

АННОТИРОВАННЫЙ ОТЧЕТ ПО ПРОЕКТУ

Соглашение № 8342 от «17» августа 2012 г,
дополнительное соглашение №1 от 18 марта 2013г.

Тема: «Разработка моделей и технологий дистанционной диагностики состояния и режима водных объектов суши»

Исполнитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования « Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» (географический факультет)

Ключевые слова: водные объекты, режим, мониторинг, прогнозирование, дистанционные методы исследований

1. Цель проекта

1.1. *Формулировка задачи / проблемы, на решение которой направлен реализованный проект (2-3 предложения).*

В данном исследовании предлагается решение актуальной задачи по разработке научно-обоснованной системы мониторинга и прогнозирования состояния водных объектов на основе следующих источников информационного обеспечения: 1) данных дистанционного зондирования Земли разных масштабов и типов съемки, 2) математических моделей гидрологических процессов; 3) регулярных наземных наблюдений.

1.2. *Формулировка цели реализованного проекта, места и роли результатов проекта в решении задачи / проблемы, сформулированной в п. 1.1 (2-3 предложения).*

Основная цель проекта - разработка методов дистанционной диагностики для мониторинга, инвентаризации и контроля за различными составляющими системы “водосбор - водоток - водоем”, включая формирование стока на водосборе, затопление речных пойм, формирование и изменение мутности речных вод, русловые процессы на реках, тепловой и ледовый режим водных объектов, внутриводоемные процессы, экологическое состояние водоемов с целью последующего решения экономических, экологических и природоохранных задач

2. Основные результаты проекта:

2.1. *Краткое описание основных полученных результатов).*

Согласно Техническому заданию к Соглашению № 8342 о предоставлении гранта в форме субсидии по теме «Разработка моделей и технологий дистанционной диагностики состояния и режима водных объектов суши», работы были направлены на обоснование структуры и содержания мониторинга за состоянием и изменением режима водных объектов с помощью дистанционных технологий и математического моделирования (этап 1), и разработку моделей и технологий дистанционной диагностики состояния и режима водных объектов суши (этап 2). Содержание работ включало 9 направлений, реализация исследований в рамках которых выполнялась в течении указанных двух этапов выполнения проекта:

- I. Особенности мониторинга и моделирования весеннего половодья с помощью наземной и дистанционной информации (1-й этап); разработка современных технологий накопления, обобщения и интерпретации дистанционной оперативной и режимной информации при мониторинге весеннего половодья (2 –й этап).
- II. Мониторинг мутности и температуры поверхностных вод с помощью методов дистанционного зондирования и наземных наблюдений (1-й этап); совершенствование методов дистанционного мониторинга мутности, температуры поверхности речных вод, процессов формирования и разрушения ледяного покрова (2-й этап).
- III. Диагностика состояния водных объектов суши при распространении загрязняющих веществ, при разливах нефти и нефтепродуктов на основе лидарных и информационных технологий (1-й этап); разработка единой системы технологий дистанционной диагностики состояния режима водных объектов суши с использованием моделирования типа «структура-активность» применительно к аварийным разливам нефти и нефтепродуктов (2-й этап).
- IV. Разработка информационной базы для совершенствования мониторинга и моделирования содержания кислорода в речных водах (1-й этап); методика мониторинга и моделирования содержания загрязняющих веществ и растворенного кислорода (2-й этап).
- V. Информационная и методическая основа дистанционного мониторинга русловых процессов (1-й этап); разработка методов дистанционного мониторинга русловых процессов (2-й этап).

- VI. Информационная и методическая основа гидролого-экологического мониторинга устьевых областей рек (1-й этап); гидролого-экологический мониторинг устьевых областей рек, эволюции водных объектов в зоне вечной мерзлоты (2-й этап).
- VII. Модели и технологии мониторинга лимнических процессов (1-й этап); обоснование стратегии оперативного и регулярного мониторинга экологического состояния водоемов и разработка методов диагностики внутриводоемных процессов (2-й этап).
- VIII. Особенности мониторинга фоновых и трансформированного состояния водных объектов в пределах ООПТ с помощью методов дистанционного зондирования (1-й этап); мониторинг фоновых и трансформированного состояния водных объектов в пределах ООПТ с помощью методов дистанционного зондирования (2-й этап).
- IX. Разработка нового курса лекций и практических работ «Мониторинг гидрологических процессов»

По перечисленным направлениям получены следующие основные результаты:

