основу предлагаемой методики.

Основными процессами формирования речного стока являются поступление воды на поверхность водосбора за счет выпадения дождей и таяния снежного покрова, потери талых и дождевых вод, а также стекание воды по склонам и по русловой сети. 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.

Малые размеры исследуемых водосборов и большие уклоны способствуют быстрому формированию паводков в течение нескольких часов. Анализ данных самописца уровней воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна и плувиографа на метеостанции п. Красная Поляна показал, что даже для этого наиболее крупного водосбора время формирования пика достаточно высоких паводков не превышает одних суток. В сочетании с отсутствием снегомерных съемок и ограниченными возможностями прогнозирования хода осадков в течение значительного интервала времени это приводит к тому, что заблаговременность прогноза паводков не превышает одни сутки.

Для описания процессов формирования паводков на реках Черноморского побережья Кавказа использована региональная модель, разработанная под руководством А.В. Христофорова в отделе речных гидрологических прогнозов ФГБУ «Гидрометцентр России». Эта 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.

Средний слой поступления дождевых вод на поверхность водосбора определялся в зависимости от суточного слоя осадков и среднесуточной температуры приземного слоя воздуха на метеостанции. Учитывалось, что от температуры воздуха зависят потери на испарение, площадь и средняя высота части водосбора, на которой происходит поступление дождевых вод, а следовательно, при больших вертикальных градиентах осадков, и их средний для этой части водосбора слой. Для каждого водосбора подбиралась минимальная температура  $T_{min,P}$ , при которой еще не происходит поступления дождевых вод на его поверхность.

В виду отсутствия информации о состоянии снежного покрова средний слой поступления талых вод на поверхность водосбора косвенно характеризовался только среднесуточной температурой приземного слоя воздуха, от которой зависит интенсивность снеготаяния и площадь водосбора,

на которой оно происходит. Для каждого водосбора подбиралась минимальная температура  $T_{min,S}$ , при которой еще не происходит поступления талых вод на его поверхность.

При описании процессов формирования склонового стока учитывалось, что для рек рассматриваемого региона потери на поверхностное задержание незначительны. На участках с луговой растительностью и с толщами моренных отложений быстро образуется поверхностный и подповерхностный склоновый сток. На оставшейся части водосбора формируются сравнительно большие потери на пополнение запасов почвенной влаги и подземных вод [Экспериментальные..., 1968]. При оценке этих потерь рассчитывался средний индекс увлажнения водосбора, равный разности между суммарным поступлением талых и дождевых вод на поверхность водосбора и объемом склонового стока за предшествующие сутки. Средний расход склонового стока определялся в зависимости от соотношения между слоем поступления воды на поверхность водосбора и максимально возможным слоем поступления влаги в почву при заданном индексе увлажнения водосбора. При описании трансформации склонового и руслового стока использовался шаг в одни сутки. Необходимые для расчета индекса увлажнения водосбора расходы склонового стока выражались через расходы воды в замыкающем створе за те же и предшествующие сутки. Расход воды в замыкающем створе определялся в зависимости от текущего среднего по всему водосбору расхода склонового стока и расходов воды в замыкающем створе за предшествующие сутки.

Данная модель использовалась в качестве основы для предлагаемой методики краткосрочного прогнозирования паводков на реках Черноморского побережья Кавказа.

**В третьей главе** излагается методика получения ежедневного прогноза расходов и уровней воды с заблаговременностью одни сутки. При ее разработке использовались данные ежедневных гидрологических наблюдений в восьми створах и метеорологических наблюдений на расположенных в исследуемом регионе станциях. В окончательном варианте учитывались данные четырех

метеостанций: п. Джубга – для р. Вулан; г. Туапсе – для р. Туапсе; г. Сочи – для рек Западный Дагомыс и Сочи; п. Красная Поляна – для р. Мзымта. Для р. Куапсе использовались средние арифметические значения данных метеостанций в городах Туапсе и Сочи. Данные других метеостанций не учитывались в связи с их высокой корреляцией с данными четырех основных метеостанций. Число лет гидрологических наблюдений варьирует от 35 до 80. Число лет  $n$  совместных гидрологических и метеорологических наблюдений варьирует от 8 до 20.

