ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО НАУЧНЫХ ОРГАНИЗАЦИЙ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Морейдо Всеволод Михайлович

«РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНСАМБЛЕВОГО ПРОГНОЗА ХАРАКТЕРИСТИК СЕЗОННОГО РЕЧНОГО СТОКА (НА ПРИМЕРЕ ПРИТОКА ВОДЫ В ЧЕБОКСАРСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ)»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

по специальности 25.00.27 - Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

на правах рукописи

Москва – 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте водных проблем Российской академии наук (ИВП РАН)

Научный руководитель: **Гельфан Александр Наумович**
доктор физико-математических наук
(специальность 25.00.27 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия)

Официальные оппоненты: **Бураков Дмитрий Анатольевич**
доктор географических наук, профессор
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет», Институт экономики, управления и природопользования, кафедра экологии и природопользования

Жук Виктор Архипович
кандидат географических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Географический факультет, кафедра гидрологии суши

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»)

Защита состоится «05» ноября 2015 г. в 14:00 часов. на заседании Диссертационного совета Д.002.040.01 при ИВП РАН по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВП РАН.
Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: 119333, Москва, ул. Губкина, д. 3. Институт водных проблем РАН, ученому секретарю диссертационного совета Д.002.040.01.
Автореферат разослан _____

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
доктор геолого-минералогических наук,
профессор Р.Г. Джамалов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Весеннее половодье и летняя межень – сезонные гидрологические явления, масштаб которых в существенной степени зависит от запасов воды, накопленных на поверхности и в подземных емкостях речного бассейна за продолжительный период, предшествующий этим явлениям. Наличие такой зависимости служит физической основой предсказуемости характеристик сезонного стока и создает возможности для долгосрочного прогноза этих характеристик с заблаговременностью, определяемой условиями разгрузки аккумулированных запасов воды в речную сеть после даты выпуска прогноза. Исследование указанных возможностей с учетом физико-географических и климатических особенностей формирования речного стока – одна из классических проблем гидрологии речных бассейнов, в решение которой значительный вклад внесли крупные отечественные ученые – представители ведущих научных школ Гидрометцентра России (Е.С. Змиева, Г.П. Калинин, В.Д. Комаров, В.Н. Паршин, Е.Г. Попов, А.И. Субботин, Е.П. Чемеренко и другие), других институтов Росгидромета (Д.А. Бураков, Л.К. Вершинина, И.Л. Калюжный, О.И. Крестовский, К.К. Павлова и другие), институтов Российской академии наук (Л.С. Кучмент, Ю.Г. Мотовилов, В.А. Румянцев и другие). В их трудах созданы и развиты методические основы построения долгосрочных прогнозов объема и максимального расхода сезонного речного стока – прогнозов, которые используются для решения актуальных водохозяйственных задач по повышению эффективности управления водными ресурсами, защиты населения от экстраординарных наводнений и гидрологических засух, мониторинга опасных гидрологических явлений на реках России. В частности, успешное решение этих задач для бассейнов рек с зарегулированным стоком требует выпускаемых с заблаговременностью несколько месяцев прогнозов объема сезонного притока воды в водохранилища, максимальных и минимальных расходов притока, продолжительности определённых фаз водного режима в периоды прохождения весеннего половодья и летней межени и других характеристик.

Усиление требований к экономической эффективности и безопасности эксплуатации воднoресурсных систем обусловливает необходимость совершенствования существующих методов долгосрочных прогнозов сезонного речного стока, повышения их точности, заблаговременности и информационного содержания. Современной

методической базой модернизации методов долгосрочных гидрологических прогнозов служат математические модели формирования речного стока, описывающие разнообразие гидрологических процессов в речном бассейне с использованием имеющихся данных гидрометеорологических наблюдений, включая полученные с помощью дистанционных технологий, информации о природных особенностях бассейна. Применение моделей формирования речного стока позволяет получить прогноз не только объема и максимального расхода стока, но и других характеристик водного режима, что дает дополнительную информацию водопользователям и создает резервы повышения экономической эффективности использования прогнозов. Дополнительные возможности расширения информационного содержания прогнозов связаны с переходом от традиционных детерминистических к ансамблевым прогнозам, результаты которых могут быть представлены в вероятностной форме с учетом различных источников ошибок прогнозов. Ансамблевый гидрологический прогноз позволяет разработать более гибкий режим управления водноресурсными системами, так как дает возможность оценить степень риска при вероятных ошибках прогноза. В отечественной практике методические основы ансамблевых долгосрочных прогнозов характеристик весеннего половодья на основе физико-математических моделей его формирования впервые разработаны в Институте водных проблем РАН Л.С. Кучментом и А.Н. Гельфаном [2007, 2009]. Усовершенствование «методов выпуска гидрометеорологических долгосрочных прогнозов (месяц, сезон), а также прогнозов экстремальных гидрометеорологических явлений и характеристик, обладающих большой степенью неопределенности, в вероятностной форме» признано отечественным профессиональным сообществом одной из приоритетных задач научных гидрологических исследований [«Решение…», 2014].

Цель работы – разработка на основе физико-математической модели формирования речного стока методов ансамблевого долгосрочного (заблаговременностью 3 месяца) прогноза характеристик весеннего и летнего притока воды к водохранилищу с учетом неопределенности метеорологических условий за период заблаговременности прогноза (на примере прогноза притока воды в Чебоксарское водохранилище).

Научная новизна работы состоит в следующем:

1. Разработана методика долгосрочного ансамблевого прогноза характеристик весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище (объема, максимального расхода, числа дней с расходами воды выше среднемноголетнего и среднего максимального весеннего расходов воды) на основе модели формирования стока с учетом стохастической неопределенности метеорологических условий за период заблаговременности прогноза (3 месяца, с 1 марта по 31 мая).

2. Предложены методы верификации результатов проверочных ансамблевых прогнозов весеннего стока (представленных в детерминистической и вероятностной формах) с использованием категориальных критериев масштаба весеннего половодья.

3. Разработана методика долгосрочного ансамблевого прогноза характеристик летнего притока воды в Чебоксарское водохранилище (объема, числа дней с расходами воды ниже среднемноголетнего летнего расхода воды) на основе модели формирования стока с учетом стохастической неопределенности метеорологических условий за период заблаговременности прогноза (3 месяца, с 1 июня по 31 августа).

4. Предложены методы верификации результатов проверочных ансамблевых прогнозов летнего стока (представленных в детерминистической и вероятностной формах) с использованием категориальных критериев глубины летней межени.

5. Предложен малопараметрический стохастический генератор погоды – система стохастических моделей, позволяющих рассчитывать методом Монте-Карло многолетние временные ряды метеорологических переменных суточного разрешения (осадков, температуры и влажности воздуха) с учетом временной и пространственной статистической связи между указанными переменными для бассейна Чебоксарского водохранилища.

6. Разработана динамико-стохастическая модель формирования снежного покрова, позволившая описать особенности пространственной корреляционной

структуры полей характеристик снежного покрова в бассейне Чебоксарского водохранилища.

Практическая значимость проведенных исследований заключается в разработке методических основ и технологий ансамблевого прогноза характеристик сезонного (весеннего и летнего) притока воды к водохранилищу, а также методов верификации ансамблевых прогнозов, которые могут быть использованы для построения соответствующих гидрологических прогнозов для других водных объектов. Созданные автором методические разработки были использованы при выполнении проекта «Разработка Методических рекомендаций по долгосрочному прогнозированию характеристик речного стока, притока воды к водохранилищам и других характеристик гидрологического режима периода половодья в бассейнах рек Российской Федерации» в рамках ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах».

Защищаемые положения:

1. Ансамблевые долгосрочные (3 месяца) прогнозы характеристик весеннего и летнего притока воды в Чебоксарское водохранилище, построенные на едином методическом подходе, включающем модель формирования речного стока (для расчета начального состояния водосбора и гидрографа стока за период заблаговременности прогноза) и стохастический генератор погоды (для задания ансамбля метеорологических условий за период заблаговременности)

2. Методы верификации результатов проверочных ансамблевых прогнозов сезонного стока (представленных в детерминистической и вероятностной формах) с использованием категориальных показателей масштаба весеннего половодья и глубины летней межени.

3. Результаты верификации долгосрочного прогноза сезонного притока воды в Чебоксарское водохранилище по данным проверочных прогнозов за 29 лет: с 1982 года (года заполнения водохранилища) до 2010 года.

4. Динамико-стохастическая модель формирования снежного покрова и результаты ее тестирования по данным снегомерных наблюдений

5. Две версии стохастического генератора погоды (точечная и пространственно распределенная) и результаты их тестирования по данным наблюдений на метеорологических станциях Европейской части России, включая бассейн Чебоксарского водохранилища.

Личный вклад автора.