Направление I: (1.1.1) На основе анализа современной отечественной и зарубежной литературы показаны особенности мониторинга весеннего половодья с помощью дистанционной информации. (1.1.2) На основе современных гидрометеорологических данных рассмотрено изменение характеристик весеннего половодья рек ЕТР на примере трех крупных бассейнов - Северной Двины, Волги и Дона. Разработаны электронные карты характеристик весеннего половодья, опасных ледовых явлений. Разработаны научно-методические материалы к учебным курсам «Гидрология рек», «Гидрологические прогнозы», «Гидрология», «Моделирование гидрологических процессов», «Учение о гидросфере», «Введение в гидроинформатику», которые внедрены в образовательный процесс на кафедре гидрологии суши географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова. (1.1.3) Описаны механизмы формирования и оценки обратных связей различного знака между динамикой климата субполярной зоны Северного полушария и физико-химическими процессами в поверхностной и подземной гидросфере криолитозоны – влияния меняющегося режима поверхностных и подземных вод криолитозоны на региональный и глобальный климат с использованием дистанционных методов. Показано, что на современном этапе коэволюции климата и человеческой цивилизации криолитоэффект проявляется в усилении положительных обратных связей между изменениями климата и метановым циклом в северных районах Арктики. Парниковый криолитоэффект, а также уменьшение альбедо подстилающей поверхности и дополнительные потоки водяного пара в атмосферу вследствие увеличения озерности северной зоны полярных территорий, являются важными факторами, обуславливающими планетарный максимум наблюдаемых изменений климата в Арктике и Субарктике. (1.1.4) Выполнена оценка параметров стохастических моделей колебаний стока по данным инструментальных наблюдений. (1.1.5) Проведен анализ пространственной изменчивости стока, выявлены нарушения стационарности многолетних колебаний, распределений экстремумов стока. Основной особенностью современных изменений водного режима рек на рассматриваемой территории является существенное увеличение в последние 30 лет водности в меженные периоды, особенно в зимние месяцы. То же наблюдается и для минимального стока. Особо обращает на себя внимание тот факт, что выявленные изменения межennaleго и минимального стока охватывают одновременно обширные территории; при этом величина этого изменения как мера реакции стока на нестабильность климатических процессов зависит от физико-географических условий и конкретных особенностей водосборов. В результате произошедших изменений сезонного стока на преобладающей части ЕТР годовой сток превысил норму. Однако величина этого превышения столь незначительна для того, чтобы делать однозначный вывод о направленных систематических изменениях в многолетних колебаниях водных ресурсов. Результаты статистических расчетов свидетельствуют о том, что происходящие изменения водности в годовом разрезе находятся в пределах естественной изменчивости. (1.1.5) Разработана физико-математическая модель таяния в гляциально-нивальной зоне, отвечающая современным техническим возможностям измерения метеозапасов. (1.1.6). Реализация физико-математической модели таяния снега и льда в гляциально-нивальной зоне бассейна р.Терек при различных сценариях изменения климата приведена на примере бассейна р.Джанкуат. Сравнение результатов расчёта слоя таяния по модели с натурными наблюдениями по сети рек показало хорошую воспроизводимость моделью измерений абляции для всей территории ледника. При увеличении встречного излучения атмосферы вследствие усиления парникового эффекта на $1,5 \text{ Вт/м}^2$, увеличение температуры воздуха за период абляции на 4°C , увеличении площади моренного чехла на 180% и уменьшения прозрачности атмосферы на 5%, слой таяния ледника Джанкуат увеличится на 12–40 % в зависимости от высотной зоны. При этом если площадь ледника сократится на 30%, то объём стока с ледника увеличится на 8%. (2.1.4) Разработаны технологии получения дистанционной информации и выдачи результатов ее обработки через ГЕОПОРТАЛ МГУ (1.1.7). Произведена оценка точности определения снегозапасов методом пассивного микроволнового зондирования по данным за 2003-2010 гг. Расхождение между фактическими данными снегозапасов и максимальными снегозапасами микроволновой съемки для бассейнов рек Дон и Ока составляет примерно 33-35%, для реки Северная Двина - 53%. На отклонение данных оказывают влияние в основном два фактора: наличие потеплений и привнос за их счет жидкой фазы в снег, обнуляющей показания спутника, и залесенность территории водосбора, обе проблемы учитываются в алгоритме восстановления запасов воды в снеге (2.1.1). Проведено моделирование гидрографов стока на основе программного комплекса Esomag с использованием цифровых моделей рельефа, полученных на