Прогноз ожидаемых значений осадков и температуры воздуха осуществлялся с помощью усваиваемых в оперативном режиме моделей «РЕГИОН», UKMO, NCEP и COSMO-RU07. При получении прогноза для каждой из четырех используемых метеостанций использовалась билинейная интерполяция метеорологических элементов по узлам сетки метеорологической модели с учетом высоты местности в этих узлах и метеостанции. Использовалось средневзвешенное значение прогнозов по всем четырем моделям для каждого метеорологического элемента. Коэффициенты корреляции между фактическими и прогнозируемыми значениями для каждой метеостанции варьируют в пределах от 0,98 до 0,99 для среднесуточной температуры приземного слоя воздуха и от 0,71 до 0,89 для суточного слоя осадков.

При прогнозировании расхода воды  $\tilde{Q}(t+1)$  на следующие сутки 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 воздуха, видом прогностической зависимости и продолжительностью периода постоянства ее параметров. Сравнение вариантов осуществлялось на основе оценок их погрешности прогноза. В результате была получена единая оптимальная формула получения прогноза ожидаемого на следующие сутки расхода воды:

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

Применение формулы предполагает соблюдение следующих правил:

- значения  $T(t+1)$  и  $T(t)$ , превышающие  $T_{max}$ , должны заменяться числом  $T_{max}$ ;
- если значения  $T(t+1)$  или  $T(t)$  оказываются меньше  $T_{min,S}$ , их следует заменять числом  $T_{min,S}$  (отсутствие поступления талых вод);
- если значения  $T(t+1)$  или  $T(t)$  оказываются меньше  $T_{min,P}$ , в формуле (1) значения  $P(t+1)$  или  $P(t)$  следует заменять нулем (отсутствие поступления дождевых вод).

Для оборудованных самописцами створов на р. Мзымта аналогичная формула может быть использована для получения прогноза суточного максимума расхода воды. Для остальных шести речных створов прогноз ожидаемого на следующие сутки максимального расхода воды предлагается находить в виде  $\tilde{Q}_{max}(t+1) = \bar{k} \tilde{Q}(t+1)$ , где  $\bar{k}$  рассчитанное для каждого месяца среднее многолетнее отношение месячных максимумов к соответствующим среднесуточным расходам воды. Параметры формулы (1) косвенно учитывают характеристики процессов формирования речного стока. Оценка этих параметров выполнялась методом наименьших квадратов для каждого месяца

на основе соответствующих ему данных многолетних гидрологических и метеорологических наблюдений. Для получения прогноза максимальных уровней воды должна использоваться регулярно уточняемая кривая расходов  $Q(H)$ .

Погрешность методики прогноза среднесуточных и максимальных расходов воды оценивалась на независимом материале. На рисунке 3 приведены совмещенные графики колебаний фактических и спрогнозированных максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна в 2002 г.

