

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
(РГГМУ)



На правах рукописи
УДК [556.166.048:627](292.2)

Шевнина Елена Валентиновна

ДОЛГОСРОЧНАЯ ОЦЕНКА СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МАКСИМАЛЬНОГО СТОКА НА ТЕРРИТОРИИ РОССИЙСКОЙ АРКТИКИ

Специальность: 25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Санкт Петербург – 2015

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете

Научный консультант: доктор технических наук, профессор, з. д. н. РФ
Коваленко Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Менжулин Геннадий Викторович

доктор технических наук, профессор
Михалев Михаил Андреевич

доктор технических наук
Сольский Станислав Викторович

Ведущая организация: Институт водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН

Защита диссертации состоится 26 ноября 2015 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д212.197.02 Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу: 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, 98

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан «26 октября» 2015 г.

Заслуженный работник высшей школы РФ,
Ученый секретарь специализированного совета,
профессор, кандидат географических наук



Воробьев В.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В работе сформулирован комплекс научных положений о порядке расчета статистических характеристик многолетнего максимального стока в условиях неустановившегося климата при подготовке гидрологического обоснования строительного проектирования гидротехнических сооружений на арктических территориях.

Актуальность темы. В последние десятилетия увеличилось число техногенных аварий, связанных с природными стихийными бедствиями: ураганами, засухой, наводнениями. Мировое научное сообщество признает факт наличия изменений в климатической системе планеты и предлагает сценарии климата в будущем (IPCC, 2013). Особое внимание уделяется практическому применению результатов научных исследований для повышения надежности строительного проектирования в условиях меняющегося климата (Madsen et al., 2013).

Стратегия развития арктической зоны Российской Федерации (Государственная программа, 2014) предусматривает широкомасштабное развитие социально-экономической инфраструктуры, позволяющей добывать, перерабатывать и транспортировать природные ресурсы Арктики. Учитывая высокую стоимость строительных проектов в труднодоступных районах Севера, задача разработки научных основ расчетов обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате является своевременной.

В работе рассматривается многолетний максимальный сток, поскольку его характеристики используются при проектировании трубопроводов, мостовых переходов, водопропускных и водозаборных сооружений нефте- и газодобывающих и перерабатывающих предприятий (см., например: СП 35.13330.2011). Максимальный сток на арктической территории формируется в период весенне-

го половодья.

Стратегическое значение арктических территорий (Государственная программа РФ, 2014) и необходимость разработки научного обеспечения защиты социально-экономических объектов (Водная стратегия РФ, 2009) в условиях меняющегося климата делает работу актуальной в современных условиях.

Степень разработанности проблемы. Развитие методов оценки статистических характеристик многолетнего стока началось в начале прошлого столетия. С началом индустриализации в СССР для нужд строительства требовались сведения о режиме стока, в том числе при отсутствии данных наблюдений. Впервые вопрос о вероятностных характеристиках колебаний многолетнего стока обсуждался Д.И. Кочериным в 1928 году на II Гидрологическом съезде. Позднее в работе (Кочерин, 1932) были представлены первые обобщения данных наблюдений за стоком в виде карты нормы годового стока и предложены методы оценки его многолетней изменчивости. В 1930 году Д.Л. Соколовский в работе «О применении кривых распределения к установлению вероятных колебаний годового стока рек Европейской части СССР» предложил использовать решения уравнения Пирсона для расчетов гидрологических величин редкой повторяемости.

В дальнейшем разработка теории применения математической статистики и кривых распределения в гидрологических и водохозяйственных расчетах была продолжена М.А. Великановым, С.Н. Крицким, М.Ф. Менкелем, Г.Н. Бровковичем, А.В. Рождественским и другими. Опыт применения методов статистической обработки многолетних рядов наблюдений за стоком позволил сформулировать ряд нормативных документов, регламентирующих порядок гидрологических расчетов в строительном проектировании. В 1972 году строительные нормы были сведены в единый документ «Указания по определению расчетных гидрологических характеристик», который уточнялся в 1983 (СНиП

2.01.14-83) и 2004 (СП 33-101-2003) годах. Подобные нормативные документы существуют во многих странах, например, в США для расчетов максимальных расходов редкой повторяемости используется «Guideline for determining flood flow frequency: Bulletin 17–B» (IACWD, 1982).

Все нормативные документы базируются на предположении о том, что процесс формирования основных видов многолетнего стока является статистически стационарным, а следовательно, ретроспективные наблюдения являются репрезентативными для представления режима стока на период эксплуатации объекта строительства. Гипотеза стационарности была подтверждена анализом данных наблюдений до 1975 года (Пространственно-временные колебания, 1988). За этот период данные были обобщены наиболее полно, с применением единых методик, разработанных в Государственном гидрологическом институте (ГГИ).

Однако, в последние годы гипотеза стационарности подвергается сомнению (Milly et al., 2008). Сценарии изменения климата широко применяются для получения глобальных и региональных оценок изменения среднегодового стока, его внутригодового распределения (Георгиевский и др., 2012; Алексеевский и др., 2011; Добровольский, 2011; Шикломанов и др., 2007), а также наводнений редкой повторяемости (Hirabayashi, 2013). Такие оценки получены для бассейнов отдельных рек с применением гидрологических моделей (Vinogradov et al., 2011), иногда дополненных генератором погоды (Гельфан, 2007). В ряде стран результаты таких исследований используются в практике проектирования для оценки риска возникновения экстремальных наводнений и утверждены как нормативные документы на государственном и/или региональном уровне (Madsen et al., 2013). В России в последние десятилетия коллективом авторов ГГИ был выпущен ряд Методических рекомендаций (2007, 2008, 2009), которые дополняют СП 33-101-2003, в том числе в части рекомендаций по оценке расчетных зна-

чений по неоднородным рядам наблюдений (2010). Однако, такие рекомендации не предлагают путей учета влияния климата на режимные характеристики основных видов многолетнего стока.

Одновременно с появлением в конце 80-х годов дискуссий о наличии изменений климата, теория Д.Л. Соколовского о применимости уравнения Пирсона для описания режима многолетнего стока получила развитие в работах В.В. Коваленко (1993). Были сформулированы основные принципы применения уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), обобщающего уравнение Пирсона на случай нестационарного случайного процесса, для оценки кривых распределения многолетнего стока на основе сценариев изменения климата (Коваленко, 1993). Результаты этих исследований позволили подготовить «Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустойчивом климате» (2010), которые выполняют роль рекомендательного дополнения к СП 33-101-2003. В рекомендациях (2010) представлена методика оценивания норм и коэффициентов вариации максимального стока на основе климатических сценариев, которая, однако, имеет невысокую достоверность при использовании ее для расчета обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений на северных территориях.

В настоящей диссертационной работе сформулированы научно-технические положения подготовки гидрологического обоснования строительных проектов в арктическом регионе в условиях неустойчивого климата. Разработан комплекс рекомендаций о порядке расчетов статистических характеристик максимального стока с учетом изменений климата. По данным климатических сценариев, полученным с использованием моделей общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), выделены районы, где значения ожидаемых максимальных расходов малой обеспеченности существенно отличаются от истори-

ческих. Предложена методика оценки экономической эффективности сценарных оценок статистических характеристик максимального стока при рассмотрении проектных решений строительства объектов транспортной инфраструктуры на основе традиционных показателей технико-экономического обоснования.

Целью исследования является разработка комплекса научно-технических решений для расчетов статистических характеристик максимального стока на основе квазиравновесных климатических сценариев с учетом специфики арктических территорий, который позволяет выявлять географическое распространение зон повышенной чувствительности статистических характеристик стока весеннего половодья к изменениям климата.

При этом решались следующие **задачи**:

- научное обоснование выбора базовой математической модели для расчетов статистических характеристик многолетнего максимального стока на основе климатических сценариев;
- подготовка исходных гидрометеорологических данных за ретроспективный период и получение сценарных оценок климатических характеристик на будущее;
- научное обоснование и разработка эффективного метода задания климатического воздействия при расчетах статистических характеристик максимального стока;
- разработка алгоритмов учета изменений свойств подстилающей поверхности при параметризации модели формирования максимального стока;
- научно-техническое обоснование достоверности расчетов статистических характеристик многолетнего максимального стока для верификации на ретроспективном материале;
- технические расчеты статистических характеристик многолетнего максимального стока по климатическим сценариям для территории Российской

Арктики;

– научно-техническое обоснование рекомендаций по учету изменения климата при строительном проектировании в регионах, где ожидаются существенные изменения статистических характеристик максимального стока;

– научно-техническое обоснование экономической эффективности применения предложенного комплекса рекомендаций для расчета статистических характеристик максимального стока при решении задач строительного проектирования социально-экономической инфраструктуры Российской Арктики.