основе радарных космических съемок (2.1.2). Составлены новые методики краткосрочных прогнозов гидрографов стока рек и притока воды к водохранилищам на основе модели формирования стока Ecomag и по мезомасштабной модели циркуляции атмосферы WRF, а также предложены различные варианты их корректировок. Проверочные краткосрочные прогнозы притока к Можайскому, Истринскому и Озернинскому водохранилищам с заблаговременностью от 1 до 5 суток по прогнозным значениям метеорологических характеристик, полученным по модели WRF за период половодья 2010 г. оправдались (2.1.3). Разработана методика расчета площади затопляемых территорий при колебаниях уровней и расходов воды на верхней границе расчетных участков рек на основе учета закономерностей руслового добегания вод и дешифрирования космических снимков. Составлены рекомендации по использованию гидравлических моделей затопления речных пойм и дельтовых равнин. Проанализировано влияние коэффициента шероховатости на скорости и глубины в русле и на пойме. Проведен анализ применения дистанционных данных о рельефе территории и затоплении пойм в период половодья. При наличии космических снимков среднего и высокого разрешения (выше 30м) и входной гидрологической информации для модели за те же даты, появляется возможность сопоставить расчетные и реально наблюдавшиеся (полученные с космических снимков) границы затопления территории. Таким образом, реализуется дополнительный способ контроля правильности рассчитанных уровней и исходной информации о рельефе, показавший высокую эффективность. Применение дистанционных данных о рельефе, полученных на основе радиолокационных снимков среднего пространственного разрешения, находящихся в открытом доступе, в моделировании затопления пойм, показало их недостаточную точность. На основе математического моделирования процесса заливания речных пойм доказана возможность возникновения кинематического эффекта. Он проявляется на участках речных долин, для которых характерны широкие двух- или односторонние поймы ($B_n > 2 B_p$). В таких случаях кинематический эффект изменения средней скорости объединенного потока соответствует расходам воды малой обеспеченности (1–5 %) (2.1.6). Разработана методика оценки опасности водного и ледового режима в период весеннего половодья для населения и хозяйства с помощью ГИС-технологий, на основе которой проведено районирование отдельных речных бассейнов и ЕТР в целом по степени опасности ледовых явлений (2.1.5). Разработаны научно-методические материалы к учебным курсам «Гидрология рек», «Гидрологические прогнозы», «Гидрология», «Моделирование гидрологических процессов», «Учение о гидросфере», «Введение в гидроинформатику», которые внедрены в образовательный процесс на кафедре гидрологии суши географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Направление II: (1.2.1). Выполнен анализ проблемы дистанционного зондирования водных объектов. Из космоса можно определять расходы и уровни воды, ее прозрачность, мутность и температуру. Для объективной интерпретации космической информации необходима подспутниковая информация, характеризующая состояние водных объектов на основе их прямого наземного определения. Для измерения мутности природных вод используется красный диапазон световых волн (600 – 760 нм). Для снимков SeaWiFS спектра 550 нм верхний порог чувствительности соответствует 30 г/м³, а для спектральной зоны 650 нм – 150–200 г/м³. Для рек с шириной меньше 5 м необходимо использовать космические снимки с высоким разрешением (0,5 м, Worldview). Получены зависимости между яркостью изображений водной поверхности в ближнем инфракрасном диапазоне и с синхронно измеренными значениями мутности на основе базы подспутниковых данных по рекам Камчатки и Селенги. Выявлены ограничения в применении дистанционных методов для определения мутности речных вод. Для изученных водотоков граничное содержание в воде взвеси не превышает 500 г/м³. Проверена эффективность оптических методов для наземного определения мутности речных вод. Обоснована система уравнений для перевода значений оптической мутности в весовое содержание взвешенных частиц в воде. Уравнения и их параметры имеют географическую природу изменения. Они изменяются в зависимости от природной зоны формирования стока, размер реки, фазы водного режима, а также от хозяйственной освоенности водосборов. (1.2.2) Определение температуры воды методами ДЗ производится световыми лучами длиной 10.40–12.50 мкм. Сведения о тепловом состоянии рек и водоемов можно получать с метеорологических спутников NOAA (радиометр AVHRR), Landsat-5 и Landsat-7 (6 канал радиометров ТМ и ЕТМ соответственно), TERRA (радиометры MODIS и ASTER), AQUA (радиометр MODIS). Существуют ограничения на размеры водных объектов – их размеры должны превышать несколько сотен метров. Точность данных, получаемых с помощью радиометра MODIS, не превышает 0.3–0.5°C. Они применимы только для изучения крупных водных объектов и неоднородностей поля их поверхностной температуры. Большую точность определения температуры воды обеспечивают камеры зондирования системы ASTER (0.02°C). Космические снимки Terra/ASTER позволяют оценить кинетические (энергетически обусловленные) значения температуры воды в реках и водоемах в абсолютных значениях температуры. Абсолютная погрешность определения поверхностной температуры воды составляет 1–4°K (относительная погрешность равна 0.3°K). (1.2.2, 2.2.2). Получена шкала соответствия яркостных (или цветовых) свойств космических снимков и весовых (оптических) значений мутности речных вод (2.2.1). Для мониторинга ледовой обстановки рекомендована радиолокационная космическая съемка, позволяющая давать качественную оценку ледового покрова (неподвижный лед, обводнение и дефрагментация льда, наличие и расположение промоин и полыньи, районы ледохода и свободной от льда воды), выделять участки торошения и заторов (2.2.3).