Использованные в работе информационно-вычислительный комплекс ECOMAG, а также модель формирования снежного покрова были разработаны в Институте водных проблем РАН Ю.Г. Мотовиловым [1993, 1999]. Все остальные методы и модели были разработаны автором или при его непосредственном участии в соавторстве с научным руководителем.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены в качестве устных и стендовых докладов на российских и международных конференциях и научных школах: 1) Генеральная ассамблея Европейского геофизического союза (Австрия, г. Вена, 2013 г.), стендовый; 2) Генеральная ассамблея Европейского геофизического союза (Австрия, г. Вена, 2014 г.), устный; 3) Генеральная ассамблея Международного союза геодезии и геофизики (Чехия, г. Прага, 2015 г.), стендовый; 4) Конференция ОНЗ РАН «Современные и прогнозируемые изменения природных условий в высоких широтах» (Россия, г. Сочи, 2013 г.) , устный; 5) Конференция ОНЗ РАН «Современные тенденции природных процессов в полярных областях Земли и перспективы российских полярных исследований» (Россия, г. Сочи, 2014 г.), устный; 6) Конференция научного совета по водным ресурсам суши ОНЗ РАН (Россия, г. Цимлянск, 2012 г.), устный; 7) Конференция научного совета по водным ресурсам суши ОНЗ РАН (Россия, г. Туапсе, 2013 г.), устный; 8) Конференция научного совета по водным ресурсам суши ОНЗ РАН (Россия, г. Петрозаводск, 2015 г.), устный; 9) Конференция НОЦ МГУ – ИВП РАН (Россия, г. Москва, 2012 г.), устный; 10) Конференция НОЦ МГУ – ИВП РАН (Россия, г. Москва, 2013 г.), устный; 11) Конференция Ассоциации инженерных изысканий в строительстве (Россия, г. Москва, 2013 г.), устный; 12) VII Всероссийский гидрологический съезд (Россия, г. Санкт-Петербург, 2013 г.), стендовый; 13) Международная конференция и школа-семинар для молодых ученых и аспирантов им. Ю.Б. Виноградова Первые Виногра-

довские Чтения «Будущее гидрологии» (Россия, г. Санкт-Петербург, 2013 г.), устный, отмечен дипломом за лучший доклад

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ, из них 4 в научных изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из 4 глав, введения и заключения. Объем текста составляет 185 страниц. Диссертация содержит 50 рисунков и 33 таблицы. Библиографический список включает 91 источник. Текст дополнен 3 приложениями.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится общая характеристика работы, показана её актуальность и научная новизна, обосновывается теоретическая и практическая значимость исследования. Сформулированы и перечислены положения, выносимые на защиту.

В первом разделе **Главы 1** приведен обзор методов составления долгосрочных прогнозов характеристик стока равнинных рек за период весеннего половодья и летней межени. Описаны методики составления детерминистических прогнозов сезонного стока, разработанные в нашей стране и за рубежом, основанные как на эмпирических зависимостях прогнозируемой величины стока от предшествующего состояния водосбора, так и на использовании моделей формирования речного стока. Показано, что с помощью таких моделей появляется возможность прогнозировать не только объем стока, но и другие характеристики водного режима, что расширяет информационное содержание прогнозов и создает тем самым возможности для повышения экономической эффективности их использования.

Во втором разделе дан обзор ансамблевых методов прогнозирования сезонного речного стока как дополнительной возможности расширения их информационного содержания. В отличие от традиционно применяемых детерминистических (однозначных) прогнозов, которые позволяют определять лишь наиболее вероятное значение прогнозируемой величины, ансамблевые прогнозы дают информацию о ее менее вероятных значениях. Эта информация может иметь большое значение для разработки более гибкого режима управления водноресурсными системами. Приведены при-

меры методов ансамблевого сезонного прогноза, учитывающего неопределенность задания метеорологических условий за период заблаговременности, - в том числе, система ESP Национальной службы погоды США, подходы, разработанные в Институте водных проблем РАН для [Кучмент, Гельфан, 2007, 2009] и др.

Во последнем разделе Главы 1 приводится обзор основных методов верификации методов прогноза характеристик сезонного речного стока. Рассмотрены как традиционные методы, широко применяемые для верификации гидрологических прогнозов, представленных в детерминистической форме, так и менее распространенные в гидрологии методы верификации вероятностных прогнозов, а также категориальных прогнозов (прогнозов попадания прогнозируемой величины в ту или иную заданную категорию), основанных на анализе таблиц сопряженности.

В **Главе 2** описана разработка модели формирования бокового незарегулированного притока воды к Чебоксарскому водохранилищу на основе физико-математической модели формирования стока ECOMAG, созданной Ю.Г. Мотовиловым [Motovilov et al., 1999] на базе достижений школы физико-математического моделирования гидрологических процессов ИВП РАН [Кучмент и др., 1983]. Модель позволяет рассчитать по имеющимся метеорологическим данным (измеренным на метеорологических станциях, расположенных в пределах моделируемого бассейна, или прогнозируемым) ход ежедневных расходов воды в заданных створах речной сети, расходов притока воды к водохранилищу, а также других гидрологических переменных, таких как характеристики снежного покрова, влажности почвогрунтов, испарения, уровня грунтовых вод и т.п.

В первом разделе Главы 2 описывается структура модели, и приводятся основные уравнения, по которым производится расчет гидрологических характеристик речного бассейна, включая гидрографы ежедневного речного стока.

Во втором разделе Главы 2 приводится краткая физико-географическая характеристика бассейна Чебоксарского водохранилища, с описанием климатических особенностей формирования гидрологического режима.

В третьем разделе Главы 2 описывается процедура адаптации модели ECOMAG к данным наблюдений на водосборе Чебоксарского водохранилища, при-

водятся основные источники информации для модели, такие, как цифровая модель рельефа, модельная речная сеть, карты типов почв и растительности, а также исходная метеорологическая информация и ряды фактических значений бокового (незарегулированного) притока воды к водохранилищу, по которым калибровались параметры модели. Калибровка модели производилась по фактическим данным о расходах воды за период с 2000 по 2010 год; проверка модели на независимых данных производилась для периода с 1982 (года заполнения водохранилища) по 2000 год. Рассчитанные ежедневные расходы бокового притока воды к водохранилищу сравниваются с соответствующими фактическими величинами на рис. 1.

Показано, что разработанная модель позволила с удовлетворительной точностью рассчитать по данным метеорологических измерений характеристики бокового притока воды к водохранилищу в весенний и летний сезоны года, что дало основания использовать эту модель для решения поставленной в настоящем исследовании прогностической задачи.

Глава 3 посвящена разработке стохастических моделей метеорологических воздействий на речной водосбор (т.н. стохастического генератора погоды), которые используются в дальнейшем для моделирования методом статистических испытаний ансамблей временных рядов суточных значений осадков, температуры и влажности воздуха за период заблаговременности сезонного прогноза притока воды в водохранилище. Сочетание модели формирования речного стока со стохастическим генератором погоды позволяет воспроизводить реакции гидрологической системы на множество возможных метеорологических воздействий за период заблаговременности и получать большой ансамбль прогнозируемых гидрографов стока для построения надежных выборочных оценок прогнозируемых величин.

В главе описываются разработанные при непосредственном участии автора два стохастических генератора погоды: (1) точечный NEWGEN, позволяющий моделировать временные ряды метеорологических переменных суточного разрешения в отдельных точках бассейна без учета пространственной статистической связности рядов, и (2) пространственно распределенный SFRWG для расчета тех же временных рядов, но с учетом пространственной структуры метеорологических полей. Приво-

дятся результаты испытаний разработанных генераторов погоды по данным метеорологических наблюдений.

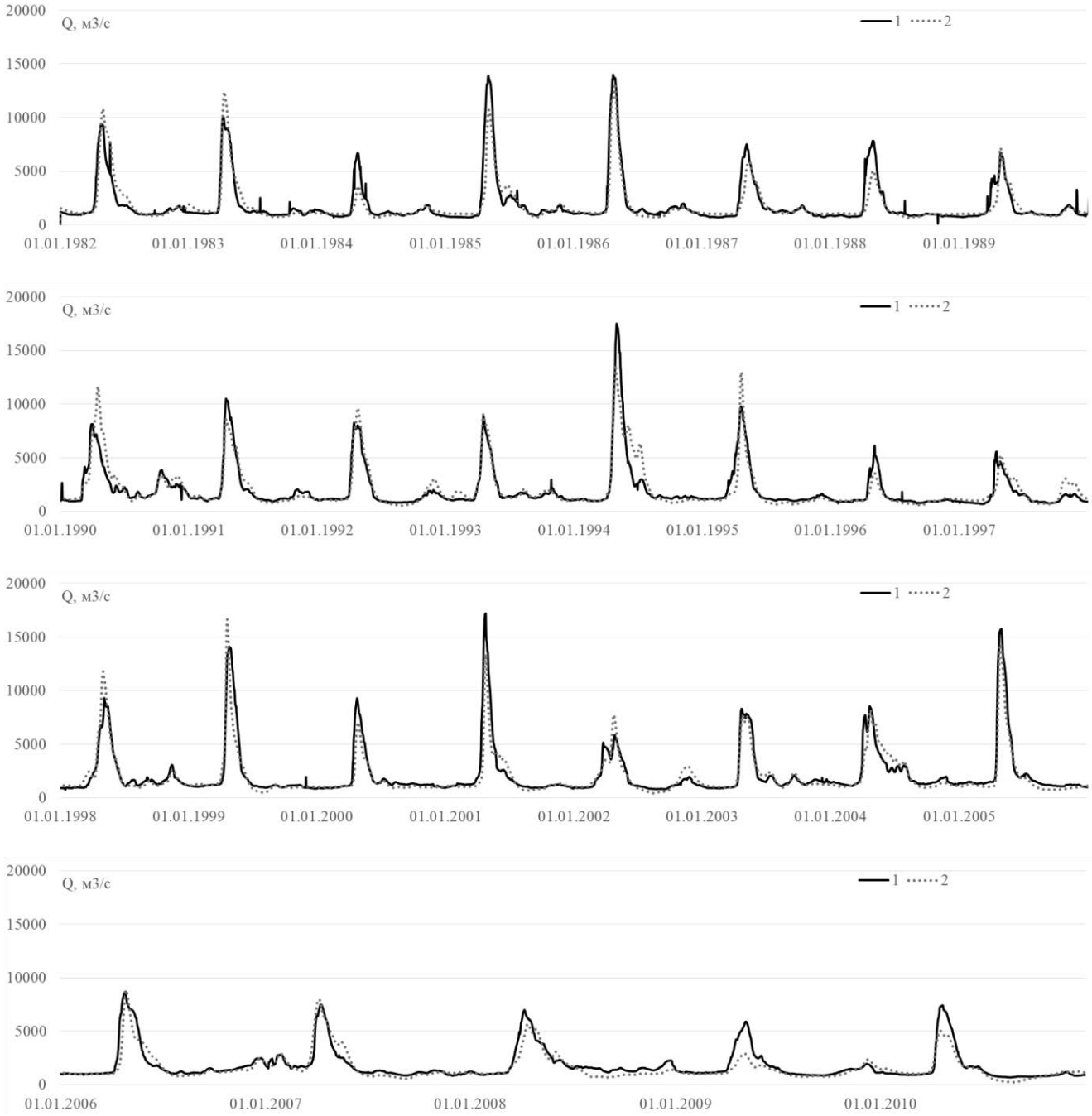

Рисунок 1 – Фактические (1) и рассчитанные (2) по модели ECOMAG расходы бокового притока воды к Чебоксарскому водохранилищу

