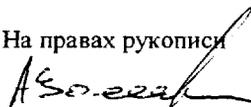


**ИНСТИТУТ ГЕОГРАФИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

На правах рукописи



ВОЛЧЕК АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА РЕЧНЫХ
ВОДОСБОРОВ БЕЛАРУСИ В СОВРЕМЕННЫХ
УСЛОВИЯХ**

Специальность 25.00.27 – гидрология суши,
водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора географических наук

МОСКВА 2006

Работа выполнена в Полесском аграрно-экологическом институте Национальной академии наук Беларуси (г. Брест)

Научный консультант – академик НАН Беларуси, доктор географических наук, профессор **Логинов В. Ф.**

Официальные оппоненты: доктор географических наук, профессор **Чалов Р. С.**

доктор технических наук, профессор **Исмайылов Г. Х.**

доктор географических наук профессор **Семенов В. А.**

Ведущая организация – Институт глобального климата и экологии (ИГКЭ) Росгидромета и РАН

Защита состоится «24» апреля 2006 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.046.04 при Институте географии РАН по адресу: 119017, Москва, Старомонетный пер., 29, Институт географии РАН, конференц-зал

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института географии РАН, Москва, Старомонетный пер., 29

Отзывы на автореферат (2 экз.) просьба высылать по указанному адресу ученому секретарю (факс: 959-00-33).

Автореферат разослан «16» февраля 2006 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат географических наук



Г. М. Николаева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Устойчивое развитие экономики Республики Беларусь тесно связано с комплексным использованием природных ресурсов и в первую очередь – водных. Рациональное использование водных ресурсов базируется на разнообразных подходах, методах и моделях качественной и количественной их оценки. Совершенствование существующих и разработка новых методов расчета элементов водного баланса (ЭВБ) речных водосборов требует глубокого изучения закономерностей формирования и трансформации водного режима, географического анализа, оценки и прогноза влияния естественных и антропогенных факторов на структуру и пространственно-временную изменчивость водного режима. Решение этих задач позволит разработать оптимальные методы управления водными ресурсами. Актуальность рассматриваемой в диссертации проблемы возрастает в связи с прогнозируемым изменением климата.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Диссертационная работа выполнялась в составе ГПОФИ «Природные комплексы» задания 19: «Оценка состояния, прогноз изменения водного режима, степени деградации почв осушенных земель, научное обоснование устойчивого развития экосистем Белорусского Полесья» (№ г. р. 20031263), 2001 – 2005 гг.; «Оценить трансформацию водного режима Брестского Полесья и разработать концепцию рационального использования водных ресурсов» (№ г. р. 20022908), 2002 г. Кроме того, данные диссертации использовались при подготовке Первого Национального сообщения в соответствии с обязательствами Республики Беларусь по Рамочной конвенции ООН об изменении климата (2002 г.).

Цель и задача исследования. Основной целью исследования является разработка теоретических и методических основ функционирования, прогнозирования, оптимального использования и охраны водных ресурсов и выявление закономерностей пространственно-временных колебаний ЭВБ речных водосборов лесной зоны. В процессе реализации поставленной цели решены следующие задачи:

- выполнен наиболее полный анализ материалов гидрометеорологической информации за период инструментальных наблюдений применительно к решению уравнения водного баланса речных водосборов с учетом пространственной и временной асинхронности элементов водного баланса;

- разработана и апробирована методика расчета, моделирования и прогнозирования стока слабо изученных малых рек Беларуси;
- установлены закономерности формирования водного баланса речных водосборов Беларуси;
- произведены количественная оценка изменений элементов водного баланса речных водосборов и анализ их причин;
- разработан прогноз изменения водного режима в связи с различными сценариями изменения климата в будущем;
- создан программный комплекс «Гидролог» для выполнения основных гидрологических расчетов;
- решен ряд научных и практических задач на основе анализа статистической структуры полей элементов водного баланса.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования явились элементы водного баланса речных водосборов Беларуси (атмосферные осадки, суммарное испарение, речной сток, почвенная влага), наблюдаемые в течение ряда лет. Предметом исследования – закономерности формирования, пространственно-временные колебания и прогноз гидрологического режима речных водосборов с целью разработки адаптационных мероприятий и минимизации негативных последствий их изменения в экономике страны.