Направление III: (1.3.1) Показано, что нефтегенное загрязнение водных объектов, связанное с крупномасштабными разливами нефти при аварийных ситуациях, может приводить к чрезвычайным экологическим ситуациям, с тяжелыми последствиями для биоты (в первую очередь, гидробиоты) и населения, если им потребляется вода, загрязненная нефтегенными углеводородами. Среди технологий мониторинга вод при нефтегенном загрязнении важную роль играют дистанционные технологии, которые позволяют контролировать разливы нефти как в локализованных зонах, так и на больших пространствах, охваченных загрязнением в связи с его пространственным распространением по площади и по объему водного объекта. Традиционные лидарные технологии, как правило, используются для наблюдения за тем слоем гидрофобных углеводородов, который формируется на поверхности воды. В данной работе показано, что применение флуоресцентных лидаров высокой мощности позволяет также осуществлять наблюдение за эмульгированной и растворенной частью нефтегенного загрязнения при пороге чувствительности в пределах значений рыбохозяйственного ПДК на нефтепродукты и с достаточной специфичностью. Исследованы также некоторые возможности подобных лидаров при загрязнении вод в присутствии ледяного покрова. Учитывая ограничения в применении лидаров при наличии ледового покрова на водном объекте, в данной работе рассмотрена возможность комбинированного применения лидаров и автоматических постов контактного типа, разработанных при участии ИВП РАН. Использование такой комбинации целесообразно, например, для случая разливов нефти при её добыче с морских платформ, установленных на шельфе в условиях Арктики. (1.3.2) В работе проанализирована также необходимость оценки токсичности индивидуальных углеводородов в составе разливов нефти после обнаружения этих разливов. Показана необходимость такой оценки и рекомендовано для этих целей использование различных информационных источников, в первую очередь, международных и национальных баз данных по токсичности химических веществ. Произведен анализ информационных источников и на его основе сформирована автоматизированная поисковая система. При выборе информационных источников произведен анализ их легитимности с позиции правовой применимости этих баз в России. В целом, лидарная технология, использующая при регистрации нефтегенного загрязнения мощные флуоресцентные лидары, её сочетание с технологией, использующей автоматизированные посты мониторинга контактного типа, а также с информационными технологиями оценки токсичности компонентов разлива должна явиться важной составной частью системы снижения экологических рисков при экстремальных нефтегенных загрязнениях. (1.3.3, 2.3) Представлена единая система технологий дистанционной и контактной диагностики экологического состояния водных объектов суши при нефтегенных загрязнениях, включая аварийные разливы нефти. Для реализации дистанционных технологий предлагается использовать флуоресцентные лидары и станции аэрогамма-съемки, регистрирующие естественную радиоактивность нефти. Для обработки результатов предлагается использовать информационные технологии как на основе международных и национальных баз данных, содержащих информацию о токсичности углеводородов, так и на основе расчетных методов прогноза токсичности в зависимости от химической структуры тестируемого соединения; приводятся примеры таких расчетов. (2.3) Показано, что проблема оценки экологических последствий аварийных сбросов загрязняющих веществ (ЗВ) в водные объекты по-прежнему остается актуальной. Для идентификации изучаемого водного объекта и свойств ЗВ для создаваемой математической модели формируются соответствующие базы данных. База гидрологических данных в частности должна: уровни воды в различных характерных пунктах в определенные временные интервалы, графики колебаний уровня воды, сведения о величине прилива на устьевом участке реки, сведения о средней скорости течения на реке по участкам. Для учета влияния ветровой нагрузки на динамику потока в качестве факторов, влияющих на решение задачи, следует рассматривать известные натурные суточные изменения скорости и направления ветра, изменение температуры воздуха. Эти данные, используемые в качестве граничных и начальных условий, а также для калибровки математической модели формируются в результате экспедиционных работ на водных объектах и по опубликованным данным в различных изданиях (например, из Атласа Единой глубоководной системы). База гидрометрических и морфологических данных формируется с использованием результатов экспедиционных работ и по известным логам. Некоторые детали использования этих данных изложены ниже при описании интерфейса. База гидрохимических данных включает необходимые знания по сезонной изменчивости фоновых величин загрязняющих веществ. (1.3.4.) Создан программный комплекс для расчета распространения загрязняющих веществ в реке, основанный на системе дифференциальных уравнений динамики и переноса, в котором используется принцип, возникший первоначально для решения уравнений газовой динамики. Это возможно, поскольку уравнения мелкой воды над горизонтальным дном при отсутствии диссипации и ускорения Кориолиса с точностью до обозначений совпадают с уравнениями для баротропных течений газа с показателем адиабаты равным двум. Важным моментом при создании этого метода является использование точного решения соответствующей автоматической задачи в численном алгоритме. Благодаря этому подходу удается преодолеть сложности расчета течений при больших градиентах искомых величин, а также русел с переменным рельефом дна.