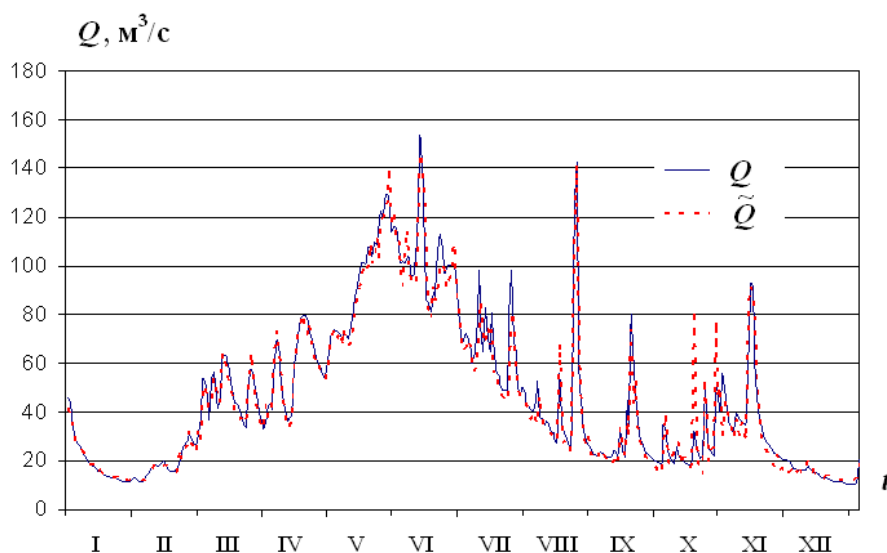


Рисунок 3 – Фактические ( $Q$ ) и спрогнозированные ( $\tilde{Q}$ ) колебания максимальных расходов воды в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна в 2002 г.

Для оценки погрешности прогноза  $\sigma_{пр}$  также использовалась теоретическая формула А.В. Христофорова, которая учитывает не только разности между фактическими и прогнозируемыми расходами воды, но и соотношение между длиной использованного ряда наблюдений и числом оцениваемых параметров. В формулу (1) входит 13 параметров. При их оценке для каждого месяца использовались данные ежедневных наблюдений, число



которых  $N$  равно числу дней в каждом месяце, умноженному на число лет базового периода  $n$ , и для разных речных створов варьирует от 225 до 620.

В таблице 2 помещены значения множественного коэффициента корреляции для предлагаемых прогностических зависимостей  $R$ , их погрешности  $\sigma_{пр}$  и показателя эффективности прогноза  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$ , равного отношению погрешности прогноза по предлагаемой методике к погрешности инерционного прогноза. 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.

Таблица 2. Характеристики точности и эффективности методики прогноза

Река, створ	$n$	$\sum_{i=1}^{12} N_i$	$R$	$\sigma_{пр} \text{ м}^3/\text{с}$	$\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$	$\tilde{N}$	$\tilde{\sigma}_{пр} \text{ м}^3/\text{с}$	$\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta}$
р. Вулан	20	7238	0,78	6,4	0,56	72	51,9	0,56
р. Гуапсе	9	3189	0,86	14,2	0,53	31	79,8	0,44
р. Куапсе	19	6691	0,80	0,85	0,62	68	7,4	0,57
р. Зап. Дагомыс	17	6204	0,76	3,3	0,59	62	24,3	0,56
р. Сочи - с. Пласт.	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. К. П.	8	2761	0,95	8,6	0,60	28	46,7	0,51
р. Мзымта - п. К. Б.	11	4012	0,92	15,3	0,60	40	80,5	0,48

В целях определения погрешности методики при прогнозировании наиболее высоких паводков был выделен 1% случаев с максимальным увеличением расхода воды за сутки. Для каждого речного створа число таких паводков  $\tilde{N}$ , погрешность их прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр}$  и показатель эффективности такого прогноза  $\tilde{\sigma}_{пр} / \tilde{\sigma}_{\Delta}$  также помещены в таблице 2. Эти данные свидетельствуют о том, что для случаев экстремально большого увеличения расходов воды за одни

сутки погрешность прогноза таких высоких паводков  $\tilde{\sigma}_{пр}$  значительно больше средней  $\sigma_{пр}$ , однако их эффективность выше средней.

Согласно Наставлениям по службе прогнозов при оценке точности и эффективности методики использовались не прогнозируемые, а фактические значения температуры воздуха  $T(t+1)$  и осадков  $P(t+1)$  за следующие сутки. Переход от этих значений к их метеорологическому прогнозу приводит к увеличению погрешности методики в среднем на 15%. Однако эффективность методики остается удовлетворительной, так как отношение  $\sigma_{пр} / \sigma_{\Delta}$  не превышает 0,80. Таким образом, благодаря малой заблаговременности прогноза в одни сутки, вклад ошибок метеорологических прогнозов в суммарную погрешность гидрологических прогнозов невелик.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предлагаемая методика прогноза достаточно надежна и эффективна для всех рассматриваемых бассейнов рек Черноморского побережья Кавказа.