Гипотеза. Пространственно-временные колебания элементов водного баланса имеют региональные особенности, обусловленные влиянием естественных и антропогенных факторов, которые необходимо учитывать при расчете водных и водохозяйственных балансов больших территорий, включая перспективные балансы.

Методология, методы и материалы исследования. Методологической основой исследований являются научные положения о стохастической природе изменчивости элементов водного баланса, что позволило использовать современные статистические методы анализа временных рядов (корреляционный, регрессионный, СВАН-анализ, Марковские цепи, нейронные сети и др.), включая методы, разработанные автором: функции пространственной асинхронности, оценки изменения стока с помощью пространственных корреляционных функций и др. Широко использованы методы водного и теплоэнергетического баланса подстилающей поверхности, математического моделирования. Системный анализ накопленной информации и сравнительно-географический метод позволили синтезировать наиболее важ-

ные, ключевые положения пространственно-временных колебаний ЭВБ. Количественная оценка асинхронности ЭВБ выполнена с помощью функций пространственной асинхронности (ФПА), разработанных автором.

В качестве основных исходных материалов использованы стандартные данные наблюдений на гидрометеорологической сети, фондовые материалы различных организаций и учреждений за период инструментальных наблюдений, а также картографические и опубликованные источники.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Научная новизна работы состоит в получении наиболее полной количественной оценки элементов водного баланса и установлении пространственно-временных изменений ЭВБ речных водосборов Беларуси в условиях изменяющихся естественных и антропогенных факторов, а также в разработке прогнозов их изменений. В результате исследований получены следующие новые результаты:

- установлены закономерности формирования пространственно-временных колебаний ЭВБ Беларуси и дана их количественная оценка;
- дана количественная оценка трансформаций ЭВБ рек Беларуси;
- составлен прогноз изменения ЭВБ при различных сценариях развития климата;
- предложена методика моделирования динамики почвенных влагозапасов мелиорированных сельскохозяйственных земель;
- разработана методика расчета внутригодового распределения стока рек методом статистической компоновки;
- сформирована электронная база данных составляющих водного баланса и создан программный комплекс «Гидролог» для расчетов основных гидрологических характеристик рек Беларуси;
- созданы модели для расчета водного режима малых рек Беларуси при отсутствии данных наблюдений.

Проведенные исследования позволили выявить тенденции в изменении основных ЭВБ и влияющих на них факторов за последние 30 – 40 лет, дать количественную оценку этим колебаниям, определить их изменчивость для различных сценариев климата будущего, что дает возможность обосновать, разработать и реализовать адаптационные мероприятия для минимизации негативных последствий текущих и прогнозируемых изменений водного режима речных водосборов Бела-

руси. Все это позволило расширить теоретическую базу инженерной гидрологии, разработать методики и решить ряд важнейших водохозяйственных задач.

Практическая значимость полученных результатов. Теоретические положения диссертации были использованы при написании: Пособия к ИВН 33-05.01.07. – 87, утвержденного приказом В/О «Союзводпроект №75 от 13.10.89, «Восстановление рядов речного стока» (раздел 1, пп. 3, 4, 4.3, 5.4 – 5.6, 7.5, 7.8, п.1, п.3)/ М.: Союзводпроект, 1990. – 45 с. и Пособия к строительным нормам и правилам. П1-98 к СНиП 2.01.14-83, «Определение расчетных гидрологических характеристик». – Минск: РУП «Минсктиппроект», 2000. – 174 с.

Установленные закономерности формирования, оценки изменений элементов водного баланса и их прогноз позволят создать научную основу для разработки схем рационального использования и охраны водных ресурсов, а также управления ими.

Теоретические результаты исследований баланса влаги и тепла участка суши, речных бассейнов применимы при гидротехническом строительстве, организации стационарных и экспедиционных исследований, разработке компенсационных мероприятий при изменении климата.