Направление IV: (1.4) В результате проведенных работ создана информационная база данных для рек бассейнов Амура, Лены, Оби (без Иртыша) и Волги. Она включает в себя сведения о кислородном режиме рек, о некоторых факторах, влияющих на содержание в воде кислорода, а также – сведения об антропогенных изменениях кислородного режима водотоков. Предложена графическая модель,

описывающая характер кислородного режима рек в бассейне Оби в зависимости от высоты местности. Предпринята попытка построения модели множественной регрессии для характеристик кислородного режима рек в бассейне Оби. Показано, что с помощью величин уклона водной поверхности рек и их порядков можно создавать статистические модели среднемесячных величин содержания растворённого кислорода удовлетворительного качества. Проведен расчёт антропогенных изменений растворённого в воде кислорода с помощью модели Стритера–Фелпса (2.4.1). Ухудшение качества водных ресурсов, связанное с поступлением загрязняющих веществ от точечных и диффузных источников, а также вторичного загрязнения водных масс за счёт загрязнённых ДО приводит к существенным осложнениям в обеспечении качественными водными ресурсами населения и предприятий. Проведенные исследования показали, что при мониторинге загрязняющих веществ необходимо учитывать не только расположение точечных источников загрязнения: промышленные предприятия, непосредственно сбрасывающие ЗВ в воду, дождевой смыв ЗВ с городских территорий, но и вторичное загрязнение вод (2.4.2).

Направление V: (1.5.1, 2.5) Даны методические основы дешифрирования космических снимков при исследовании русел и пойм и их использования для оценки русловых деформаций на реках России с привлечением различного картографического материала, фиксирующего состояние русел и пойм на определенных временные срезы. Это дало возможность проследить эволюцию русел при изменении водности рек или их трансформации при антропогенных воздействиях. Приведены методы и приемы выявления тенденций изменений морфологии и динамики русел и пойм при направленных и периодических колебаниях водности, в том числе в условиях глобальных климатических изменений.

Проведено исследование влияния речного потока в период повышения температуры воды на деформации береговых склонов, сложенных вечномерзлыми породами с включением пластов льда, с учетом процессов термоэрозии, термокарста, солифлюкции и суффозии. Исследование проводилось с помощью лабораторного моделирования, результаты которого являются основой верификации предполагаемой разработки математической модели. На основе формулы для транспортирующей способности потока и натурных данных по уменьшению размывающей скорости потока в зависимости от вида криогенной текстуры грунта в мерзлом состоянии и льдистости за счет ледяных включений была получена формула для транспортирующей способности потока в условиях многолетней мерзлоты. Экспериментально было проверено, что поперечный транспорт вещества обратно пропорционален льдистости и прямо пропорционален скорости оттаивания (1.5.2). Разработаны научно-методические материалы к учебному курсу «Русловые процессы», которые внедрены в образовательный процесс на кафедре гидрологии суши географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Направление VI: Проведен анализ возможности использования различных съемочных систем и методов дешифрирования для различных опасных гидрологических процессов в дельтах (1.6.1). Оценка трансформации состояния устьев рек России сделана с учетом изменений, во-первых, внешних факторов устьевых процессов (прежде всего – естественных и антропогенных колебаний стока воды и наносов рек и уровня приемных водоемов), во-вторых, водохозяйственных и гидротехнических мероприятий в пределах самих устьев рек (1.6.2). Предметом мониторинга устьевых областей должны быть комплекс гидрометеорологических характеристик, гидрохимических и гидробиологических показателей, направленность и интенсивность морфологических процессов, комплекс наблюдений за опасными гидрологическими явлениями. Блок наблюдений должен включать режимный и оперативный спутниковый мониторинг (или периодическую аэрофотосъемку), наземный (стационарный) гидрометеорологический мониторинг, экспедиционные (обследования местности и водных объектов). Предлагается введение нового раздела и практического задания в структуру учебного курса «Гидрология морей и устьев рек» по направлению подготовки бакалавров «Гидрометеорология» (2.6.1).