Предметом исследования является режим многолетнего максимального стока весеннего половодья, который характеризуется статистическими моментами трехпараметрического распределения Пирсона III типа.

Объектом исследования является территория Российской Арктики в пределах водно-ресурсной границы (Иванов и др., 1991). Российская Арктика включает территорию арктической зоны РФ, выделенную решением Государственной комиссии по делам Арктики 1989 года. В нее входят территории Ненецкого, Ямало-Ненецкого, Таймырского (Долгано-Ненецкого), Чукотского автономных округов (полностью) и частично территории Республики Саха (Якутия), Красноярского края, Архангельской и Мурманской областей (Решение, 1989).

Методологическая, теоретическая и эмпирическая база исследований.

В качестве методов исследования привлекались приемы математической статистики (обработка случайных последовательностей, критерии значимости) при решении инженерных задач (Свешников, 2007) и математического моделирования (уравнения Пирсона и Фоккера–Планка–Колмогорова) для расчета статистических характеристик основных видов многолетнего стока на основе климатических сценариев. В качестве исходных данных использовались многолетние ряды гидрометеорологической информации за период с начала наблюдений до

2008 года, полученные из официальных изданий Росгидромета. Сценарные оценки изменения климата до 2100 года получены по результатам численных экспериментов МОЦАО для климатических сценариев, рекомендуемых Межправительственной группой экспертов по изменению климата (МГЭИК). Научная обоснованность и достоверность положений и выводов подтверждается статистической оценкой промежуточных и окончательных результатов, а также согласованностью модельных и экспериментальных данных, полученных для ретроспективного периода.

Научные результаты, выносимые на защиту. На защиту выносятся полученные лично автором следующие новые научно-технические результаты.

1. Математическое обоснование и программное обеспечение для расчета численных критериев локализации дат начала и окончания периода половодья.

2. Научное обоснование необходимости разработки региональных рекомендаций для расчета обеспеченных максимальных расходов при неустановившемся климате, основанное на результатах статистического анализа многолетних рядов стока весеннего половодья на территории Российской Арктики.

3. Система научно обоснованных рекомендаций для расчетов статистических характеристик многолетнего максимального стока на арктических территориях в условиях меняющегося климата, включая метод задания сценарной климатической информации в модели формирования стока, методы ее параметризации и оценки ретроспективных прогнозов кривых обеспеченностей максимального стока.

4. Оценки ожидаемых изменений норм и коэффициентов вариации стока весеннего половодья, основанные на данных климатических сценариев МГЭИК.

5. Концепция и методы оценивания эффективности использования комплекса предложенных научно-технических рекомендаций для расчета обес-

печенных максимальных расходов воды при подготовке технико-экономического обоснования проектов строительства и долгосрочного планирования развития арктической зоны Российской Федерации.

6. Карты арктических районов, где при проектировании гидротехнических сооружений целесообразно применять комплекс научно-технических рекомендаций, разработанных в исследовании.

Последнее положение дает возможность государственным органам управления и руководителям предприятий водозависимых отраслей экономики арктического региона РФ осуществлять стратегическое планирование развития региона с учетом изменений климата. Чтобы получить возможность выявления географических закономерностей (в виде карт из п. 6), потребовались исследования, результаты которых представлены в п. 1–5 и носят технический (технологический) характер. Региональные рекомендации, сформулированные в исследовании, не предполагают внесение изменений в действующие нормативные документы о порядке расчетов основных гидрологических характеристик и являются аддитивными по отношению к ним.

Научная новизна и практическая значимость результатов исследования. В исследовании *впервые* получены следующие результаты.

1. Предложен метод и разработано программное обеспечение для локализации дат начала/окончания половодья и автоматизации расчетов слоя стока весеннего половодья по данным ежедневных расходов воды.

2. Получен вывод о наличии на арктических территориях значимых изменений статистических моментов вероятностных распределений многолетнего стока весеннего половодья, что является мотивацией развития региональных методов и рекомендаций по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате.

3. Получен вывод об эффективности использования норм годовых сумм

осадков в модели формирования многолетнего стока весеннего половодья на арктической территории, что позволяет уменьшить погрешности, связанные с неопределенностью сценарных оценок характеристик стокообразующих осадков.

4. На основе оценок оправдываемости ретроспективных прогнозов кривых обеспеченности стока весеннего половодья получен вывод о необходимости учета специфики его формирования на арктических территориях.

5. Предложен эффективный метод учета изменений свойств подстилающей поверхности при параметризации модели формирования многолетнего стока весеннего половодья, что позволило повысить достоверность расчетов статистических характеристик максимального стока на арктических территориях.

6. Определены арктические регионы России, где при планировании долгосрочного развития социально-экономической инфраструктуры и проектировании гидротехнических сооружений целесообразно применять комплекс научно-технических рекомендаций, разработанных в исследовании.

7. Представлены результаты апробации экономической эффективности предложенного регионального подхода при планировании развития социально-экономической инфраструктуры региона (на примере Республики Коми) и подготовке гидрологических обоснований строительного проектирования (на примере мостового перехода железнодорожной магистрали «Северный широтный ход»).

Полученные в работе результаты позволили впервые сформулировать научно обоснованный подход для расчета основных гидрологических характеристик максимального стока в условиях неустановившегося климата на территории арктической зоны России для нужд строительного проектирования.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Исследования, представленные в диссертации, и основные научные положения соответствуют

области исследования (п. 10 «Разработка научных основ обеспечения гидроэкологической безопасности территорий и хозяйственных объектов, экономически эффективного и экологически безопасного водопользования и водопотребления, планирования хозяйственной деятельности в областях повышенного риска опасных гидрологических процессов, защиты водных объектов от истощения, загрязнения, деградации, оптимальных условий существования водных и наземных экосистем») специальности 25.00.27 «Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия» по номенклатуре специальностей научных работников «Науки о Земле».

Апробация и реализация результатов диссертации. Основные положения диссертации докладывались на научных семинарах Российского государственного гидрометеорологического университета, Государственного гидрологического института, Федерального государственного бюджетного учреждения Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербургского университета, Института озероведения РАН, Санкт-Петербургского политехнического университета, Московского государственного университета, Института водных проблем РАН, Государственной геофизической обсерватории, на IV и V Всероссийских гидрологических съездах (Санкт-Петербург, 2004, 2014), на научных и технических конференциях в Санкт-Петербурге (2008, 2010), Москве (2010, 2012), Новосибирске (2011) и Хельсинки (2015).

Результаты работ переданы в государственные учреждения для решения задач разработки региональной государственной политики использования природных ресурсов и обеспечения безопасности гидротехнических сооружений (справка о внедрении предоставлена Министерством природных ресурсов Мурманской области) и в коммерческие организации для подготовки технических обоснований и разработки экономически целесообразных решений при проектировании и строительстве гражданских, военных и промышленных объектов

(справка о внедрении предоставлена ЗАО «МурманскТИСИЗ»), а также для разработки региональных научно-технических рекомендаций по проектированию калийных и соляных разработок в Пермском крае (справка о внедрении предоставлена ЗАО «ВНИИ Галургии»).

Результаты исследования отражены в научно-технических отчетах РГГМУ по темам «Частично инфинитный механизм в моделировании и прогнозировании гидрологических катастроф» (номер госрегистрации 01 2006 03264), «Нелокальные взаимодействия в моделях прогноза развития гидрологических процессов» (номер госрегистрации 01 2009 52633), «Выявление эволюционных смещений географического распределения зон аномального формирования многолетнего максимального стока весеннего половодья в арктическом регионе России при возможных изменениях климата» (номер госрегистрации 01 2009 52622), «Географические закономерности распределений на территории России аномальных зон формирования экстремальных видов многолетнего речного стока в перспективе долгосрочных климатических изменений» (номер госрегистрации 01 2012 80083), «Создание диагностических и прогностических моделей развития процессов катастрофического формирования многолетнего речного стока» (номер госрегистрации 01 2010 60870) и «Адаптация математических моделей формирования вероятностных характеристик многолетних видов речного стока к физико-географическим условиям России для целей обеспечения устойчивости их решений при моделировании и прогнозировании» (номер госрегистрации 01 2014 58678), «Исследования и разработка научно-технических основ реагирования на разномасштабные климатические изменения при рациональном природопользовании в Арктике» (номер госрегистрации 14.515.11.0002, рук. д. ф.-м. н., проф. Л.Н. Карлин) в 2009–2015 гг. Часть результатов исследования представлена в отчетах Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ) по пяти темам целевых

научно-технических проектов плана НИОКР Росгидромета в 2005–12 гг. Результаты работ внедрены в учебный процесс по специальности «Гидрология суши» (07.32.00) в РГГМУ.