Описана структура стохастического генератора погоды NEWGEN. Модель среднесуточной температуры воздуха представляет собой аддитивную модель с сезонным трендом и случайными отклонениями от него, которые рассчитываются по модели авторегрессии I порядка. Суточные суммы атмосферных осадков описываются моделью независимых гамма-распределённых случайных величин в сочетании с

моделью дискретной Марковской цепи первого порядка. Величина дефицита влажности воздуха рассчитывается по модели независимых гамма-распределённых случайных величин с учетом наличия или отсутствия осадков в расчетный день.

Для оценки параметров и тестирования разработанного генератора погоды NEWGEN использовались данные многолетних наблюдений за среднесуточными значениями температуры и относительной влажности воздуха, а также суточными суммами осадков, полученные на 36 метеостанциях, расположенных в бассейне Волги. Тестирование осуществлялось путем сопоставления статистических характеристик, определенных по смоделированным методом Монте-Карло и фактическим временным рядам метеорологических величин для каждой станции. Расчёты показали, что разработанный точечный генератор погоды позволяет удовлетворительно воспроизвести временны́е ряды осадков, температуры и влажности воздуха разного временно́го осреднения (год, месяц, сутки) на метеорологических станциях рассматриваемой территории Европейской части России.

В разделе 2 Главы 3 описывается пространственно распределенный генератор погоды SFRWG, предназначенный для моделирования методом Монте-Карло многолетних временных рядов среднесуточных значений температуры и дефицита влажности воздуха, суточных сумм осадков с учетом взаимной временной и пространственной статистической связности перечисленных метеорологических переменных. В основу генератора погоды положен метод пространственных фрагментов, представляющий собой модификацию метода фрагментов Г.Г. Сванидзе и описанный в нашей работе [Гельфан, Морейдо, 2015]. Оценка параметров разработанного генератора погоды осуществлялась по многолетним рядам наблюдений на 15 метеорологических станциях, расположенных в бассейне Чебоксарского водохранилища или вблизи его границ. Для проверки качества разработанного генератора погоды сравнивались следующие статистические характеристики, определенные по фактическим и искусственным рядам метеорологических переменных: средние многолетние величины за год, календарный месяц и календарные сутки; стандартные отклонения среднегодовых и среднемесячных величин; корреляции между среднегодовыми (среднемесячными) значениями на отдельной станции и соответствующими значениями на других станциях; пространственные корреляционные функции значений осадков, температу-

ры и влажности воздуха, осредненных за разные временные интервалы (год, месяц, сутки).

На рис. 2 в качестве примера показаны пространственные корреляционные функции среднемесячных значений температуры воздуха и осадков для января-марта. Оценки корреляций, полученные по смоделированным рядам, лежат в пределах 90 %-х доверительных интервалов соответствующих оценок по фактическим рядам наблюдений. Аналогичные результаты сравнения пространственных корреляционных функций получены также для среднесуточных значений метеорологических переменных.

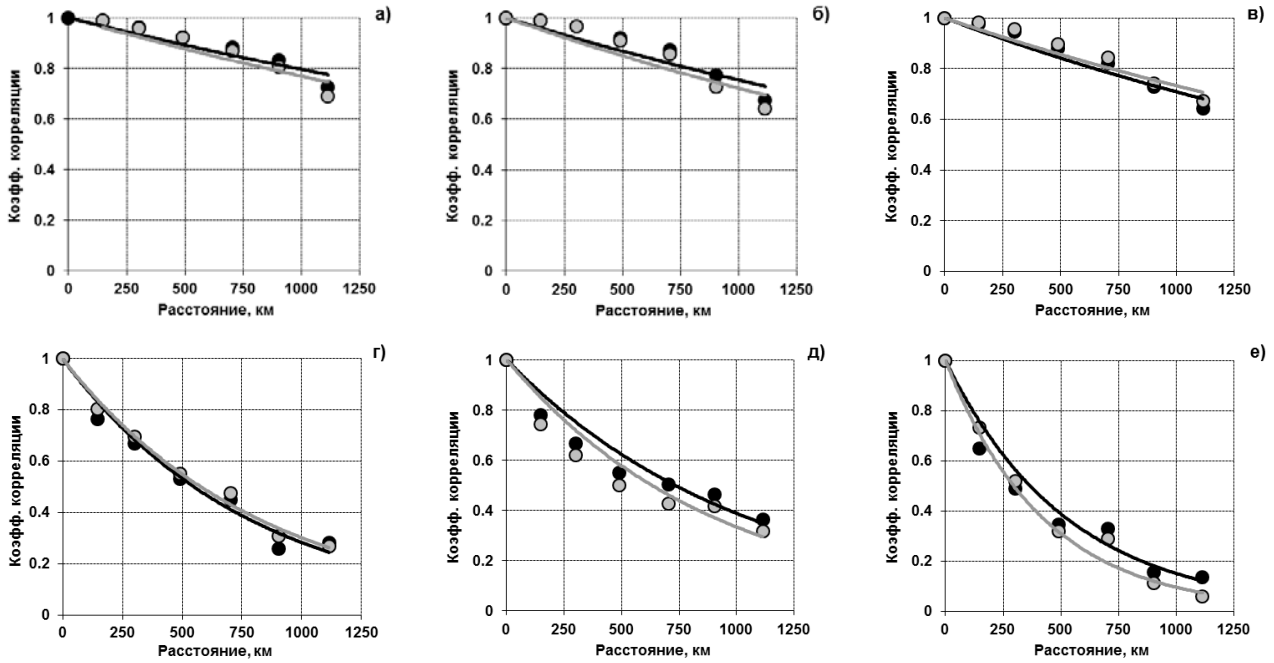

Рисунок 2 - Пространственные корреляционные функции среднемесячных значений температуры воздуха (верхний ряд) и осадков (нижний ряд) за январь (а, г), февраль (б, д) и март (в, е). Черные точки – фактические значения, серые – модельные. Линиями показаны аппроксимирующие экспоненциальные функции.

Результаты проведенных экспериментов позволили сделать вывод, что разработанный стохастический генератор погоды SRFWG позволяет моделировать искусственные ряды среднесуточных значений температуры и дефицита влажности воздуха, суточных сумм осадков, статистические характеристики которых (средние, дисперсии, пространственные корреляционные функции) оказались в пределах точности оценок соответствующих характеристик по рядам наблюдений за этими метеорологическими переменными на рассматриваемой территории. Важно подчеркнуть, что этот

вывод оказался справедлив для разных временных осреднений искомых переменных – от года до суток.

Последний раздел Главы 3 посвящен описанию тестов, служащих для проверки возможностей разработанных генераторов погоды к воспроизведению вероятностных свойств снежного покрова на рассматриваемых территориях. Для такой проверки мы разработали динамико-стохастическую модель, в структуре которой созданные стохастические генераторы погоды были объединены с детерминистической моделью формирования снежного покрова, позволяющей рассчитывать характеристики снежного покрова по измеренным или смоделированным метеорологическим данным. В качестве детерминистического компонента динамико-стохастической модели нами использовалась модель формирования снежного покрова, разработанная Ю.Г. Мотовиловым [1993].

Калибровка модели формирования снежного покрова производилась по данным маршрутных наблюдений за запасами воды в снежном покрове и высоте снега в поле на тех же метеорологических станциях, что были использованы для создания и проверки генераторов погоды. Данные о характеристиках снежного покрова охватывают период с 1966 по 2009 г.; продолжительность рядов наблюдений колеблется от 8 до 43 лет. Анализ полученных результатов показал, что для большинства станций получены удовлетворительные результаты расчёта характеристик снежного покрова [Гельфан, Морейдо, 2014].

Разработанная модель формирования снежного покрова была применена для оценки расчетных статистических характеристик снежного покрова в пунктах метеорологических наблюдений с использованием точечного генератора погоды NEWGEN [Морейдо, 2012; Гельфан, Морейдо, 2014]**.** Развитие методов оценки расчетных статистических характеристик снежного покрова имеет значение, например, для задач инженерной гляциологии, связанных с расчетом снеговых нагрузок.