В лабораторных условиях исследовалось взаимодействие речного стока с мёрзлыми грунтами при изменении термических (потепление) и механических (влияние дождя) внешних воздействий. Определялись время оттаивания грунта, инфильтрация в грунте, перенос наносов в русле под воздействием склоновых потоков, вызванных как естественным оттаиванием мёрзлых грунтов, так и дождевыми потоками. Предложена модель прогнозирования динамики русла рек в многолетнемёрзлых породах под влиянием внешних воздействий. Описаны механизмы перехода неподвижных водных объектов субарктической зоны из одного состояния в другое, их климатогенному значению, а также методике дистанционного мониторинга этапов их развития. Представлено описание неподвижных водных объектов в панарктической зоне. Приведены результаты статистического анализа многолетних изменений основных климатических характеристик в субарктике и отклика основных параметров криолитозоны на них. Описана физическая основа смены знака обратной климатической связи между изменениями климата и эволюцией неподвижных водных объектов в субарктических районах. Описаны наиболее эффективные на сегодняшний день методы мониторинга развития неподвижных водных объектов и связанных с этим физических свойств подстилающей поверхности панарктической зоны (2.6.2)

Направление VII: (1.7.1) Представлена методика и результаты специального полевого эксперимента, проведенного в Красновидовском плесе Можайского водохранилища с целью изучения краткосрочной временной и пространственной изменчивости физических и экологических характеристик водной массы в пределах плеса. Установлено, что для большинства исследованных неконсервативных летом характеристик в морфологически простом (однолопастном) водохранилище пространственная изменчивость заметно

больше, чем внутрисуточная. (1.7.2) Представлено описание гидрологической модели водохранилища, основанной на одномерном алгоритме расчета вертикальной структуры водоема, примененном к отдельным отсекам, выделенным по продольной оси водохранилища. Детально описана последовательность расчета гидрологической структуры водохранилища в блоке тепломассообмена (ТМО) и в блоке трансформации экологически значимых неконсервативных веществ (ТЭВ). Приведены основные балансовые уравнения расчетных блоков и результаты валидации модели по данным учащенных полевых наблюдений с использованием критерия S/σ и критерия Тила.

Приведены результаты моделирования процессов, определяющих особенности экосистемного круговорота растворенных и взвешенных веществ и формирования качества воды в водохранилищах замедленного многолетнего регулирования. Проанализированы факторы процессов первичного продуцирования водохранилищ и показано, что доминирующим фактором всплеск цветения водорослей в большинстве случаев выступает концентрация в воде минерального фосфора, поле которого формируется в водохранилище в результате внешней нагрузки и комплекса внутриводоемных процессов. Результаты полевых экспериментальных исследований и модельных расчетов свидетельствуют о существенной роли в функционировании экосистемы водохранилищ плотностных циркуляций, скорости переноса воды в которых могут достигать 10–12 см/с. Кроме того, в период нагревания водоема количество теплоты, переносимое вертикальными составляющими теплового баланса, в 1,5–2 раза меньше переносимого гравитационными течениями. Приведены результаты многовариантных сценарных расчетов изменений фосфорной нагрузки на водохранилищах, существенно отличающихся по режиму регулирования стока и по морфометрии. На основании этих расчетов установлено, что чем медленнее водообмен и чем сложнее морфологическое строение ложа, тем сильнее водоем трансформирует сток фосфора в нижний бьеф гидроузла и наиболее эффективно работает на самоочищение проходящих через него речных водных масс при увеличении фосфорной нагрузки. Приведены принципы организации сети мониторинга на водохранилищах – источниках водоснабжения. Разработаны регламенты регулирования стока при различных гидрометеорологических условиях (2.7)

Направление VIII: На примере национального парка "Валдайский" рассмотрены особенности мониторинга фоновое и трансформированное состояние водных объектов в пределах ООПТ с помощью методов дистанционного зондирования и ГИС-технологий. Показано, что для регулирования и контроля рекреационной деятельности на территории парка может оказать проведение периодического мониторинга с привлечением спутниковой информации. Наиболее эффективным будет развитие двух направлений: дешифрирование снимков высокого разрешения для отслеживания изменений в характере использования территории; развитие методов дистанционного зондирования для оценки экологического состояния охраняемых водных объектов (1.8, 2.8).