Личный вклад автора. Научные положения, выносимые на защиту, методические и технические решения комплекса рекомендаций о порядке проведения расчетов статистических характеристик многолетнего максимального стока на территории Российской Арктики в условиях неустойчивого климата, получены лично автором и опубликованы в статьях из списка, рекомендованного ВАК.

В публикациях, подготовленных в соавторстве, автору принадлежат формулировка целей и задач, обработка исходных данных и анализ полученных результатов. Лично автором представлено обоснование необходимости подготовки научно-технического комплекса региональных рекомендаций для расчета обеспеченных расходов на арктических территориях в условиях неустойчивого климата, сформулированы практические задачи работы и предложены их рациональные решения. В работе автором сформулированы новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит вклад в развитие арктической зоны России и Российской Федерации. Автор являлась ответственным исполнителем четырех целевых научно-технических проектов плана НИОКР Росгидромета и руководителем двух грантов отдела подготовки кадров ААНИИ.

Публикации. По теме диссертации опубликовано более 50 работ, из них 17 в журналах из списка рекомендованного ВАК. Подготовлены методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустойчивом климате (в соавторстве с сотрудниками кафедры гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести

глав, заключения, списка использованной литературы, содержащего 232 источника, четырех приложений. Работа изложена на 357 страницах текста, включая 72 рисунка и 72 таблицы.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность научному консультанту, профессору кафедры гидрофизики и гидропрогнозов, заслуженному деятелю науки Российской Федерации, д. т. н. В.В. Коваленко за консультации в научных исследованиях, коллективу кафедры за многочисленные вопросы и замечания в ходе обсуждений работы, профессору д. т. н. В.А. Лобанову, профессору д. г. н. Н.И. Алексеевскому, профессору д. г. н. В.А. Шелутко, д. ф.-м. н. С.А. Кондратьеву, профессору д. г. н. А.М. Догановскому, профессору д. т. н. В.А. Кузьмину, профессору к. г. н. В.Н. Воробьеву, к. г. н. Н.Н. Брызгину, к. г. н. Е.В. Курзеновой, к. ф.-м. н. Р.Д. Кузнецову за многочисленные обсуждения и полезные советы при подготовке диссертационной работы, а также к. т. н. В.В. Иванову за многолетнюю поддержку.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы предмет, объект, цель и задачи исследования. Представлено описание методов исследования и основных полученных результатов, обоснование их достоверности, научной новизны и практической значимости.

В главе 1 даны краткие сведения об экономической инфраструктуре Российской Арктики, о ресурсном потенциале и стратегическом значении региона. Показана актуальность разработки комплекса научно-технических рекомендаций при подготовке гидрологического обоснования строительства социально-экономических объектов в условиях неустойчивого климата. Обоснован выбор максимального стока в качестве предмета исследования как наиболее

востребованного вида стока при строительном проектировании объектов добывающей, перерабатывающей и транспортной инфраструктуры в Российской Арктике.

Представлен обзор работ, посвященных методам оценки гидрологических последствий изменения климата. Рассмотрены преимущества и недостатки различных гидрологических моделей с точки зрения решения задачи обеспечения надежного гидрологического обоснования строительных проектов в условиях неустойчивого климата. Сформулированы основные преимущества применения упрощений уравнений Пирсона (Соколовский, 1962) и Фоккера–Планка–Колмогорова (Коваленко, 1993) с точки зрения решения задачи разработки комплекса научно-технических решений для расчета обеспеченных максимальных расходов в условиях неустойчивого климата.

В главе 2 представлены математический аппарат и исходные данные исследования. Рекомендации для расчета расходов малой обеспеченности основаны на концепции оценки статистических характеристик многолетнего стока с использованием сценарных норм метеопараметров (Коваленко, 1993). Согласно действующим нормативным документами (СП 33-101-2003, 2004) кривые обеспеченности основных видов многолетнего стока аппроксимируются в рамках асимметричных вероятностных распределений, которые являются решениями уравнения Пирсона (Соколовский, 1968):

$$\frac{dp}{dQ} = \frac{Q - a}{b_0 + b_1 Q + b_2 Q^2} p, \quad (1)$$

где Q – характеристика стока, например расход, модуль или слой стока; p – плотность вероятности; a, b_0, b_1, b_2 – параметры распределений Пирсона.

В гидрологии широко используются кривые распределения Пирсона III типа, которые соответствуют решению уравнения (1) при $b_2 = 0$. Значения параметров уравнения Пирсона рассчитываются по формулам:

$$\begin{aligned}
a &= 0,5(-m_3 - 4m_1^3 + 5m_1m_2)/(m_2 - m_1^2); \\
b_0 &= 0,5(-2m_2^2 - m_2m_1^2 + m_1m_3)/(m_2 - m_1^2); \\
b_1 &= 0,5(3m_1m_2 - 2m_1^3 - m_3)/(m_2 - m_1^2),
\end{aligned} \tag{2}$$

где m_n – выборочные оценки статистических моментов порядка $n = 1, 2, 3$, рассчитанные по многолетним рядам наблюдений за стоком.

С другой стороны, уравнение (1) является частным случаем уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова:

$$\frac{\partial p(Q;t)}{\partial t} = - \frac{\partial}{\partial Q}(A(Q;t)p(Q;t)) + 0,5 \frac{\partial^2}{\partial Q^2}(B(Q;t)p(Q;t)), \tag{3}$$

где $A(Q ; t)$ и $B(Q ; t)$ – коэффициенты сноса и диффузии, которые определяются статистическими свойствами рассматриваемых гидрометеорологических процессов. Решение уравнения (3) статистически эквивалентно решению стохастического дифференциального уравнения

$$dQ/dt = -(\bar{c} + \tilde{c})Q + (\bar{N} + \tilde{N}), \tag{4}$$

где параметр $c = 1/k\tau = \bar{c} + \tilde{c}$ интегрально характеризует изменчивость свойств подстилающей поверхности, параметр $N = \dot{X}/\tau = \bar{N} + \tilde{N}$ – изменчивость метеорологического воздействия; \bar{c} , \bar{N} – математические ожидания процессов; \tilde{c} , \tilde{N} – взаимно коррелированные процессы типа «белый шум» с интенсивностями $G_{\tilde{c}}$, $G_{\tilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$. Линейный формирующий фильтр (4) является обобщением обыкновенного дифференциального уравнения

$$dQ/dt = -(1/k\tau)Q + \dot{X}/\tau,$$

где Q – характеристика стока (в работе рассматривается слой стока весеннего половодья [мм]); \dot{X} – характеристика осадков [мм], k – коэффициент стока; τ – время, соответствующее радиусу автокорреляции (1 год).

Из уравнения (3) параметры (1) могут быть выражены через статистические характеристики процессов, характеризующих свойства подстилающей поверхности и изменчивость метеопараметров (Коваленко и др., 2006):

$$\begin{aligned} a &= (G_{\bar{c}\bar{N}} + 2\bar{N})/(2\bar{c} + G_{\bar{c}}); \\ b_0 &= -G_{\bar{N}}/(2\bar{c} + G_{\bar{c}}); \\ b_1 &= 2G_{\bar{c}\bar{N}}/(2\bar{c} + G_{\bar{c}}). \end{aligned} \quad (5)$$

По многолетним рядам наблюдений за стоком оцениваются выборочные значения статистических моментов и рассчитываются параметры распределений Пирсона (a, b_0, b_1) по формулам (2). Далее значения параметров модели (4) могут быть выражены через параметры уравнения (1):

$$\begin{aligned} \bar{c} &= \bar{N}/(a - b_1/2); \\ G_{\bar{N}} &= -b_0\bar{N}/(a - b_1/2); \\ G_{\bar{c}\bar{N}} &= b_1\bar{N}/(a - b_1/2). \end{aligned} \quad (6)$$

Задавая из климатического сценария значения многолетних норм метеопараметров, можно рассчитать значения параметров уравнения (1):

$$\begin{aligned} a_f &= (G_{\bar{c}\bar{N}_f} + 2\bar{N}_f)/(2\bar{c}_f); \\ b_{0f} &= -G_{\bar{N}_f}/(2\bar{c}_f); \\ b_{1f} &= 2G_{\bar{c}\bar{N}_f}/(2\bar{c}_f), \end{aligned} \quad (7)$$

которые характеризуют кривые обеспеченности многолетнего стока в новых климатических условиях (обозначены индексом f). Далее оцениваются значения статистических моментов в новых климатических условиях:

$$\begin{aligned} m_{1f} &= a_f - b_{1f}; \\ m_{2f} &= a_f m_{1f} - 2b_{1f} m_{1f} - b_{0f}; \\ m_{3f} &= a_f m_{2f} - 2b_{0f} m_{1f} - 3b_{1f} m_{2f}. \end{aligned} \quad (8)$$

Ожидаемые при новой климатической ситуации характеристики выража-

ются через статистические моменты: $\bar{Q}_f = m_{1f}$,

$$C_{vf} = \sqrt{(m_{2f} - m_{1f}^2)/m_{1f}} \quad \text{и} \quad C_{sf} = (m_{3f} - 3m_{2f}m_{1f} + 2m_{1f}^3)/C_{vf}^3 m_{1f}^3.$$

В настоящей работе принято, что соотношение C_s/C_v не изменится в новом климате. Фиксированное значение этого соотношения часто принимают в гидрологических расчетах, поскольку точность определения третьего момента невысока из-за коротких рядов гидрологических наблюдений.