С помощью генератора погоды NEWGEN независимо для каждого пункта метеорологических измерений были смоделированы методом Монте-Карло многолетние ряды суточной суммы осадков, средней суточной температуры и влажности воздуха, которые задавались в качестве входных данных в модели формирования снежного покрова. С помощью модели для каждой станции были расчитаны многолетние

ряды суточных значений высоты и плотности снежного покрова, запасов воды в снеге. По смоделированным рядам для каждой станции были построены кривые вероятности превышения снегозапасов и высоты снега на разные даты, которые сравнивались с соответствующими кривыми, построенными по рядам наблюдений на этих станциях. В качестве примера показано сравнение построенных кривых на 28 февраля - дату выпуска прогноза долгосрочного прогноза весеннего половодья на Европейской территории России (рис. 3).

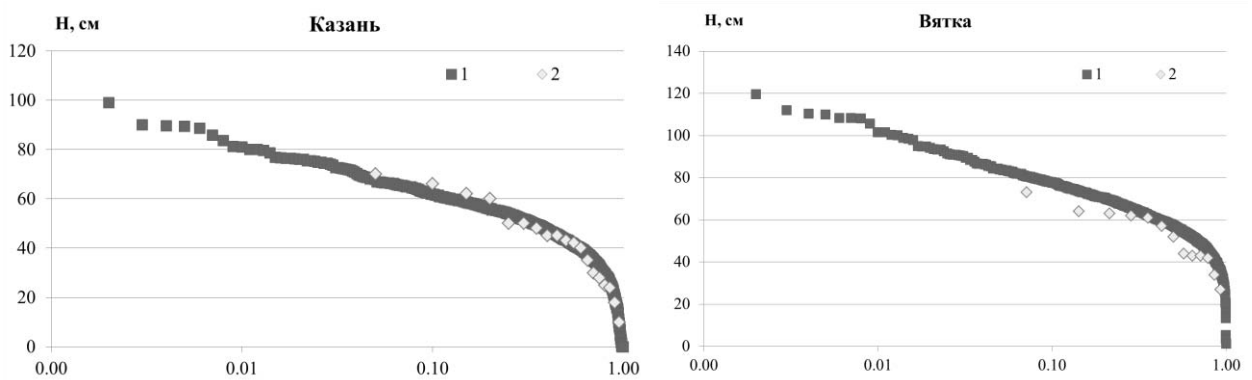

Рисунок 3 - Кривые распределения вероятности превышения высоты снега на 28 февраля, построенные по данным наблюдений (2) и по модели (1)

В заключительном подразделе Главы 3 представлены результаты моделирования вероятностных свойств полей снежного покрова с использованием пространственно распределенного генератора погоды SFRWG учитывающего пространственно-временную вероятностную структуру метеорологических факторов аккумуляции и таяния снежного покрова на территории водосбора Чебоксарского водохранилища. Более детально эти результаты описаны в статье [Гельфан, Морейдо, 2015].

С помощью модели формирования снежного покрова со случайными пространственно распределенными входами были рассчитаны соответствующие современному климату многолетние ряды среднесуточных значений характеристик снежного покрова (запаса воды в снеге и его высоты) для каждой из 15 станций бассейна водохранилища. Для проверки качества модели сравнивались пространственные структурные функции среднемесячных величин снегозапасов и высоты снега, рассчитанных по данным наблюдений, с соответствующими величинами, определенными по смоделированным рядам характеристик снежного покрова. На рис. 4 в качестве примера показано полученное удовлетворительное соответствие структурных функций среднемесячных (за март) значений снегозапасов и высоты снега, построенных по многолет-

ним данным снегомерных наблюдений в бассейне Чебоксарского водохранилища и по данным, рассчитанным с использованием сгенерированных полей метеорологических переменных. Аналогичные результаты получены для других месяцев [Гельфан, Морейдо, 2015]. Таким образом, использование разработанного стохастического генератора погоды SFRWG позволило с удовлетворительной точностью воспроизвести особенности полей снежного покрова на рассматриваемой территории.

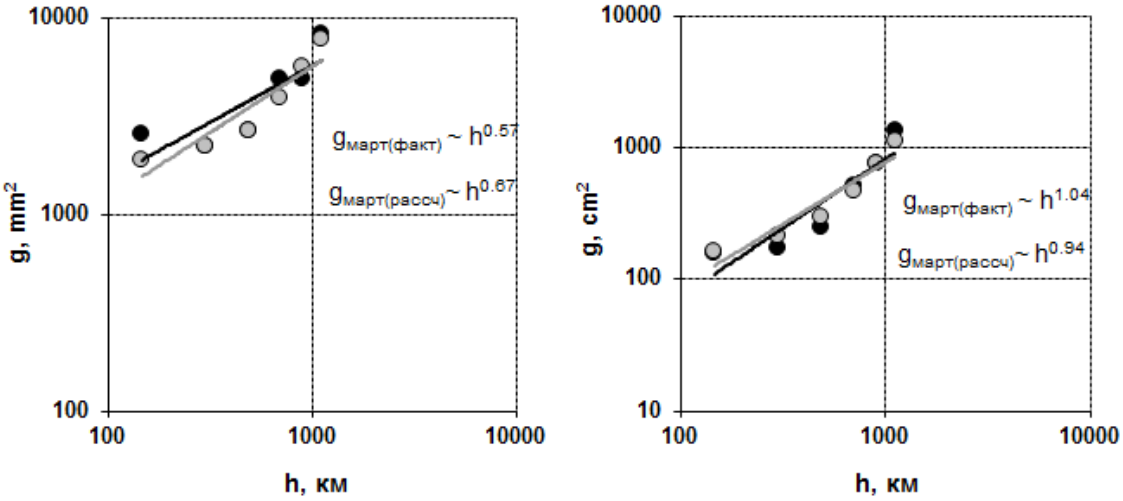

Рисунок 4 - Структурные функции полей среднемесячных значений снегозапасов (слева) и высоты снега (справа) в марте, построенные по фактическим (черные точки) и рассчитанным (серые точки) значениям

В последней **Главе 4** описана методика и представлены результаты ансамблевого прогноза сезонного притока воды к Чебоксарскому водохранилищу на основе разработанной модели формирования речного стока, описанной во 2-й главе, и с использованием стохастического генератора погоды SFRWG, описанного в 3-й главе.

Разработанная нами методика ансамблевого долгосрочного прогноза сезонного притока воды к Чебоксарскому водохранилищу на основе модели формирования стока ECOMAG включает последовательное осуществление следующих процедур: (1) расчет характеристик начального состояния речного водосбора (запасов воды в снеге, русловой сети, влажности и глубины промерзания почвы и т.п.) с помощью модели ECOMAG по данным метеорологических наблюдений за период (несколько месяцев), предшествующий дате выпуска прогноза (2) построение ансамбля возможных сценариев метеорологических условий на период заблаговременности,прогноза (3) расчет с помощью модели ECOMAG ансамбля гидрографов сезонного стока по построенному ансамблю метеорологических условий и (4) оценка прогнозируемых характеристик

стока (объема, максимального или минимального расходов и др.) по рассчитанному ансамблю гидрографов сезонного стока.

Под «сценарием метеорологических условий на период заблаговременности прогноза» здесь понимается совокупность временных рядов метеорологических величин, задаваемых на период заблаговременности с тем пространственно-временным разрешением, которое позволяет использовать эти ряды в качестве «входов» в гидрологическую модель для расчета гидрографа стока. Для модели ECOMAG это ряды суточных значений осадков, температуры и влажности воздуха, задаваемые в разных точках водосбора.

Для построения ансамбля возможных сценариев метеорологических условий на период заблаговременности нами использовалось 2 подхода. Сценарии задавались: (а) по данным метеорологических наблюдений за рассматриваемый сезон года и (б) в виде рядов метеорологических величин, рассчитанных методом Монте-Карло на основе стохастического генератора погоды SFRWG. Задание ансамбля сценариев метеорологических условий на период заблаговременности позволяет выпускать прогноз как в детерминистической, так и в вероятностной формах, в зависимости от требований потребителей прогноза.

Ниже представлены результаты проверочных ансамблевых долгосрочных прогнозов сезонного притока воды в Чебоксарское водохранилище, построенных с использованием обоих указанных подходов, и описаны методы верификации представленных результатов по фактическим данным о притоке за 29 весенних (1 марта-31 мая) и 29 летних (1 июня-31 августа) сезонов в период с 1982 (год заполнения водохранилища) по 2010 год.

1. Результаты проверочных прогнозов весеннего притока воды к водохранилищу и их верификация

На рис. 5 схематично представлены алгоритмы 2-х прогностических схем, применявшихся для прогноза весеннего притока воды к водохранилищу.

На рис. 6 в качестве примера получаемых на выходе модели результатов показан ансамбль проверочных прогнозов гидрографа притока воды к водохранилищу за

период с 1 марта по 31 мая 2009 года, рассчитанных с использованием наблюденных метеорологических сценариев.