**Четвертая глава** посвящена разработке методики получения прогноза паводков в вероятностной форме. Для каждого из восьми рассматриваемых створов местными административными органами заданы три критических значения уровня воды  $H_{кр}$ , соответствующие различным уровням опасности: отметка для подачи штормовых телеграмм; отметка неблагоприятного явления; отметка опасного явления. Этим уровням соответствуют критические значения расхода воды  $Q_{кр}$ , определяемые по регулярно уточняемым зависимостям  $Q(H)$ .

Прогнозирование наводнений в вероятностной форме с заблаговременностью одни сутки состоит в определении вероятности превышения критических уровней  $H_{кр}$  и расходов воды  $Q_{кр}$  в течение следующих суток  $t+1$  в зависимости от уже полученного прогноза максимального расхода воды  $\tilde{Q}_{max}(t+1)$ . При отсутствии самописцев прогноз максимального расхода воды выражается через прогноз среднесуточного расхода в виде  $\tilde{Q}_{max}(t+1) = \bar{k} \tilde{Q}(t+1)$ .

Методика получения таких прогностических вероятностей основана на результатах статистического анализа ошибок прогноза. Установлено, что для всех речных створов логарифм ошибки прогноза максимального расхода воды практически не зависит от значения этого прогноза. В пределах каждого месяца колебания этой величины можно считать стационарными и подчиняющимися нормальному распределению вероятностей. Математическое ожидание  $m_{\ln \epsilon}$  и среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{\ln \epsilon}$  оценивались для каждого месяца с учетом автокорреляции используемых рядов и соотношения между их продолжительностью и числом параметров формулы получения прогноза.

В зависимости от полученного прогноза максимального расхода воды на следующие сутки  $\tilde{Q}_{max}$  вероятность превышения критических расходов и уровней воды в течение этих суток предлагается находить по формуле:

$$p_{кр}(\tilde{Q}_{max}) = 1 - \Phi\left(\frac{\ln Q_{кр} - \ln \tilde{Q}_{max} - m_{\ln \epsilon}}{\sigma_{\ln \epsilon}}\right), \quad (2)$$

где  $\Phi(x)$  – функция Лапласа нормального распределения вероятностей с нулевым математическим ожиданием и единичной дисперсией. На рисунке 4 для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна приведены графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  в ноябре, наиболее опасном месяце с точки зрения наводнений.

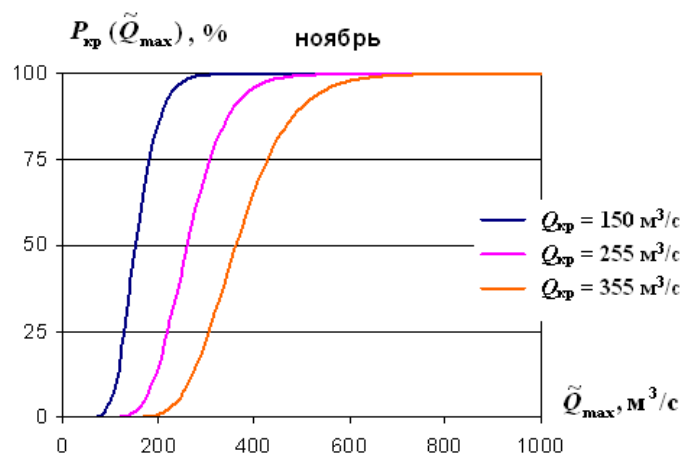


Рисунок 4 – Графики функции прогностической вероятности  $p_{кр}(\tilde{Q}_{max})$  для ноября в створе р. Мзымта – п. Красная Поляна

Предлагаемая методика позволяет оценивать риск прохождения опасных паводков в зависимости от гидрометеорологической информации, располагаемой на дату составления прогноза.

Используя формулы (1) и (2) можно 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. При практически безошибочном прогнозировании температуры  $T(t+1)$  все входящие в формулу (1) предикторы можно считать известными за исключением ожидаемого в течение следующих суток на метеостанции слоя осадков  $P(t+1)$ .