Направление IX: На основе комплекса методик и результатов, полученных в проекте, разработана программа нового курса лекций и практических работ «Мониторинг гидрологических процессов», предназначенного для студентов, обучающихся в университетах по направлению подготовки 021600.62 «Гидрометеорология». В результате освоения дисциплины, студенты должны знать: теоретические основы и методические принципы получения информации о значениях гидрометеорологических величин дистанционными методами измерений; определять методами дистанционных измерений физические и морфологические характеристики водных объектов; владеть навыками получения данных дистанционного зондирования, методами их анализа и навыками использования результатов данного анализа в научных, прикладных и производственных целях (2.9).

2.2. Описание новизны научных результатов.

Разработаны новые методические подходы к мониторингу и прогнозированию состояния водных объектов на основе методов дистанционной диагностики. Новизна результатов обеспечена исследованием различных условий формирования стока рек исследуемых бассейнов в период весеннего половодья, их пространственной и временной изменчивости на основе применения методов дистанционной диагностики весенних половодий, применения комплекса методов изучения закономерностей пространственной и временной изменчивости характеристик водного режима рек, методов гидрологических прогнозов и ГИС-технологий.

Впервые разработана методика калибровки и верификации гидродинамических моделей затопления освоенных территорий по космическим снимкам, на основе данных моделей оценены масштабы заливания пойм и выявлены условия проявления кинематического эффекта. Разработана модель таяния ледника и впервые проведена оценка возможных изменений ледникового стока в бассейне р. Терек при изменениях климата.

Раскрыты перспективы использования методов дистанционного зондирования для получения детальных данных о пространственно-временной изменчивости температуры поверхностного слоя воды, формирования и разрушения ледяного покрова рек, озер и водохранилищ. В проекте разработаны новые методы дистанционного получения данных о температурном режиме и мутности водных объектов России.

Пионерными для территории России являются разработанные методики исследования и созданные базы данных по результатам дистанционного содержания кислорода и загрязняющих веществ в речных водах.

В области исследований русловых процессов и дельт впервые продемонстрированы возможности использования дистанционных методов для оценки многолетних изменений гидрографической сети, русел, режиме и ландшафтов речных дельт.

Усовершенствована универсальная боксовая модель водохранилищ, и проведено ее тестирование на основе уникального полевого эксперимента.

Впервые продемонстрированы возможности дистанционных методов применительно к задачам изучения водных объектов особо охраняемых природных территорий (ООПТ).

Разработана программа нового курса лекций и практических работ «Мониторинг гидрологических процессов», учитывающая новейшие методы получения дистанционной информации о состоянии водных объектов.

2.3. Сопоставление с результатами аналогичных работ мирового уровня.

Разработанные на основе комплексного подхода методики и результаты дистанционных исследований наводнений, русловых процессов, гидрологических процессов в дельтах находятся на мировом уровне, а результаты, полученные на основе разработанных методов для территории России, являются уникальными по охвату регионов страны и детальности исследованных процессов.

Существующие за рубежом работы по методам дистанционного определения температуры и мутности воды являются пионерными, и мало адаптированы к российским условиям. Предлагаемые методы получения данных о температурах и мутности водных объектов России расширяют мировой опыт в этой области. На мировом уровне находятся разработки участников проекта в области использования лидарных технологий, позволяющих обнаруживать суммарное содержание нефти/нефтепродуктов в воде.

Принципиальное отличие работ, выполненных участниками проекта в области дистанционных исследований речных дельт и русловых процессов от других отечественных и зарубежных исследований – это оценка с помощью дистанционных методов многолетних изменений гидрографической сети, режима и ландшафтов. Поэтому указанные исследования не только соответствуют мировому уровню в этой области, но и превосходят его.

В России и за рубежом нет аналогов созданной участниками проекта боксовой модели водохранилищ со встроенным блоком ветровых течений. Она сочетает достоинства двумерных боксовых и гидродинамических моделей. Впервые проведены диагностические расчеты ежесуточных величин физических, химических и биологических характеристик, водообмена в полном годовом цикле в многолопастных и стратифицированных водохранилищах со значительной сработкой. Отдельные элементы алгоритма созданной модели имеют сходные черты с лучшими отечественными и зарубежными математическими моделями, используемыми в гидрологии водохранилищ. Применение накопленной методической базы для особо охраняемых природных территорий (ООПТ) является насущным для РФ, где вопросам охраны природы уделяется недостаточно много внимания. Разработанные методы и полученные результаты детального изучения фоновое и трансформированное состояние водных объектов в пределах ООПТ выводит состояние исследований особо охраняемых природных территорий с точки зрения состояния водных объектов на мировой уровень.