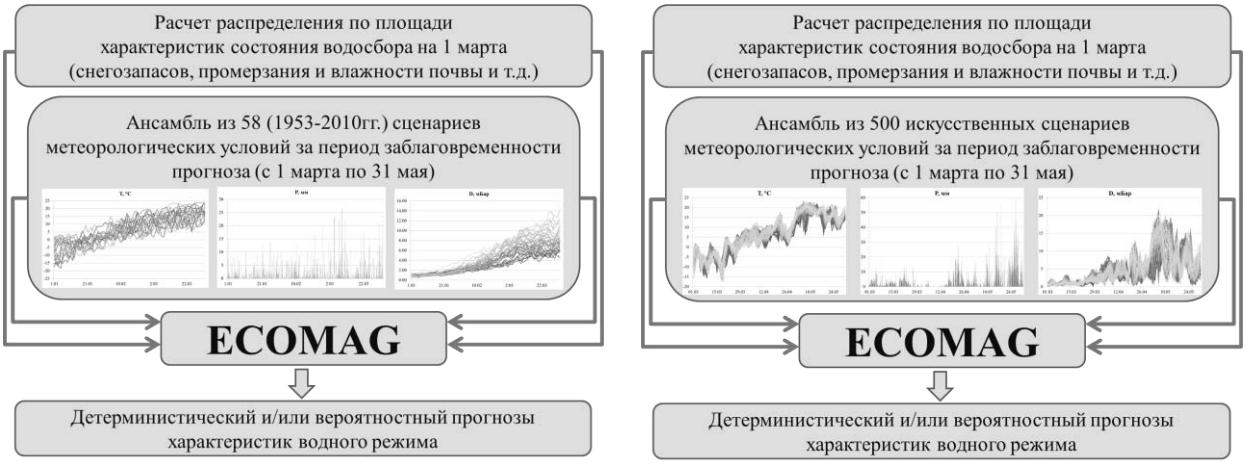

Рисунок 5 –Алгоритм долгосрочного прогноза весеннего притока воды к водохранилищу с использованием ансамбля наблюдавшихся метеорологических сценариев (Прогностическая Схема 1; слева) и ансамбля искусственных метеорологических сценариев, сгенерированных методом Монте-Карло (прогностическая Схема 2; справа)

1.1 Результаты детерминистического прогноза весеннего притока воды в водохранилище на основе результатов ансамблевых экспериментов

При построении детерминистических прогнозов на основе результатов ансамблевых экспериментов в диссертации показано, что наиболее вероятная характеристика водного режима равна соответствующей характеристике, усредненной по ансамблю прогнозируемых гидрографов стока, рассчитанных с помощью Схемы 1 или 2.

Для каждого весеннего сезона из 29-летнего проверочного периода по усредненным таким образом гидрографам стока определялись наиболее вероятные значения объема и максимального расхода весеннего притока воды к водохранилищу, а также вероятные значения количества дней с расходами выше среднемноголетнего расхода весеннего притока (4140 м^3/с) и среднемноголетнего максимального расхода весеннего притока (9504 м^3/с).

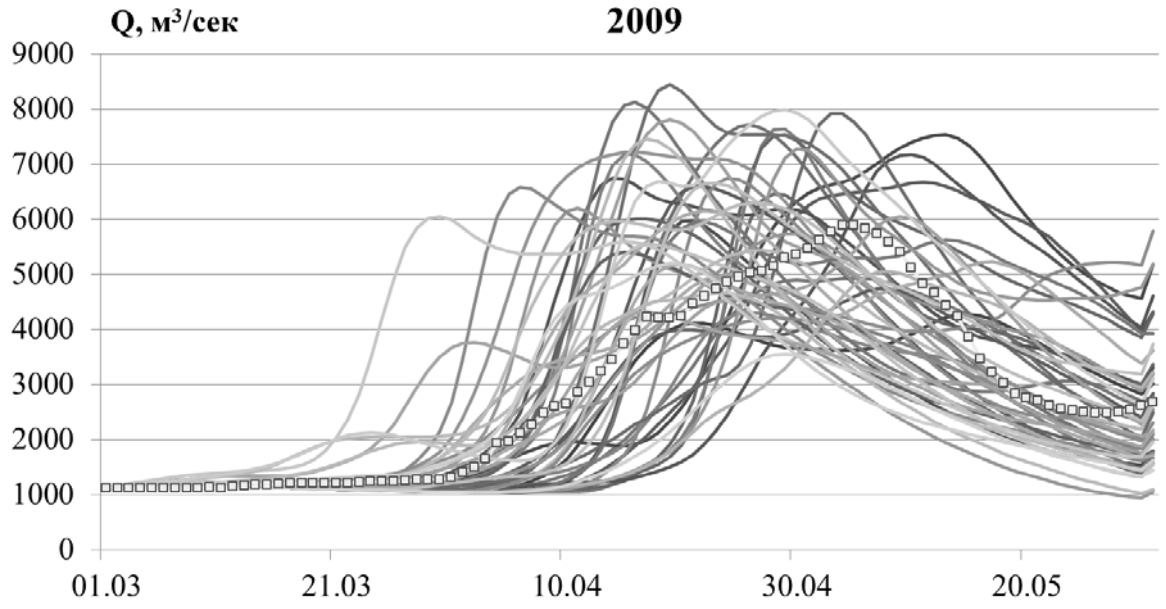

Рисунок 6 – Ансамбль гидрографов весеннего притока воды в Чебокарское водохранилище в марте-мае 2009 года, рассчитанных по сценариям наблюденных метеорологических условий за период заблаговременности прогноза (фактический гидрограф выделен линией с маркерами)

Для верификации приведенных результатов проверочных детерминистических прогнозов, построенных на ансамблевых экспериментах, нами использовались следующие критерии: (а) критерий эффективности – отношение среднеквадратических погрешностей $\boldsymbol{S}$ прогноза характеристик водного режима к среднеквадратическому отклонению σ фактических характеристик; (б) критерий оправдываемости прогнозов характеристик водного режима – доля погрешностей прогноза, лежащих в пределах допустимой погрешности, равной 0.674 σ; (в) критерии, основанные на анализе таблиц сопряженности

В табл. 1 обобщены результаты верификации прогнозов по первым двум критериям, традиционно используемым в отечественной оперативной практике.

Из таблицы видно, что рассчитанные с помощью прогностической схемы 2 проверочные прогнозы рассматриваемых характеристик притока воды к водохранилищу могут быть квалифицированы как удовлетворительные. Эффективность и оправдываемость прогнозов с помощью схемы 2 оказались выше, т.е. в данном случае использование генератора погоды позволило полнее учесть неопределенность задания метеорологических условий за период заблаговременности прогноза, чем перебор наблюдавшихся сценариев погоды.

Таблица 1 - Сравнение результатов проверочных долгосрочных детерминистических прогнозов бокового притока воды к Чебоксарскому водохранилищу, полученных при разных схемах ансамблевых экспериментов

Схема задания ансамбля метеорологичес-ких сценариев за период заблаговременности прогноза	Объем притока воды к водохранилищу за III-V, км^3		Макс. расход притока воды к водохранилищу за III-V, м^3/с		Количество дней за III-V с расходами воды больше среднемноголетнего расхода (4140 м^3/с)		Количество дней за III-V с расходами воды больше среднемноголетнего максимального расхода (9504 м^3/с)	
	S/σ	Оправдываемость	S/σ	Оправдываемость	S/σ	Оправдываемость	S/σ	Оправдываемость
Прогностическая схема 1 (наблюденные сценарии)	0.64	76 %	0.94	45 %	0.67	79 %	0.90	59 %
Прогностическая схема 2 (смоделированные сценарии)	0.63	72 %	0.81	69 %	0.70	83 %	0.74	62 %

Помимо традиционных критериев качества детерминистического гидрологического прогноза для его верификации нами были использованы показатели, широко распространенные в метеорологических прогнозах и позволяющие оценить качество прогноза события, заключающегося в попадании искомой величины стока в заранее установленные категории (т.н. «категориальный прогноз»). Были установлены следующие критерии масштаба половодья, рассчитанного по величине *ХП* отклонения объема весеннего стока от его среднемноголетнего значения, рассчитанной в долях стандартного отклонения объема стока в ряду проверочных прогнозов (Таблица 2). Показатели масштаба половодья, определенные по ряду спрогнозированных объемов притока воды к Чебоксарскому водохранилищу, сравнивались с соответствующими показателями, рассчитанными на основании данных 29-летних наблюдений.

По результатам расчетов была составлена многокритериальная таблица сопряженности (Таблица 3), которая позволяет сравнить число случаев, когда категория спрогнозированного события совпала или не совпала с категорией наблюденного события.

Таблица 2 – Критерии масштаба половодья в зависимости от величины *ХП*

Категория	Значение показателя	Описание
0	*ХП ≤0*	Низкое половодье
1	*0< ХП ≤1.0*	Среднее половодье
2	*1.0< ХП ≤1.5*	Высокое половодье
3	*1.5< ХП ≤2.0*	Выдающееся половодье
4	*ХП >2.0*	Экстраординарное половодье

Диагональные члены таблицы показывают число совпадений категорий наблюденных и спрогнозированных событий. Из таблицы видно, например, что из 16-ти случаев наблюдавшихся низких половодий правильный прогноз был дан в 13-ти, при этом оставшиеся 3 половодья были спрогнозированы как средние. В целом, точность многокритериального прогноза, рассчитанная как доля прогнозов объема стока, попавших в ту же категорию, что наблюденные величины объема стока, составила 72% (сумма диагональных членов табл. 3, деленная на общее число проверочных прогнозов), т.е. почти три четверти прогнозов показателя масштаба ожидаемого весеннего половодья оправдались.

Очевидно, что чем шире категории, относительно которых прогноз считается оправдавшимся или неоправдавшимся, тем выше точность прогноза. В качестве примера в диссертации приведены результаты верификации прогнозов объема половодья с помощью бинарной таблицы сопряженности. Последняя строится путем разделения всех фактических и прогнозируемых событий на 2 категории: (1) половодье по объему выше нормы 32.9 км^3 (идентифицируется как событие), (2) не выше нормы (идентифицируется как отсутствие события). С помощью разработанной методики нам удалось получить высокую (90%) точность прогнозирования события, состоящего в том, что половодье будет выше нормы.