Далее в этой главе представлены сведения об исходной гидрометеорологической информации, используемой в исследовании, а также дана характеристика климатических сценариев МГЭИК и МОЦАО. Предложен алгоритм локализации дат начала и окончания периода половодья, который позволяет автоматизировать расчеты слоя стока весеннего половодья по данным ежедневных расходов воды. В заключение сформулированы практические задачи разработки регионального комплекса научно-технических рекомендаций для расчета гидрологических характеристик стока весеннего половодья при наличии изменений климата.

В главе 3 обсуждаются вопросы региональной специфики арктических территорий и представлено научное обоснование метода задания климатического воздействия при расчетах статистических характеристик стока весеннего половодья по данным климатических сценариев. Показано, что на территории Арктики не требуется выделение стокообразующей части осадков и для расчета параметров уравнений (1 и 4) в формулах (5, 6 и 7) могут быть использованы многолетние нормы годовой суммы осадков.

Дано описание методов анализа наличия статистически значимых изменений выборочных начальных моментов многолетних рядов слоя стока весеннего половодья. Анализ многолетних наблюдений на 102 гидрологических постах, расположенных на территории Российской Арктики, показал, что до 1980 года лишь на 18 % водосборов имеются статистически значимые изменения момен-

тов вероятностных распределений стока весеннего половодья. При удлинении рядов стока с учетом данных наблюдений последних 25–30 лет число таких водосборов возрастает до 43 %. Для большинства рядов появление статистически значимых изменений моментов распределений относится к началу 1980-х годов. Полученные результаты подтверждают вывод о наличии тенденций изменения весеннего стока в таежной зоне (Георгиевский и др., 2012), а также являются мотивацией научных исследований и разработке региональных рекомендаций для расчета обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате для арктической зоны Российской Федерации.

В главе 4 обсуждаются вопросы научно-технического обоснования алгоритмов учета изменений свойств подстилающей поверхности и достоверности результатов расчетов параметров кривых обеспеченности слоя стока весеннего половодья. По данным многолетних наблюдений на арктических водосборах, выбраны ряды стока весеннего половодья, в которых присутствуют периоды, характеризующиеся различной водностью. Разделение рядов на подпериоды осуществлялось по алгоритмам «скользящей точки» (Пространственно-временные, 1988) и «скользящего окна» (Madsen et al., 2013) с использованием критерия Стьюдента. Год разделения на периоды с различной нормой соответствует году превышения критического значения на 5 %-ом уровне статистической значимости.

Периоды, характеризующиеся различной водностью, были выявлены в рядах слоя стока весеннего половодья на 23 водосборах из 76. Для каждого водосбора и периода рассчитаны статистические характеристики стока половодья и метеопараметров (\bar{N} – норма годовой суммы осадков и \bar{T} – норма среднегодовой температуры воздуха) (см. пример: табл. 1). Соотношение C_s/C_v оценивалось на основе C_s , полученного по всему ряду наблюдений.

Статистические характеристики периодов (пример)

Река	Площадь водосбора [км ²]	Период водности	m_1 [мм]	m_2 [мм ²]	C_v	C_s/C_v	\bar{N} [мм]	\bar{T} [°C]
Бохапча	13600	1934–49	111	15401	0,50	2,5	421	–12,1
		1950–80	141	23907	0,45	2,8	435	–12,4
Сеймчан	2920	1941–56	190	40779	0,36	3,1	373	–11,5
		1957–77	157	25842	0,22	5,1	305	–11,4
Куонапка	2030	1943–85	97.5	10848	0,36	0,8	255	–13,8
		1986–02	116			1,1	262	–13,1

Методика оценки достоверности расчетов по модели формирования максимального стока при различных схемах ее параметризации основана на сравнении условных прогнозов кривых обеспеченности весеннего половодья с фактическими, полученными по данным наблюдений. Для каждого из периодов по формулам (6, 7 и 8) рассчитывались условно-прогнозные статистические моменты на основании норм метеопараметров второго периода. Условно-прогнозные значения нормы и коэффициентов вариации и асимметрии использовались для построения кривых обеспеченности, которые сравнивались с эмпирической кривой за соответствующий период. Соответствие смоделированной и эмпирической кривых распределения оценивалось по критериям Пирсона и Колмогорова (рис. 1). Условный прогноз считался успешным (оправдавшимся), если значение критерия не превышало критическое на 5 %-ом уровне статистической значимости. Достоверность методики оценивается процентом оправдавшихся условных прогнозов кривых обеспеченности.

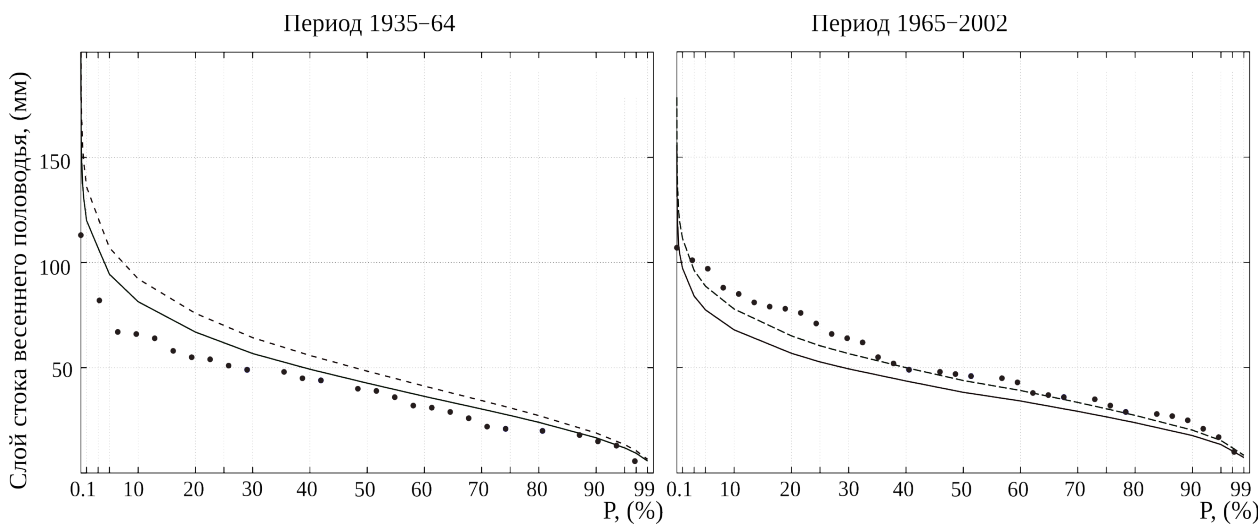


Рис. 1. Пример фактических (точки) и условно-прогнозных (линии) кривых обеспеченности слоя стока весеннего половодья при постоянных параметрах (сплошная линия) и переменном параметре \bar{c} (прерывистая линия): Яна – Верхоянск.

Рассмотрены варианты получения условных прогнозов кривых обеспеченности: (i) «инерционный прогноз», при котором рассчитанные выборочные моменты одного из периодов использовались для построения кривых обеспеченности для другого периода; (ii) по методике (Коваленко и др., 2010). Инерционный прогноз имитирует ситуацию, при которой расчет максимальных расходов малой обеспеченности производится согласно (СП 33-101-2003, 2004), т. е. без учета ожидаемых изменений климата. Результаты, полученные для двух рассмотренных вариантов, показали, что процент оправдавшихся условных прогнозов кривых обеспеченности стока весеннего половодья на арктической территории в среднем не превышает 63 % по критерию Колмогорова. Расчеты по методике (Коваленко и др., 2010) незначительно улучшают оценки (табл. 2). Это позволило сделать вывод о необходимости учета в модели многолетнего максимального стока специфики его формирования на арктических территориях.