3. Назначение и область применения результатов проекта

3.1. Описание областей применения полученных результатов

Выполняемые исследования направлены на решение научных и практических задач в области мониторинга и прогноза характеристик гидрологического режима рек и экологического состояния водных объектов в условиях нестационарного климата и антропогенного воздействия в разных регионах страны методами дистанционной диагностики. Полученные в результате выполнения НИР методики послужат основой для систем мониторинга и прогноза таких ведомств, как МЧС, МПР, Росгидромет, Росприроднадзор, региональных гидрометеорологических служб и бассейновых водных управлений. Собранные в ходе выполнения проекта новые данные о водных объектах суши позволят расширить научные представления об их режиме и изменениях на современном этапе и являются основой для научных публикаций и диссертаций. Разработанные учебные программы позволят усовершенствовать преподавание дисциплин гидрометеорологического цикла в университетах и Вузах.

3.2. Перспективы практического применения и коммерциализации результатов проекта

3.2.1. Описание направлений практического внедрения полученных результатов или перспектив их использования.

3.2.2. Оценка или прогноз влияния полученных результатов на развитие научно-технических и технологических направлений; на разработку новых технических решений;

на изменение структуры производства и потребления товаров и услуг в соответствующих секторах рынка и социальной сферы.

3.2.3. *Описание ожидаемых социально-экономических и др. эффектов от использования товаров и услуг, созданных на основе полученных результатов*

3.2.4. *Описание существующих или возможных форм коммерциализации полученных результатов:*

3.2.5. *Описание видов новой и усовершенствованной продукции (услуги), которые могут быть созданы или уже созданы на основе полученных результатов интеллектуальной деятельности (РИД)*

4. Перспективы развития исследований

Краткая информация о перспективах развития выполненного в ходе выполнения проекта исследования.

1) *Информация о том, насколько участие в ФЦП способствовало формированию новых исследовательских партнерств. Участвует ли научный коллектив в проектах по 7-й рамочной Программе Евросоюза (с указанием названия проектов и перечня партнеров по ним).*

Участие в ФЦП способствовало развитию партнерских отношений между географическим факультетом и академическими научными учреждениями, в том числе с Институтом водных проблем РАН, Институтом космических исследований РАН, Санкт-Петербургским институтом информатики и автоматизации РАН. Успешно развивается сотрудничество с НП «Прозрачный мир», ИТЦ «Сканекс». Разрабатываемые методы проходят практическую проверку в НИИ энергетических сооружений. Научный коллектив сотрудничает с Лабораторией космических исследований океана (LEGOS, Франция, Тулуза) в рамках совместного выполнения проекта MONARCH-A 7-й рамочной программы Евросоюза, участвует в исследованиях изменения водных объектов в условиях изменения климата в рамках международного проекта ISI-MIP.

2) *Краткая информация о проектах научного коллектива по аналогичной тематике.*

В ходе выполнения проекта полученные методические наработки были применены на практике в процессе выполнения хозяйственных работ по темам: «Проведение гидробиологических работ на водных объектах региона Нововоронежской АЭС-2 и определение гидробиологических показателей водных экосистем» (Договор № 04-ГБ//12108/74 с ОАО «Атомэнергопроект»), «Изучение и анализу гидрологических, гидрохимических характеристик водных объектов Керженского заповедника и их динамики» (договор № НО- 5), «Исследование состояния водного объекта р. Северная Двина на участке от г. Великий Устюг до г. Котлас и выработка научно-обоснованных рекомендаций по предотвращению негативного воздействия вод» (Гос. контракт № НИР-12-03 по заказу Двинско-Печорского БВУ).

Коллектив исполнителей проекта выполняет ряд проектов в рамках ФЦП «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах»: «Исследование закономерностей формирования гидрологического режима водных объектов в условиях потепления климата и разработка прогноза вероятных изменений стока воды на перспективу, отражающую современный уровень развития климатических сценариев», «Разработка рекомендаций по оценке влияния возможных климатических изменений на ресурсы пресных подземных вод», «Создание методологии изучения гидроледотермических, ледотехнических и гидравлических процессов и явлений в природных и природно-технических системах водных объектов суровой климатической зоны России». Методические наработки по исследованию наводнений, полученные в ходе выполнения проекта, будут продолжены при выполнении совместного с Институтом информатики и автоматизации РАН проекта РРФИ по теме «Интеллектуальная информационная технология оперативного мониторинга и упреждающего моделирования наводнений с использованием космической съемки и с доступом к результатам через геопорталы». В рамках перечисленных проектов найдут практическое применение новые или усовершенствованные методы дистанционной диагностики состояния водных объектов, которые удалось получить при реализации данного исследования.