По результатам прогнозов, полученных при разных ансамблевых экспериментах, сделан вывод, что методика детерминистического прогноза при использовании 2-й прогностической схемы (метеорологических сценарии на период заблаговременности прогноза моделируются с помощью генератора погоды) оказалась более эффективной, а оправдываемость прогнозов более высокой почти для всех рассматриваемых характеристик притока воды в Чебоксарское водохранилище. Можно предположить, что учет с помощью стохастического генератора погоды более широкого диапа-

зона возможных метеорологических условий позволяет улучшить прогноз по сравнению с использованием только наблюденных сценариев погоды за период его заблаговременности.

Таблица 3 – Многокритериальная таблица сопряженности, построенная по результатам детерминистического прогноза объема весеннего притока воды в Чебоксарское водохранилище по прогностической Схеме 2.

		Наблюдения (категории)					
		0 (низкое половодье)	1 (среднее половодье)	2 (высокое половодье)	3 (выдающееся половодье)	4 (экстраординарное половодье)	Итог
Прогноз (категории)	0 (низкое половодье)	**13**	0	0	0	0	13
	1 (среднее половодье)	3	**6**	1	1	1	12
	2 (высокое половодье)	0	1	**2**	0	0	3
	3 (выдающееся половодье)	0	0	0	**0**	0	0
	4 (экстраординарное половодье)	0	0	1	0	**0**	1
Итог		16	7	4	1	1	**29**

1.2 Результаты вероятностного прогноза весеннего притока воды в водохранилище на основе результатов ансамблевых экспериментов

Наиболее распространенное и информативное представление вероятностного прогноза речного стока заключается в построении интегральной функции распределения вероятности прогнозируемой величины. На сравнении интегральных функций распределений вероятности прогнозируемой и наблюденной величин стока построены методы верификации вероятностных прогнозов, широко применяемые в оперативной метеорологии [Груза, Ранькова, 1983; Wilks, 1995] и со сравнительно недавних пор используемые для оценки качества ансамблевых гидрологических прогнозов (см., например, [Кучмент, Гельфан, 2007, 2009]).

На рис. 7 в качестве примера показаны функции распределения прогнозируемых объемов и максимальных расходов притока воды к Чебоксарскому водохранилищу, построенные по полученным в результате ансамблевых экспериментов выборкам объемом 500 значений (2-я прогностическая схема) и 57 значений (1-я прогностическая схема) для сезона 1986 года, когда было зарегистрировано одно из самых вы-

соких половодий за период наблюдений. На этом же рисунке показаны функции распределения фактических величин стока.

В качестве критерия эффективности вероятностного прогноза нами использовалась так называемая оценка точности ранжированной вероятности RPSS (Ranked Probability Skill Score). Эта оценка рассчитывается как

$$RPSS = 1 - \frac{\overline{RPS}}{\overline{RPS_{cl}}} \qquad (1)$$

где $\overline{RPS}$ – средний квадрат отклонений ординат интегральных функций распределения фактической величины и рассчитанных с помощью прогностической методики; $\overline{RPS}_{cl}$ - то же отношение, но при использовании в качестве прогностической методики климатического прогноза.

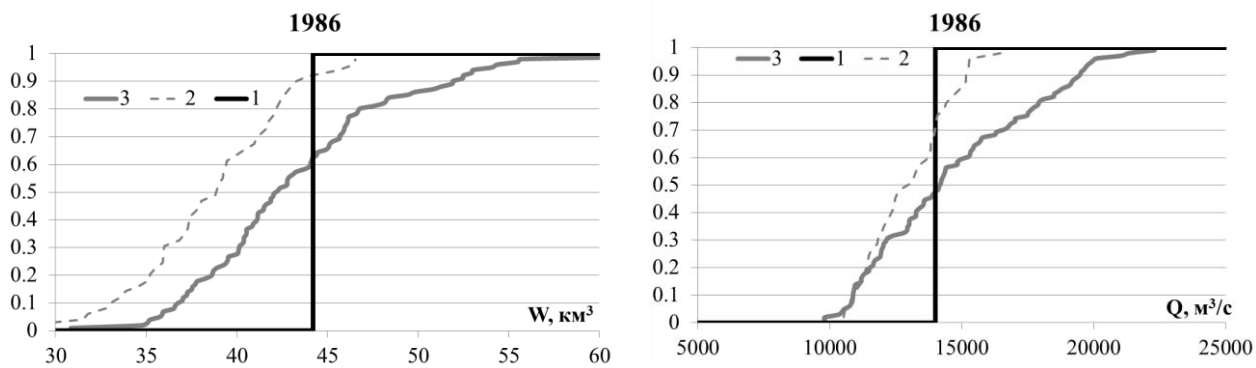

Рисунок 7 - Интегральные функции распределения долгосрочных прогнозов объема (слева) и максимального расхода (справа) весеннего притока воды к Чебоксарскому водохранилищу по ансамблю фактических (2) и сгенерированных (3) погод в сравнении с распределением фактических характеристик стока (1) для высокого половодья 1986 года

Если значение *RPSS* положительно, то применение прогностической методики дает пользователю дополнительную информацию по сравнению с информацией, содержащейся в климатическом прогнозе. При идеальном прогнозе *RPSS*=1.

Для прогноза объема притока воды в Чебоксарское водохранилище по ансамблю фактической погоды значение *RPSS* составило 0.33, а для ансамбля сгенерированной погоды – 0.38. Иными словами, соответствующие прогностические схемы оказались на 33 % и 38 % эффективнее климатического прогноза.

Одним из распространенных критериев качества вероятностного прогноза в метеорологии служит показатель Брайера (BS, Brier score), оценивающий среднеквадра-

тическое отклонение вероятности прогнозируемого события от вероятности фактического события. С помощью указанного критерия нами была оценена эффективность разработанной прогностической методики на примере прогноза вероятности наступления события, состоящего в том, что объем половодья окажется выше климатической нормы. Эффективность долгосрочного ансамблевого прогноза такого события составила по критерию Брайера 0.62, т.е. этот прогноз оказался на 62 % эффективнее прогноза по климатической вероятности наступления указанного события.

2. Результаты проверочных прогнозов летнего притока воды к водохранилищу и их верификация

На рис. 8 схематично представлены алгоритмы двух прогностических схем, применявшихся для прогноза летнего притока воды к водохранилищу. На рис. 9 в качестве примера получаемых на выходе модели результатов показан ансамбль проверочных прогнозов гидрографа притока воды к водохранилищу за период с 1 июня по 31 августа 2002 года, рассчитанных с использованием наблюденных метеорологических сценариев (прогностическая Схема 1).

2.1 Результаты детерминистического прогноза летнего притока воды в водохранилище на основе результатов ансамблевых экспериментов

Для каждого летнего сезона из 29-летнего проверочного периода по усредненным гидрографам стока, рассчитанным за период с 1 июня по 31 августа, определялись наиболее вероятные значения объема притока воды к водохранилищу, а также продолжительность стояния расходов воды менее среднего многолетнего (1449 м^3/с) и среднего минимального (990 м^3/с) значений за летний сезон.

Для верификации приведенных результатов проверочных детерминистических прогнозов, построенных на ансамблевых экспериментах, нами использовались критерий эффективности S/σ и критерий оправдываемости, использовавшиеся ранее для верификации прогнозов весеннего стока.

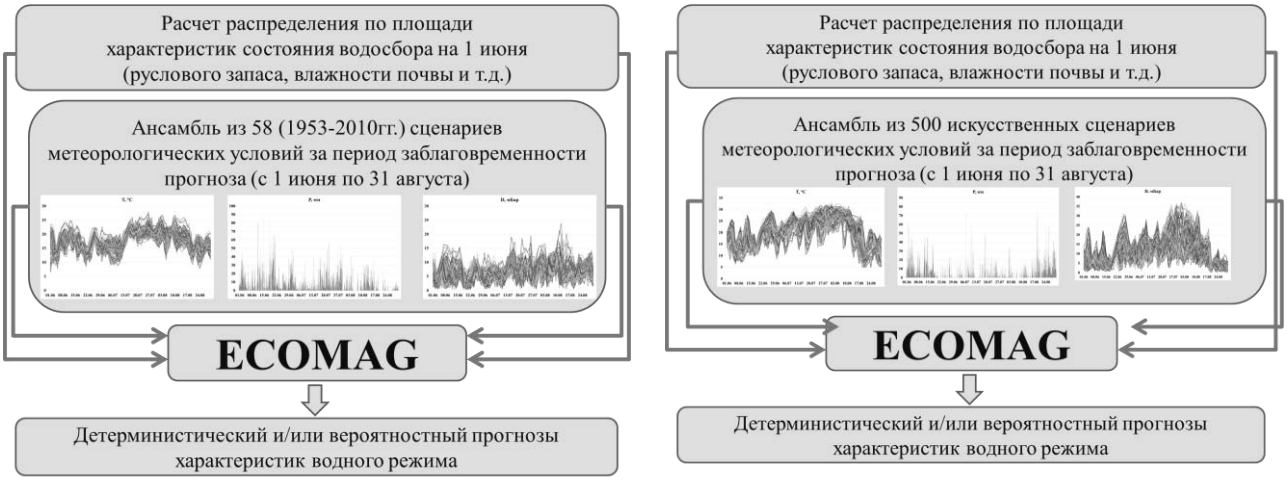

Рисунок 8 –Алгоритм долгосрочного прогноза летнего притока воды к водохранилищу с использованием ансамбля наблюдавшихся метеорологических сценариев (Прогностическая Схема 1; слева) и ансамбля искусственных метеорологических сценариев, сгенерированных методом Монте-Карло (прогностическая Схема 2; справа)