Региональные особенности территорий учтены при задании параметров уравнения (4) переменными на условно-прогнозный интервал времени. Предло-

жены зависимости параметра \bar{c} от норм годовой суммы осадков и среднегодовой температуры воздуха (табл. 3), что позволило увеличить процент оправдавшихся ретроспективных прогнозов кривых обеспеченности слоя стока весеннего половодья (табл. 2).

В дальнейшем долгосрочная оценка статистических характеристик максимального стока на территории Российской Арктики получена по варианту с использованием региональных зависимостей.

Таблица 2

Процент оправдавшихся поверочных прогнозов по критериям Колмогорова и Пирсона на 5 и 10 %-ом уровнях значимости (α)

Вариант получения условных прогнозов кривых обеспеченности	Колмогоров		Пирсон	
	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,10$	$\alpha = 0,05$	$\alpha = 0,10$
Инерционный прогноз (СП 33-101-2003, 2004)	63	46	41	23
Постоянные параметры (Коваленко и др., 2010)	67	59	51	48
Переменные параметры (Шевнина, 2011, 2012)	74	67	63	57

Таблица 3

Региональные зависимости расчета параметра \bar{c} в модели (4)

Район	Коэффициент корреляции	Параметры региональных зависимостей		
		Метеопараметр	Коэффициент $[10^{-2}]$	свободный член
Восточная Сибирь	0,85	\bar{N}	-0,07	1,34
		\bar{T}	5,5	
Северный Край	0,76	\bar{N}	0,09	0,13
		\bar{T}	-8,5	
Кольский п-ов и Карелия	0,68	\bar{N}	-0,09	0,78
		\bar{T}	1,3	

В главе 5 получены оценки норм и коэффициентов вариации стока весеннего половодья на основе климатических сценариев МГЭИК. Определены арктические районы, где при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений целесообразно применять комплекс научно-технических рекомендаций, предложенных в исследовании. Расчеты проведены для сценариев COMMIT, SRES:A2, SRES:A1B и SRES:B1 из четвертого отчета и RCP 8.5, RCP 4.5 и RCP 2.6 из пятого отчета МГЭИК. Были использованы результаты моделей общей циркуляции атмосферы MPIM:ECHAM5, CGCM2, GFDL:CM2 и UKMO:HADCM3 (четвертый отчет см. табл. 4) и INM-CM4, HadGEM2, CanEMS2, MPI-ESM (пятый отчет).

Таблица 4

**Нормы годовых сумм осадков (\bar{N} [мм]) и температуры воздуха (\bar{T} [°C]):
данные наблюдений и оценки МОЦАО на период 2010–39 гг.**

Регион	1936-80		COMMIT		SRES:A1B		SRES:A2		SRES:B1	
	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}	\bar{N}	\bar{T}
Арктика в целом	378	-10,3	418	-10,2	433	-9,9	435	-9,2	437	-9,4
Карелия и Кольский п-ов	506	-0,6	580	-2,0	589	-1,6	596	-1,2	598	-1,3
Северный край	528	-2,1	583	-3,7	603	-3,5	602	-2,7	608	-3,0
Обь-Енисейский район	438	-7,1	404	-11,1	506	-7,8	429	-9,9	426	-10,3
Восточная Сибирь	296	-14,5	350	-12,8	379	-12,2	359	-11,8	364	-12,1

На территории Российской Арктики и в отдельных районах по сценариям семейства RCP ожидается более сильное потепление (около 3,2 °C) по сравнению с результатами, полученными по сценариям семейства SRES (около 0,6 °C). Для сценария COMMIT ожидается незначительное похолодание (в среднем на

0,4 °C). Неопределенность в оценках ожидаемых изменений норм метеопараметров по различным МОЦАО значительно меньше в рамках пятого поколения сценариев климата, чем для результатов предшествующего отчета (рис. 2 справа).

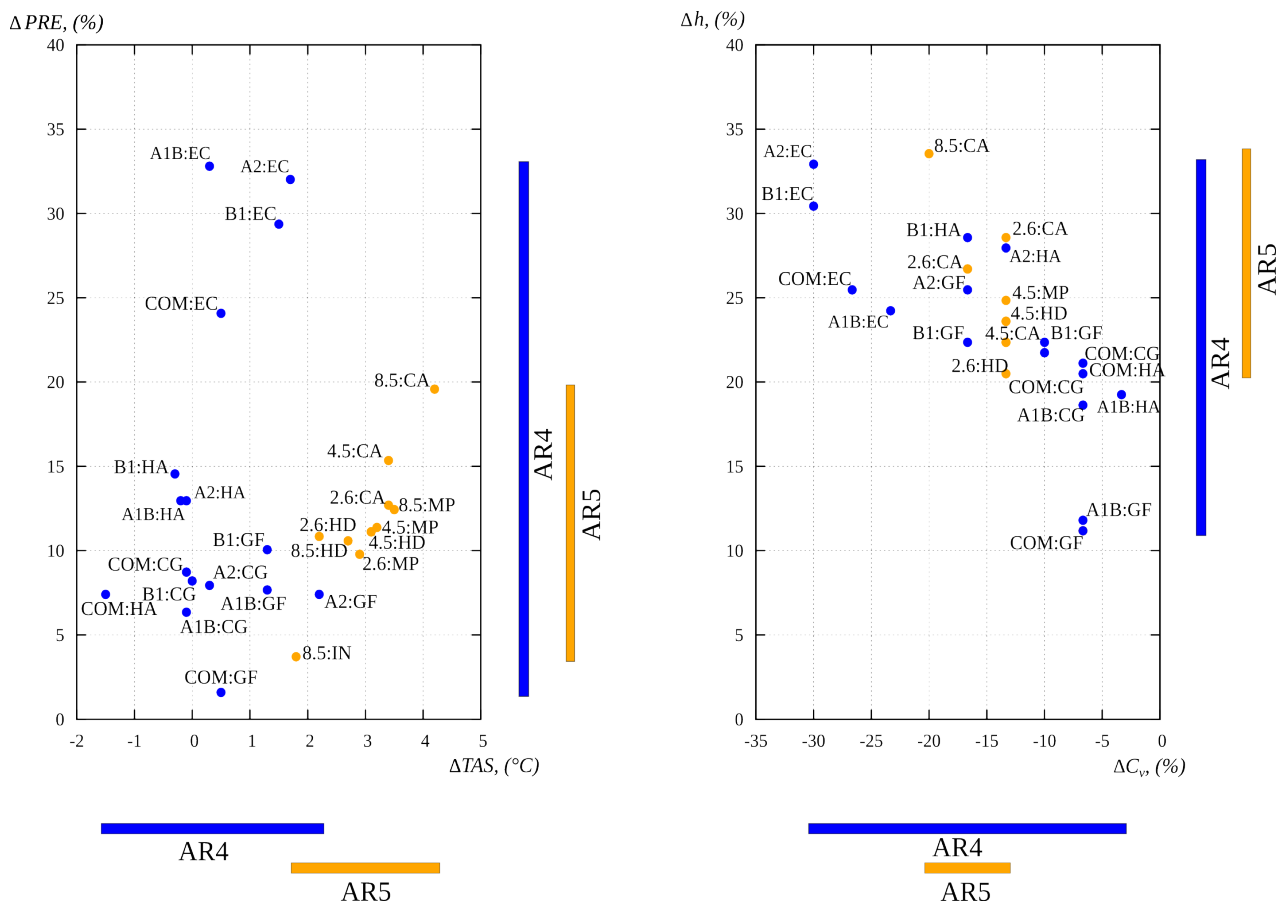


Рис. 2. Изменение норм годовых сумм осадков (ΔPRE , %), среднегодовой температуры воздуха (ΔTAS , °C), норм стока весеннего половодья (Δh , %) и коэффициентов его вариации (ΔC_v , %), ожидаемых в период 2010–39 гг., по сравнению с периодом наблюдений по результатам четвертого (AR4) и пятого (AR5) отчетов МГЭИК.

[Сокращения названий МОЦАО: CA – CanESM2, HD – HadGEM2, IN – INM-CM4, MP – MPI-ESM, EC – ECHAM5/MPI, GF – GFDL, GC – CGCM, HA – HADCM3].