Для заданной вероятности риска  $q = 1\% - 10\%$  ожидаемый в течение суток  $t+1$  на метеостанции критический слой осадков  $\tilde{P}_{кр}(q)$ , при котором превышение критических расходов и уровней воды может произойти с заданной вероятностью  $q$ , определяется формулой:

$$\tilde{P}_{кр}(q) = \frac{Q_{кр} \exp(-m_{ин\epsilon} - X_q \sigma_{ин\epsilon}) - \bar{k}B(t+1)}{\bar{k}A(t+1)}, \quad (3)$$

где  $X_q$  – квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности его превышения  $q$ . При известных значениях остальных предикторов входящие в формулу (3) значения  $A(t+1)$  и  $B(t+1)$  определяются, как

$$A(t+1) = a_5[T(t+1) - T_{min,P}]^2 + a_6[T(t+1) - T_{min,P}] + a_7, \quad (4)$$

$$B(t+1) = a_0 + a_1 Q_{max}(t) + a_2 Q_{max}(t-1) + a_3 [T(t+1) - T_{min,S}]^2 + a_4 [T(t+1) - T_{min,S}] + \\ + a_8 [T(t) - T_{min,S}]^2 + a_9 [T(t) - T_{min,S}] + a_{10} P(t) [T(t) - T_{min,P}]^2 + a_{11} P(t) [T(t) - T_{min,P}] + \\ + a_{12} P(t). \quad (5)$$

Для оборудованных самописцами створов на р. Мзымта прогноз максимальных расходов воды получается непосредственно по формуле (1), поэтому значение коэффициента  $\bar{k}$  в формуле (1) следует заменять единицей. В таблице 3 для створа р. Мзымта – п. Красная Поляна приведены значения критического суточного слоя осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$  на метеостанции п. Красная

Поляна, соответствующие обеспеченности  $q=5\%$ . Расчет этих значений по формуле (3) 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 3. Значения критического слоя осадков ( $P_{max}$ , мм) 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

Эти данные показывают, что в условиях зимней межени (февраль) критические значения расхода воды практически недостижимы. В период талодождового половодья (май) и в период прохождения дождевых паводков (ноябрь) с вероятностью 5% первые два критических значения расходов воды  $Q_{кр}$  могут быть превышены при не слишком большом суточном слое осадков  $\tilde{P}_{кр}(5\%)$ .

**В заключении** приведены основные результаты диссертационного исследования, сформулированы следующие выводы работы.

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. 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.

5. 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.

6. 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.

7. Предлагаемая система методик прогнозирования паводкового стока успешно прошла проверку в оперативном режиме и применяется в рамках автоматизированной системы предупреждения опасных наводнений на реках Черноморского побережья Кавказа.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. 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.

2. *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.

3. Христофоров А.В., Юмина Н.М., *Белякова П.А.* Прогноз паводкового стока рек Черноморского побережья Кавказа с заблаговременностью одни сутки // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, География. – 2015. – № 3. – С. 50–57.

### Статьи в других научных изданиях

4. *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.

5. *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.

**Тезисы докладов на научных конференциях**

6. **Белякова П.А.** Прогнозирование паводков на российских реках Черноморского побережья Кавказа // Вопросы гидрологии, геоэкологии и охраны водных объектов: материалы межрегион. науч.-практ. конф. студ., магистров и аспирантов (10-12 ноября 2014 г.) / под ред. А.Б. Китаева, О.А. Березиной; Пермь: Перм. гос. нац. иссл. ун-т. – 2014. – С. 17–22.

7. **Белякова П.А.** Особенности прогнозирования опасных паводков на реках Черноморского побережья Кавказа (в пределах России) // Сб. трудов третьей открытой конференции научно-образоват. центра «Речной сток: пространственно-временная изменчивость и опасные гидрологические явления». М.: Кафедра гидрологии суши, ИВП РАН. – 2014. – С. 184–185.