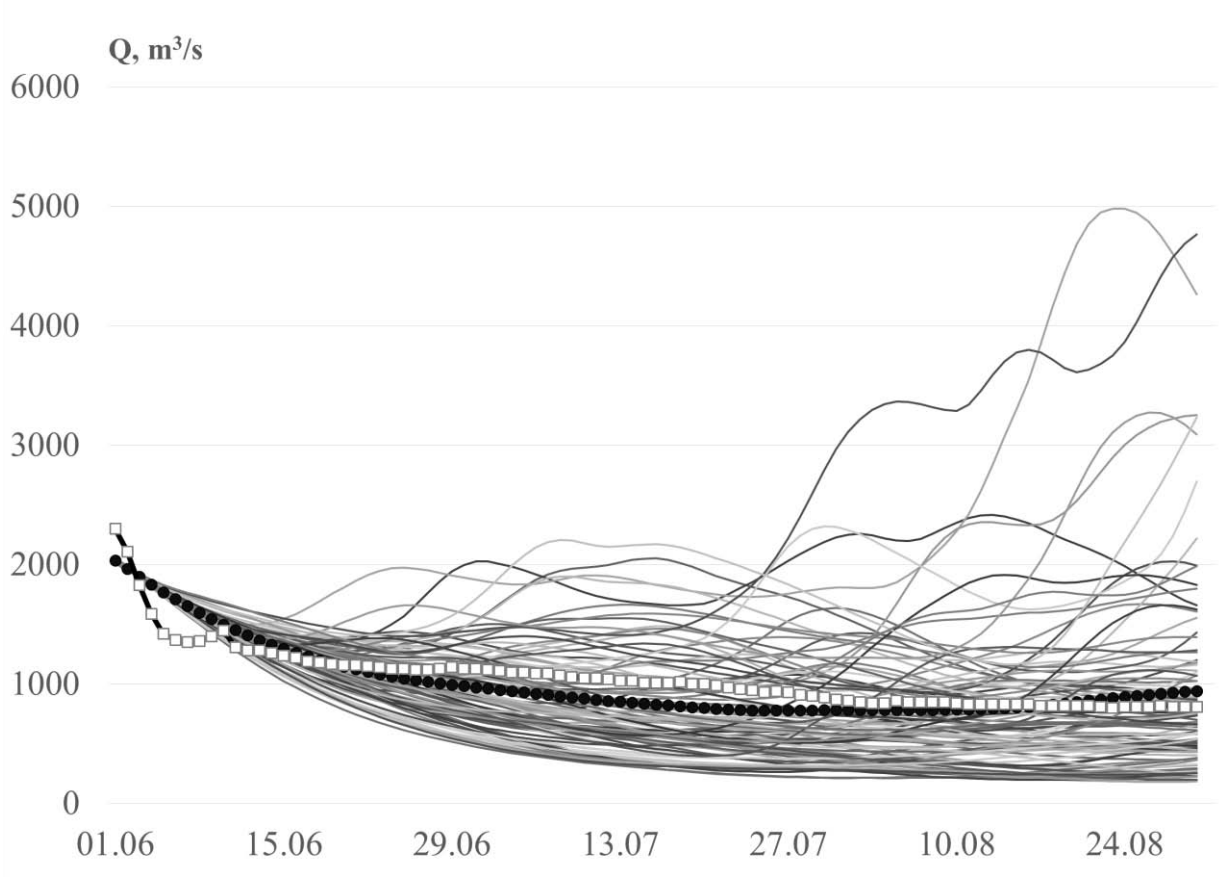

Рисунок 9 – Ансамбль гидрографов летнего притока воды в Чебоксарское водохранилище в июне-августе 2002 года, рассчитанных по сценариям наблюденных метеорологических условий за период заблаговременности прогноза (фактический гидрограф показан линией со светлыми маркерами, средний по ансамблю – линией с черными маркерами)

В табл. 4 обобщены результаты верификации прогнозов по этим критериям, традиционно используемым в отечественной оперативной практике.

Таблица 4 – Сравнение результатов проверочных долгосрочных детерминистических прогнозов летнего притока воды к Чебоксарскому водохранилищу, полученных при разных схемах ансамблевых экспериментов

Схема задания ансамбля метеорологичес-ких сценариев за период заблаговременности прогноза	Объем притока воды к водо-хранилищу за VI-VIII, км^3		Количество дней за VI-VIII с расходами воды меньше средне-многолетнего расхода (1449 м3/с)		Количество дней за VI-VIII с расходами воды меньше средне-многолетнего мини-мального расхода (990 м3/с)	
	S/σ	Оправды-ваемость	S/σ	Оправды-ваемость	S/σ	Оправды-ваемость
Прогностическая схема 1 (по ансамблю наблюденных сценариев)	0,83	69 %	0,77	69 %	1,71	17 %
Прогностическая схема 2 (по ансамблю смоделирован-ных сценариев)	0,80	79 %	0,75	69 %	1,66	21 %

Как видно из таблицы, с помощью разработанной методики удалось получить удовлетворительное качество проверочных прогнозов объема летнего стока и продолжительности периода с расходами воды ниже среднемноголетней величины расхода за летний сезон. Прогноз количества дней с расходами ниже среднемноголетнего минимального летнего расхода оказался неэффективным. В целом, ухудшение точности прогноза характеристик летней межени по сравнению с расчетами весеннего половодья может быть следствием погрешностей в описании гидрологической моделью динамики грунтовой составляющей речного стока.

Для определения глубины межени были установлены следующие критерии масштаба маловодья, рассчитанного по величине *ХМ* отклонения объема летнего стока от его среднемноголетнего значения, рассчитанной в долях стандартного отклонения объема стока в ряду проверочных прогнозов (Таблица 5).

Полученные показатели глубины летней межени сравнивались с соответствующими показателями, рассчитанными на основании данных 29-летних наблюдений за притоком к Чебоксарскому водохранилищу.

Таблица 5 – Критерии масштаба маловодья в зависимости от величины ХП

Категория	Значение показателя	Описание
0	$ХМ \geq 0$	Отсутствие маловодья
1	$-1.0 < ХМ \leq 0$	Среднее маловодье
2	$-1.5 < ХМ \leq -1.0$	Низкое маловодье
3	$-2.0 < ХМ \leq -1.5$	Опасное маловодье
4	$ХМ \leq -2.0$	Экстраординарное маловодье

По результатам расчетов была составлена многокритериальная таблица сопряженности (Таблица 6), аналогичная вышеприведенной таблице 2.

Из приведенной таблицы видно, например, что из 13-ти случаев наблюдавшихся средних маловодий прогностическая схема 2 дала верный прогноз в 9 случаях, в одном случае спрогнозировали низкое маловодье, а в 3 – не прогнозировали маловодья. Лучше всего прогнозировалось отсутствие маловодья – прогноз по схеме 2 оправдался в 11 случаях из 13.

В целом, точность многокритериального прогноза, рассчитанная как доля прогнозов объема стока, попавших в ту же категорию, что наблюденные величины объема стока, составила 66% для схемы 1 и 69% для схемы 2.

Таблица 6 – Многокритериальная таблица сопряженности, построенная по результатам детерминистического прогноза объема летнего притока воды в Чебоксарское водохранилище по прогностической Схеме 2.

		Наблюдения (категории)					
		0 (Отсутствие маловодья)	1 (Среднее маловодье)	2 (Низкое маловодье)	3 (Опасное маловодье)	4 (Экстраординарное маловодье)	Итог
Прогноз (категории)	0 (Отсутствие маловодья)	**11**	3	1	0	0	15
	1 (Среднее маловодье)	2	**9**	1	0	0	12
	2 (Низкое маловодье)	0	1	**0**	0	0	1
	3 (Опасное маловодье)	0	0	1	**0**	0	1
	4 (Экстраорди-Нарное маловодье)	0	0	0	0	**0**	0
Итог		13	13	3	0	0	**29**

2.2 Результаты вероятностного прогноза летнего притока воды в водохранилище на основе результатов ансамблевых экспериментов.

Для двух схем прогноза притока в Чебоксарское водохранилище за 3 летних месяца были построены интегральные кривые функций распределения вероятностей. На рис. 10 представлены графики интегральных функций распределения объемов сезонного притока и минимальных летних расходов притока воды к Чебоксарскому водохранилищу за низкую межень 1992 года.