Согласно сценарным оценкам изменений климата, на территории Арктики ожидается увеличение нормы стока весеннего половодья и снижение коэффициента его вариации (табл. 5). Такая тенденция ожидается и в регионах: наиболее значительное увеличение нормы стока весеннего половодья прогнозируется на

территории Северного края (в среднем на 47 %) и большей части Восточной Сибири за исключением Чукотского полуострова (в среднем на 37 %). Одновременно в этих районах ожидается снижение коэффициентов вариации стока на 22–23 %. Противоположная тенденция получена для территории Кольского полуострова и Карелии, где прогнозируется значительное снижение норм стока весеннего половодья (в среднем на 27 %) и увеличение коэффициентов его вариации (в среднем на 14 %).

Таблица 5

Норма стока весеннего половодья (m_1 [мм]) и коэффициент его вариации (C_v): данные наблюдений и осредненные оценки по МОЦАО на период 2010-39 гг.

Регион	1936–80		COMMIT		SRES:A1B		SRES:A2		SRES:B1	
	m_1	C_v	m_1	C_v	m_1	C_v	m_1	C_v	m_1	C_v
Арктика в целом	162	0,30	191	0,27	200	0,26	205	0,25	203	0,25
Карелия и Кольский п-ов	179	0,32	129	0,38	129	0,36	135	0,36	129	0,36
Северный край	203	0,29	303	0,23	303	0,22	293	0,22	295	0,22
Обь-Енисейский район	204	0,23	209	0,23	222	0,22	222	0,22	220	0,22
Восточная Сибирь	108	0,38	129	0,36	150	0,28	159	0,28	155	0,27

На период 2010–39 гг. на территории Российской Арктики в целом ожидается снижение коэффициента вариации слоя стока весеннего половодья в среднем на 12 %, по данным всех рассмотренных сценариев и МОЦАО обоих отчетов МГЭИК. Наименьшие значения изменений коэффициентов вариации (около 3 %) получены по результатам модели HADCM3, а наибольшие (до 24 %) – по ECHAM5/MPI (для сценария SRES:A1B). В целом по сценариям пятого отчета неопределенность в оценках изменений коэффициента вариации слоя стока весеннего половодья меньше по сравнению с оценками четвертого отчета (рис. 2

слева).

Изменения режима формирования максимального стока на территории Российской Арктики до 2100 года характеризуются увеличением нормы слоя стока весеннего половодья, уменьшением его изменчивости (на 25–40 %) на территории Сибири и увеличением в европейской части. Для каждого из рассмотренных сценариев изменения климата выделены районы, где прогнозируемые изменения статистических характеристик максимального стока значимы, и поэтому рекомендуется применять комплекс научно-технических решений, сформулированных в исследовании (см. пример на рис. 3).

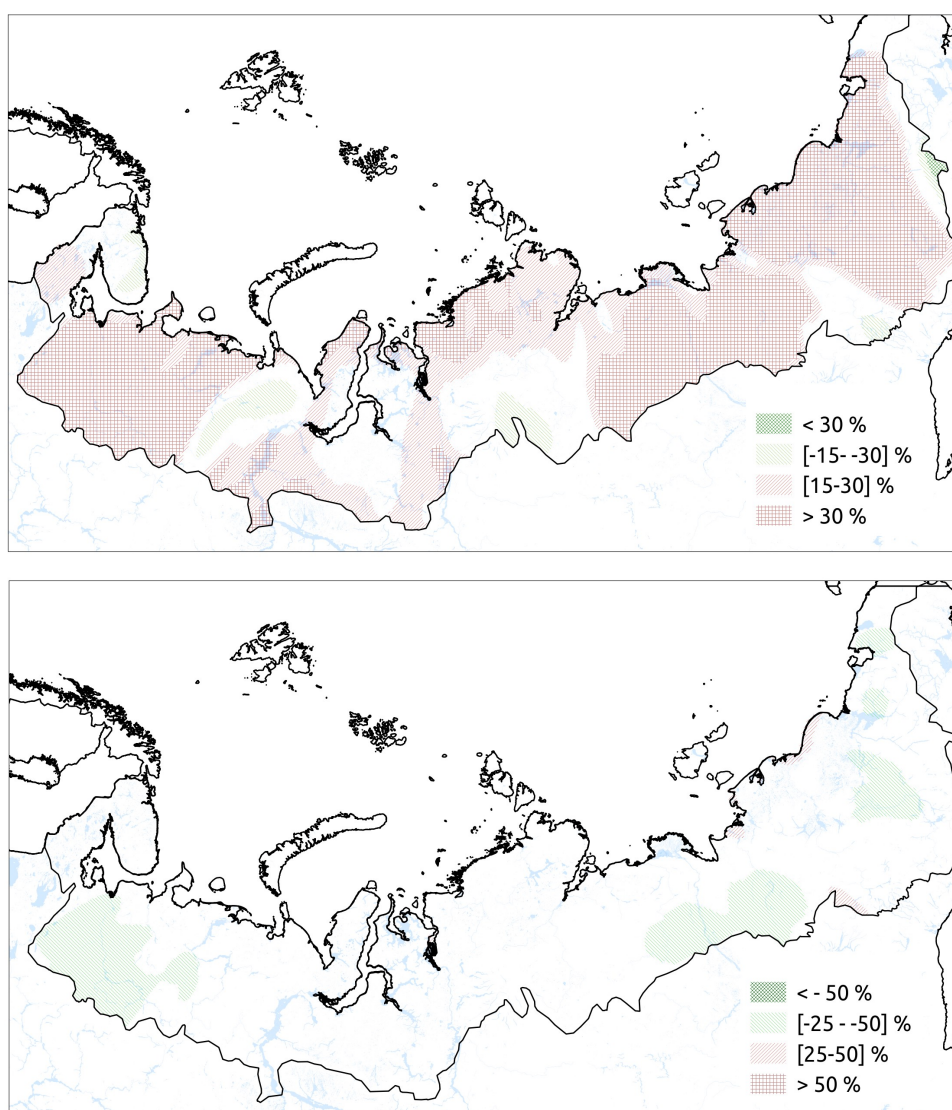


Рис. 3. Зоны значимых изменений нормы (вверху) и коэффициента вариации (внизу) слоя стока весеннего половодья на территории Российской Арктики: осреднение результатов МОЦАО для сценария RCP 2.6 на 2010–39 гг.

В этой же главе представлены оценки изменений нормы сроков вскрытия, начала и достижения максимума весеннего половодья на устьевых участках рек бассейна Карского моря.

В главе 6 сформулированы основные положения по оценке эффективности использования комплекса предложенных рекомендаций для расчета обеспеченных максимальных расходов воды при подготовке технико-экономических обоснований проектов строительства и долгосрочном планировании развития социально-экономической инфраструктуры арктического региона.

Метод оценивания эффективности применения сценарных климатических статистических характеристик многолетнего максимального стока при долгосрочном планировании развития региона базируется на методических рекомендациях по определению ущерба вследствие аварии единичного гидротехнического сооружения.

Метод учета сценарных оценок статистических характеристик максимального стока при подготовке технико-экономического обоснования строительства гидротехнических сооружений основан на понятии суммарных, приведенных к году окончания, затрат. Такие затраты рассчитываются для конкурирующих проектов, при подготовке которых использовались гидрологические характеристики, базирующиеся на разных подходах: с учетом изменений климата и согласно существующему СП 33-101-2003 (2004). Суммарные затраты на проект строительства гидротехнического сооружения (например: мостового перехода) рассчитывают по формуле

$$P_{np} = \frac{E_n}{E} K_{np} + \sum_1^t \frac{\Delta_t}{(1 - E)^t}, \quad (10)$$

где E_n – нормативный коэффициент сравнительной эффективности для транспорта, $E_n = 0,12$; E – нормативный коэффициент для приведения к одному моменту времени разновременных дат, $E = 0,08$; K_{np} – приведенная величина еди-

новременных затрат; \mathcal{E}_t – текущие затраты в t -м году; t – срок сравнения вариантов, принимаемый равным 35 годам (т. е. интервал, сравнимый с климатическими оценками, представленными, например, (IPCC, 2007)).

Первое слагаемое характеризует капиталовложения и зависит, в частности, от высоты и проектного решения мостового перехода, определяемых максимальным расходом/уровнем малой обеспеченности. Предложено расширить понятие стоимости суммарных затрат на проект строительства гидротехнического сооружения за счет введения коэффициентов, учитывающих зависимость издержек на внеплановый ремонт при использовании расценных обеспеченных расходов воды с учетом ожидаемых изменений климата:

$$P_{np} = \frac{E_n}{E} (K_{np} + \beta) + \sum_1^t \frac{\mathcal{E}_t + n\gamma}{(1 - E)^t}, \quad (11)$$

где β – «удорожание проекта» за счет прогнозных статистических характеристик стока; γ – стоимость издержек на внеплановый ремонт; n – число лет за период эксплуатации, когда наблюдались превышения расчетного максимального расхода/уровня («выбросы»). Аддитивные члены связаны с изменением стоимости строительных работ, причем γ заведомо много больше β , поскольку на этапе подготовки технико-экономического обоснования может быть принято более эффективное проектное решение. Параметр, характеризующий выбросы, может быть рассчитан по методике (Громова и др., 2007).