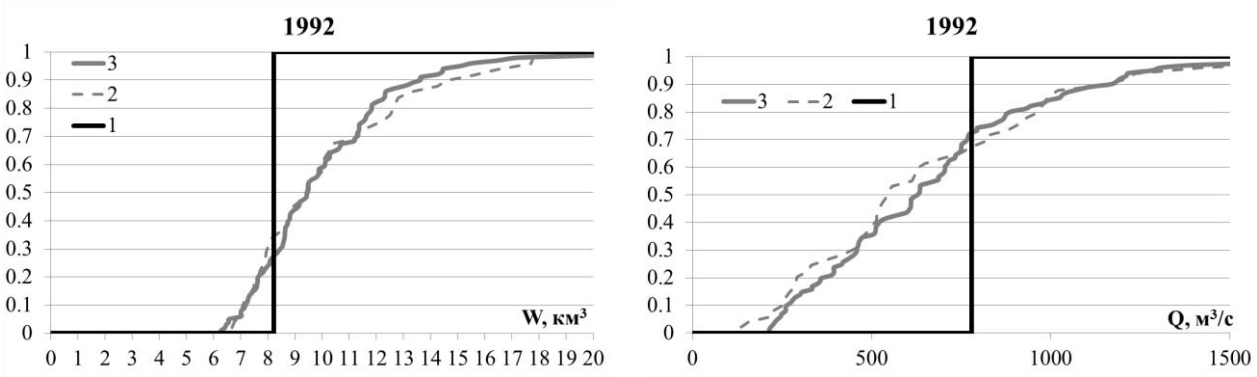

Рисунок 10 - Интегральные функции распределения долгосрочных прогнозов объема (слева) и минимального расхода (справа) меженного притока воды к Чебоксарскому водохранилищу по ансамблю фактических (2) и сгенерированных (3) погод в сравнении с распределением фактических характеристик стока (1) для низкой межени 1992 года

Для прогноза объема притока воды в Чебоксарское водохранилище по ансамблю фактической погоды значение *RPSS* (формула 1) составило 0.31, а для ансамбля сгенерированной погоды – 0.37. Иными словами, соответствующие прогностические схемы оказались на 31 % и 37 % эффективнее климатического прогноза.

Для оценки качества проверочных вероятностных бинарных прогнозов было оценено значение показателя Брайера (BS, Brier score) для прогноза объема летнего притока воды в водохранилище. Полученное значение *BSS*=0.23 показывает, что для рассматриваемого события (объем летнего притока ниже нормы) используемая прогностическая схема 2 на 23 % эффективнее климатического прогноза.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационного исследования:

1. Разработана методика ансамблевых прогнозов характеристик весеннего (с 1 марта по 31 мая) и летнего (с 1 июня по 31 августа) притока воды в Чебоксарское водохранилище, которая основана на едином методическом подходе, включающем:

   1.1. Модель формирования речного стока в бассейне Чебоксарского водохранилища, созданную на базе модели формирования стока ECOMAG.

   Модель позволила с удовлетворительной точностью рассчитать ход среднесуточных расходов притока воды в водохранилище по метеорологическим данным наблюдений на сети Росгидромета за 1982-2010 годы. Среднеквадратическая погрешность расчета ежедневных расходов за проверочный период (1982-1999 годы) оказалась почти втрое меньше стандартного отклонения фактических расходов за этот период.

   1.2. Стохастические модели метеорологических воздействий на водосбор (стохастический генератор погоды) для построения методом Монте-Карло ансамбля метеорологических условий, возможных за период заблаговременности прогноза.

   Разработан пространственно распределенный генератор погоды SFRWG, который проверен по данным наблюдений на 15 станциях в бассейне Чебоксарского водохранилища. Показано, что разработанный генератор погоды позволил: (1) рассчитать статистические характеристики осадков, температуры и влажности воздуха, близкие к полученным по данным измерений на отдельных станциях при разном временном усреднении (год, месяц, сутки) указанных метеорологических переменных; (2) воспроизвести пространственные корреляционные функции осадков, температуры и влажности воздуха с погрешностью, не превышающей выборочную изменчивость оценок этих функций по данным наблюдений при разном временном усреднении (год, месяц, сутки) указанных метеорологических переменных.

   1.3. Методы верификации результатов проверочных ансамблевых прогнозов (представленных в детерминистической и/или вероятностной формах), по 29-летнему ряду наблюдений, в том числе, верификации с использованием кате-

гориальных критериев масштаба весеннего половодья и глубины летней межени

По результатам проверочных прогнозов показано, что:

1.3.1. Разработанная методика позволяет построить эффективные (по существующим критериям) прогнозы не только для традиционно прогнозируемых величин объема сезонного стока, но и для таких характеристик, как максимальный расход весеннего стока, количества дней с расходами воды выше (для весеннего стока) и ниже (для летнего стока) характерных наблюденных значений, а также для показателей масштаба прогнозируемого половодья и глубины летней межени. Эффективными оказались как детерминистические (усредненные по ансамблю гидрографов стока), так и вероятностные прогнозы указанных характеристик

1.3.2. Оправдываемость детерминистических прогнозов характеристик весеннего стока (объема, максимального расхода и количества дней с расходами воды выше среднемноголетнего весеннего расхода) составила 69-83%, характеристик летнего стока (объема и количества дней с расходами воды ниже среднемноголетнего летнего расхода) – 69-79%.

1.3.3. Точность критериального (по таблицам сопряженности) прогноза масштаба весеннего половодья составила 59-72%, в зависимости от формы выпуска прогноза. Точность аналогичного прогноза глубины летней межени для детерминистического прогноза составила 69%.

1.3.4. Прогностическая схема, при которой метеорологические сценарии на период заблаговременности прогноза моделируются с помощью генератора погоды, оказалась более эффективной, а оправдываемость прогнозов более высокой, чем схема, при которой указанные сценарии задаются по данным наблюдений за предшествующие годы.

2. Разработана динамико-стохастическая модель формирования снежного покрова и снеготаяния, объединяющая в своей структуре детерминистическую модель, позволяющую рассчитывать характеристики снежного покрова по метеорологиче-

ским данным, со стохастическими генераторами погоды. Проверка модели по данным снегомерных наблюдений на 36 станциях в бассейне Волги, включая 15 – в бассейне Чебоксарского водохранилища, показала, что:

2.1. Детерминистическая модель формирования снежного покрова позволила с удовлетворительной точностью рассчитать снегозапасы и высоту снежного покрова по метеорологическим данным наблюдений на станциях. В среднем для всех станций, среднеквадратическая погрешность расчета высоты снега составила около половины стандартного отклонения ее естественной изменчивости.

2.2. В сочетании с точечным генератором погоды NEWGEN, динамико-стохастическая модель формирования снежного покрова позволила с удовлетворительной точностью рассчитать статистические характеристики межгодовой изменчивость свойств снежного покрова на отдельных станциях в бассейне Волги. Кривые вероятности превышения, построенные по многолетним рядам рассчитанных снегозапасов, оказались близки к соответствующим кривым, построенным по данным наблюдений. Предложенный метод оценки расчетных статистических характеристик снежного покрова может быть востребован в задачах инженерной гляциологии, связанных с определением снеговых нагрузок для строительных конструкций.

2.3. В сочетании с пространственно распределенным генератором погоды SFRWG, динамико-стохастическая модель формирования снежного покрова позволила рассчитать поля характеристик снежного покрова (запаса воды в снеге и высоты снега), вероятностные свойства которых близки к соответствующим свойствам наблюденных полей снежного покрова в бассейне Чебоксарского водохранилища.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Gelfan, A. N., Motovilov, Yu. G., and Moreido, V. M.: Ensemble seasonal forecast of extreme water inflow into a large reservoir, Proc. IAHS, 369, P.115-120, doi:10.5194/piahs-369-115-2015, 2015.
2. Gelfan, A.; Motovilov, Yu.; Krylenko, I.; Moreido, V. & Zakharova, E.. Testing robustness of the physically-based ECOMAG model with respect to changing conditions. Hydrological Sciences Journal, 2015. DOI:10.1080/02626667.2014.935780
3. Гельфан А.Н., Морейдо В.М. Описание макромасштабной структуры поля снежного покрова равнинной территории с помощью динамико-стохастической модели его формирования. «Лёд и Снег» №4, 2015
4. Гельфан А.Н., Морейдо В.М.. Динамико-стохастическое моделирование формирования снежного покрова на Европейской территории России. «Лёд и Снег», № 2 (126), 2014, С.44-52

Статьи в других изданиях:

5. Морейдо В.М. Построение долгосрочного ансамблевого прогноза притока воды в Чебоксарское водохранилище. Труды Всероссийской научной конференции «Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г. Петрозаводск, 2015 г., С.180-186
6. Moreido, V. Dynamic-stochastic modelling of snow cover characteristics over the European Russia. Geophysical Research Abstracts, Vol. 15, EGU2013-285, 2013
7. Gelfan, A.; Motovilov, Yu.; Moreido, V. Model-based approach to seasonal ensemble forecast of snowmelt water inflow into a reservoir. Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-3129, 2014
8. Гельфан, А.Н., Морейдо В.М. Динамико-стохастическое моделирование многолетней изменчивости максимальных снегозапасов в крупных реч-

ных бассейнах (на примере бассейна Волги). Сборник научных трудов всероссийской научной конференции «Вода и водные ресурсы: системообразующие функции в природе и экономике». Новочеркасск, 2012, С.33-41.

9. Морейдо В.М. Разработка стохастического генератора погоды для гидрологических исследований. «Ресурсы и качество вод суши: оценка, прогноз и управление» Сборник трудов Первой открытой конференции Научно-образовательного центра. 8-9 декабря 2011 г. / М.: ИВП РАН, Кафедра гидрологии МГУ им М.В. Ломоносова, 2011.

Морейдо Всеволод Михайлович

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ АНСАМБЛЕВОГО ПРОГНОЗА ХАРАКТЕРИСТИК СЕЗОННОГО РЕЧНОГО СТОКА (НА ПРИМЕРЕ ПРИТОКА ВОДЫ В ЧЕБОКСАРСКОЕ ВОДОХРАНИЛИЩЕ)

Подписано в печать 20.08.15. Формат 60x90 1/16. Гарнитура Times.

Печать цифровая. Усл.печ.л. 1.0. Тираж 100 экз. Заказ № 1.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт водных проблем Российской академии наук (ФГБУН ИВП РАН)

119333, Москва, ул. Губкина, дом 3

Отпечатано в ИВП РАН