Приведены примеры оценки экономической эффективности применения разработанного научно-технического комплекса для определения расчетных статистических характеристик максимального стока при долгосрочном планировании развития Республики Коми и при подготовке технико-экономического обоснования строительства мостового перехода железнодорожной магистрали «Северный широтный ход».

В заключении диссертационной работы сформулированы основные вы-

воды исследования и положения, выносимые на защиту.

Разработаны научно-технические рекомендации для расчета статистических характеристик многолетнего максимального стока на территории Российской Арктики в условиях неустановившегося климата на основе сценарных оценок его изменений. Комплекс региональных рекомендаций может быть использован для любого сценария изменения климата (как потепления, так и похолодания) и позволяет учитывать специфику формирования стока на арктических территориях.

Представлено научное обоснование необходимости разработки региональных рекомендаций для расчета обеспеченных максимальных расходов при неустановившемся климате. Мотивацией для проведения исследования являются: (i) наличие статистически значимых изменений норм и коэффициентов вариации многолетнего стока весеннего половодья; (ii) низкая достоверность условных прогнозов кривых обеспеченности стока весеннего половодья, полученных согласно рекомендациям (СП 33-101-2003, 2004) и (Коваленко и др., 2010).

Обоснованы методы задания сценарной климатической оценки в модели формирования многолетнего максимального стока и условия ее параметризации. Показано, что для расчетов статистических характеристик стока весеннего половодья на арктических территориях нет необходимости выделения стокообразующей части осадков и в расчетах могут быть использованы сценарные оценки изменений норм суммарных осадков за год. Это связано с тем, что в арктических районах около 60–80 % годового стока проходит в короткий весенне-летний период (половодье), а внутригодовое регулирование стока грунтовыми водами незначительно из-за близкого расположения верхней границы многолетнемерзлых грунтов. Показано, что для параметризации модели многолетнего стока весеннего половодья необходимо использовать данные наблюдений до 1980 года, поскольку в этот период большинство многолетних рядов стока яв-

ляются однородными и представляют квазистационарный период формирования максимального стока.

Получены оценки достоверности ретроспективных прогнозов кривых обеспеченности многолетнего максимального стока при переменных параметрах модели формирования стока весеннего половодья. Предложены региональные зависимости параметра модели, характеризующего свойства подстилающей поверхности, от норм среднегодовой температуры воздуха и годовых сумм осадков. Это позволило увеличить достоверность ретроспективных условных прогнозов кривых обеспеченности стока весеннего половодья до 74–83 % на арктических территориях.

На основе климатических сценариев МГЭИК получены оценки ожидаемых изменений норм и коэффициентов вариации стока весеннего половодья до конца текущего столетия. В целом на территории Российской Арктики ожидается увеличение нормы стока весеннего половодья на 23 % и снижение коэффициента его вариации на 14 % при осреднении по всем сценариям. В регионах наиболее сильное увеличение нормы стока весеннего половодья прогнозируется на территории Северного края (в среднем на 47 %) и большей части Восточной Сибири за исключением Чукотского полуострова. Одновременно, на этих же территориях, ожидается снижение коэффициентов вариации стока на 22–23 %. Противоположная тенденция получена для районов Кольского полуострова и Карелии, где прогнозируется значительное снижение норм стока весеннего половодья (в среднем на 27 %) и увеличение коэффициентов его вариации (в среднем на 14 %).

Получены карты арктических районов, где при проектировании гидротехнических сооружений целесообразно применять разработанный в исследовании комплекс научно-технических рекомендаций. В период 2010–39 гг. значительные изменения нормы стока весеннего половодья ожидаются на территории

Мурманской области, Республики Карелия, Ямало-Ненецкого АО и Долгано-Ненецкого АО, севере Республики Саха и Магаданской области, а также на востоке Чукотского АО.

Предложена концепция и методы оценки эффективности использования комплекса рекомендаций для расчета обеспеченных максимальных расходов воды при подготовке технико-экономического обоснования проектов строительства (на примере мостовых переходов) и долгосрочного планирования развития арктической зоны Российской Федерации (на примере Республики Коми).

Разработано программное обеспечение для расчета слоя стока весеннего половодья на основе численных критериев локализации дат начала и окончания периода половодья и расчета статистических характеристик многолетнего стока весеннего половодья на основании сценарных оценок изменения метеопараметров на территории Российской Арктики.

В приложениях представлены исходные данные, промежуточные результаты, описание алгоритмов специализированного программного обеспечения, реализующего расчеты, прогнозные карты регионов, где ожидается существенные изменения статистических характеристик слоя стока весеннего половодья, и справки о внедрении результатов исследования.

По теме диссертации опубликованы следующие работы, в том числе из перечня ведущих научных рецензируемых журналов и изданий **списка Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки РФ**:

1. Вероятностная интерпретация прогнозов дат наступления ледовых фаз в Обско-Тазовской устьевой области // Водные ресурсы, № 33(1), 2006. – С. 39–43 (в соавторстве с Дмитриевым В.Г.).
2. Производственные функции водозависимых отраслей экономики арктического региона России // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 8, 2008, – С. 159–174.

3. Многолетняя изменчивость и методы прогнозирования сроков вскрытия в устьевых областях Оби и Енисея // Метеорология и гидрология, № 7, 2008. – С. 73–84 (в соавторстве с Соловьевой З.С.).
4. Методы долгосрочного прогнозирования сроков начала и достижения максимума весеннего половодья на устьевых участках Оби и Енисея // Метеорология и гидрология, №1, 2009. – С. 75–84.
5. Влияние изменений климата на многолетний слой стока весеннего половодья рек арктической зоны России // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 14, 2010. – С. 14–19 (в соавторстве с Коваленко В.В., Гайдуковой Е.В., Викторовой Н.В., Хаустовым В.А., Громовой М.Н., Девятовым В.С.).
6. Оптимизация природопользования в арктическом регионе России // Вестник Международной академии наук (Русская секция), № 3, 2010. – С. 146–147 (в соавторстве с Коваленко В.В., Гайдуковой Е.В., Хаустовым В.А., Викторовой Н.В., Громовой М.Н., Девятовым В.С.).
7. Анализ стационарности многолетних рядов стока весеннего половодья на водосборах Российской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики, №1 (87), 2011. – С. 56–64.
8. Использование ГИС-технологий для оценки площадей затопления в районе порта Дудинка // Проблемы Арктики и Антарктики № 3(89), 2011. – С. 43–48 (в соавторстве с Соболевой В.П.).
9. Методика оценки экономического ущерба в зонах значимых изменений статистических характеристик максимального стока весеннего половодья на примере республики Коми // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 18, 2011. – С. 193–203.

10. Анализ связи норм годовых и зимних осадков с нормами стока весеннего половодья рек Российской Арктики // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 20, 2011. – С. 6–12.
11. Параметризация модели формирования стока весеннего половодья на территории Российской Арктики // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 21, 2011. – С. 38–46.
12. Оценка качества методики долгосрочного прогнозирования вероятностных характеристик многолетнего слоя стока весеннего половодья на ретроспективном материале // Проблемы Арктики и Антарктики, № 3(93), 2012. – С. 40–50.
13. Достоверность методики долгосрочной оценки статистических характеристик максимального стока на территории Российской Арктики // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 26, 2012. – С. 52–61.
14. Методика оценки экономической эффективности результатов долгосрочного прогнозирования статистических характеристик максимального стока при строительстве мостовых переходов на территории Российской Арктики // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 26, 2012. – С. 7–18 (в соавторстве с Коваленко В.В. и Гайдуковой Е.В.).
15. Методика расчета характеристик весеннего половодья по данным ежедневных расходов воды // Проблемы Арктики и Антарктики. 2013. 1(95). С. 44–50.
16. Максимальный сток весеннего половодья при оценке надежности гидротехнических сооружений при изменениях климата // Технические науки — от теории к практике, № 24, 2013. – С. 146–153 (в соавторстве с Коваленко В.В., Гайдуковой Е.В., Хаустовым В. А., Судаковой Н.В. и Диавара Х.).
17. Изменения режима максимального стока в Арктике. Строительство уникальных зданий и сооружений, № 7(22), 2014. – С. 128–141.

Доклады на конференциях (наиболее значимые):

1. Моделирование изменений речного стока Европейской части России // Тезисы докладов конференции «Современные аспекты гидродинамики–98», Технический ун-т. из-во СпбТУ, г. Санкт-Петербург, 1998. – С. 40 (в соавторстве с Хаустовым В.А., Викторовой Н.В., Величко И.И.).
2. Устойчивость вероятностных характеристик годового стока к антропогенным воздействиям // Тезисы докладов конференции молодых ученых национальных гидрометслужб стран СНГ, г. Москва, ИВП, Из-во ИВП, 1999. – С. 48-49 (в соавторстве с В.А. Хаустовым, Н.В. Викторовой, И.И. Пивоваровой).
3. Методические разработки для прогноза стоковых характеристик в детерминистической и вероятностной форме на основе математических моделей формирования стока // Тезисы докладов IV Всероссийского гидрологического съезда. Секция 2: Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий, г. Санкт-Петербург, 2004. – С. 79–80.
4. Возможности вероятностной интерпретации категорических прогнозов на примере устьевых областей рек Арктики // Доклады VI Всероссийского съезда. Секция 2. Наводнения и другие опасные гидрологические явления: оценка, прогноз и смягчение негативных последствий. М.: Метеоагентство Росгидромета, 2006. – С. 118–123 (в соавторстве с Дмитриевым В.Г.).
5. The influence of hydrological changes to the technical and economical basis of Arctic industry. // In proceedings: The international youth science environmental forum ECOBALTICA, 2008. – P. 290–294.
6. Сценарная оценка максимального стока весеннего половодья в Арктическом регионе России // IV Международная научно-практическая конференция, г. Москва, Институт стратегических исследований, 2012. – С. 250–255 (в соав-

торстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В., Викторовой Н. В., Хаустовым В. А., Дегтяревым А.А., Головановой Е.Ю., Лесничим Л.И.).

7. Создание диагностических и прогностических моделей развития процессов катастрофического формирования многолетнего речного стока // Тезисы докладов научно-технической конференции «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии», г. Санкт-Петербург, ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2010. – С. 6–8 (в соавторстве с Викторовой Н.В., Гайдуковой Е.В., Хаустовым А.А.).

8. Методология оценки гидрологических последствий изменения климата для устьевых участков рек арктического региона России // Тезисы докладов Международной научной конференции «Морские исследования полярных областей Земли в международном полярном году 2007/08». г. Санкт-Петербург, ФБГУ «АНИИ», 2010. – С. 124–127 (в соавторстве с Коваленко В.В., Гайдуковой Е.В., Хаустовым А.А., Викторовой Н.В., Громовой М.Н., Девятовым В.С.).

9. Оптимизация природопользования в Арктическом регионе России // Тезисы докладов Международной конференция «Экология, технологии, культура в современном мире: проблемы vs. решения». г. Москва, МГГУ им. М.А. Шолохова, 2010. – С. 146–147 (в соавторстве с Коваленко В.В., Гайдуковой Е.В., Хаустовым А.А., Викторовой Н.В., Громовой М.Н., Девятовым В.С.).

10. Долгосрочная оценка климатических изменений максимального стока весеннего половодья Арктической зоны России // Материалы XLIX Международной научной студенческой конференции «Студент и научно-технический прогресс», г. Новосибирск, Новосиб. гос. ун-т, 2011. – С. 66 (в соавторстве с Судаковой Н. В., Головановой Е. Ю., Гайдуковой Е. В.).

11. Сценарная оценка долгосрочных изменений максимального стока весеннего половодья в Арктическом регионе России на основе стохастической модели формирования многолетнего стока // Труды Всероссийской научной конференции «Современные проблемы стохастической гидрологии и регулирования сто-

ка», г. Москва, ИВП РАН, 2012. – С. 100–106 (в соавторстве с Коваленко В. В., Гайдуковой Е. В., Викторовой Н. В., Хаустовым В. А., Дегтяревым А. А., Головановой Е. Ю., Лесничим Л. И.).

Другие публикации по теме диссертации:

Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустойчивом климате / Под ред. В. В. Коваленко. СПб.: изд. РГГМУ, 2010. 51 с. (в соавторстве с Коваленко В.В., Викторовой Н.В., Гайдуковой Е.В., Громовой М.Н., Хаустовым В.А.).

Список использованных источников.

- Алексеевский и др. 2011. Мониторинг гидрологических процессов и повышение безопасности водопользования. Москва: МГУ. 367 с.
- Водная стратегия Российской Федерации до 2020 года. 2014. Электронный ресурс: <http://www.mnr.gov.ru/>
- Гельфан А.Н. 2007. Динамико-стохастическое моделирование формирования стока. М.: Наука. 279 с.
- Георгиевский и др. 2012. Гидрологический режим и водные ресурсы / В кн.: Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем. М.: Росгидромет. С. 53–86.
- Громова и др. 2007. Прогноз характеристик минимального стока для целей управления водными ресурсами // Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб.: Изд. СПбГПУ. № 2 (50). С. 284-287.
- Добровольский С.Г. 2011. Глобальные изменения речного стока. Москва: Геос. 659 с.
- Иванов и др. 1991. Водные ресурсы Арктики, их изученность и очередные задачи исследований // Проблемы Арктики и Антарктики, 66. С. 118-128.
- Кочерин Д.И. 1932. Вопросы инженерной гидрологии. М.: Энергоиздат. 208 с.
- Коваленко В.В. 1993. Моделирование гидрологических процессов. СПб.: Гидрометеиздат. 256 с.
- Коваленко и др. 2006. Моделирование гидрологических процессов. СПб.: Изд. РГГМУ. 559 с.
- Коваленко и др. 2010. Методические рекомендации по оценке обеспеченных расходов проектируемых гидротехнических сооружений при неустановившемся климате / Под ред. В. В. Коваленко. СПб.: Изд. РГГМУ. 51 с.
- Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. Нижний Новгород: Вектор-ТиС. 2007. 134 с.
- Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при недостаточности данных гидрометрических наблюдений. СПб.: ААНИИ. 2008. 66 с.
- Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при отсутствии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: Нестор-История. 2009. 193 с.
- Методические рекомендации по оценке однородности гидрологических характеристик и определению их расчетных значений по неоднородным данным. СПб.: Нестор-История. 2010. 162 с.
- Пространственно временные колебания стока рек СССР / Под ред. А.В. Рождественского. Л.: Гидрометеиздат. 1988. 375 с.
- Решение Государственной комиссии по делам Арктики при Совете министров СССР от 22 апреля 1989 года. Электронный ресурс: <http://www.scrf.gov.ru/documents/98.html>
- Свешников А.А. 2007. Прикладные методы теории марковских процессов: Уч. пособие. 1-е изд. СПб.: Лань. 192 с.
- Соколовский Д.Л. 1968. Речной сток. Л.: Гидрометеиздат. 538 с.
- СНиП 2.01.14-83. Определение расчетных гидрологических характеристик. М.: Стройиздат. 1983. 97 с.
- СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. М.: Госстрой России. 2004. 73 с.
- СП 35.13330.2011. Актуализированная редакция СНиП 2.05.03-84. Москва. 2011. 347 с.
- Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года» Электронный ресурс: <http://www.pravo.gov.ru>, 24.04.2014.
- Шикломанов и др. 2007. Влияние изменений климата на гидрологический режим и водные ресурсы рек России / В кн.: Гидрологические последствия изменения климата. Новосибирск. С. 192–204.
- Hirabayashi et al. 2013. Global flood risk under climate change. Nature Climate Change. 3(9): 816-821.
- Lawrence et. al. 2011. Uncertainty in hydrological modeling of climate change impacts in four Norwegian catchments. / Hydrological Resources. 42(6): 457-471.
- IACWD 1982. Guidelines for determining flood flow frequency: Bulletin 17-B. Hydrology Subcommittee. 1982. 28 p. and appendices.
- IPCC Fourth Assessment Reports (AR4) [Электронный ресурс] / IPCC. – 2007. – Режим доступа: <http://www.ipcc.ch>.
- IPCC Fifth Assessment Report (AR5) [Электронный ресурс] / IPCC. – 2013. – Режим доступа: <http://www.ipcc.ch>.
- Madsen et al. 2013. A review of applied methods in Europe for flood-frequency analysis in a changing environment. NERC/Centre for Ecology & Hydrology on behalf of COST.
- Milly et al. 2008. Stationarity is Dead: Whither Water Management. Science. 319: 573-574.
- Vinogradov et al. 2011. An approach to the scaling problem in hydrological modeling: the deterministic modeling hydrological system / Hydrological Processes. 25: 1055–1073.