Разработанные методики, программный комплекс «Гидролог» и результаты научных исследований используются проектными институтами: Белгипроводхоз, г. Минск и Полесьегипроводхоз, г. Пинск; научно-исследовательскими институтами: ЦНИИКИВР, г. Минск, ОПП НАН Беларуси, г. Брест, ИПИПРЭ НАН Беларуси, г. Минск; учебными институтами: БГУ, г. Минск, БГТУ, г. Брест, а также в учебном процессе при чтении лекций и проведении практических занятий по инженерной гидрологии, гидрологии суши, регулированию стока и гидромелиорации. Кроме того, материалы исследований использованы при написании пяти учебных пособий для студентов высших учебных заведений.

Предметом защиты являются закономерности пространственно-временных колебаний составляющих водного баланса речных водосборов Беларуси в условиях изменяющихся естественных и антропогенных факторов.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:
– методики и методы расчета водного баланса речных водосборов Беларуси;

- количественная оценка составляющих водного баланса речных водосборов Беларуси и асинхронности в их колебаниях;
- закономерности трансформации ЭВБ речных водосборов Беларуси и их количественная оценка;
- прогноз изменения водного режима речных водосборов Беларуси в связи с различными сценариями климата будущего.

Совокупность полученных результатов позволила решить проблему оценки закономерностей формирования водного баланса речных водосборов Беларуси в условиях изменяющихся естественных и антропогенных факторов на основе разработанных и усовершенствованных методов расчета ЭВБ.

Личный вклад соискателя. Диссертация является результатом многолетних исследований автором (1984 – 2004 гг.) закономерностей формирования пространственно-временных колебаний ЭВБ, их изменений, рационального использования и управления поверхностными водами в условиях высокой техногенной нагрузки и прогнозируемого изменения климата. Результаты получены лично в ходе экспериментальных и теоретических работ в Центральном научно-исследовательском институте комплексного использования водных ресурсов (г. Минск); Брестском государственном техническом университете (г. Брест) и Отделе проблем Полесья Национальной академии наук Беларуси (г. Брест). Личный вклад соискателя заключается в постановке задачи, проведении теоретических и прикладных исследований статистической структуры полей элементов водного баланса, руководстве и непосредственном участии на всех этапах выполнения программы. На протяжении всего периода исследований соискатель руководил и лично участвовал в формировании электронных баз данных, разработке компьютерных программ для обработки этих данных, проведении численных экспериментов, на основании которых делались научные обобщения и выводы. Диссертация представляет собой завершённый цикл работ. Составление текста всех разделов диссертации и автореферата, основных теоретических положений и практических выводов, изложенных в работе, выполнено автором лично.

Апробация результатов диссертации. Основные теоретические положения работы, выводы и практические рекомендации докладывались и были отражены в материалах конференций, семинаров, совещаний: на Международной научной конференции «Современные проблемы изучения, использования и охраны природных комплексов По-

лесья» (Минск, 1998); VI съезде Белорусского географического общества (Могилев, 1999); Международном конгрессе «Наука и образование на пороге третьего тысячелетия» (Минск, 2000); Международной научной конференции «Научные и прикладные аспекты оценки изменений климата и использования климатических ресурсов» (Минск, 2000); Международной научно-практической конференции «Проблемы гидрометеорологии и экологии», (Алматы, 2001); Международной научной конференции «Теоретические и прикладные проблемы геоэкологии» (Минск, 2001); Водном форуме «Современное состояние, проблемы и перспективы использования водных ресурсов Беларуси» (Минск, 2003); Международной научно-практической конференции «Теоретические и прикладные проблемы современной лимнологии» (Минск, 2003); Шестом международном конгрессе «Вода: экология и технология» (Москва, 2004); Шестом Всероссийском гидрологическом съезде, (Санкт-Петербург, 2004); Первом Международном экологическом симпозиуме (Полоцк, 2004); Международной научной конференции «География в XXI веке: проблемы и перспективы», (Минск, 2004); Международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика Г. В. Богомолова (Минск, 2005).

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 112 научных работ, в т. ч. 8 монографий, 2 пособия, 1 справочник, 43 статьи в научных журналах, 19 статей в сборниках, 6 статей в сборниках трудов организаций, 18 статей в материалах научных конференций. Получено 2 авторских свидетельства, 1 патент Республики Беларусь. Издано также 5 учебных пособий для студентов высших учебных заведений с грифом Министерства образования Республики Беларусь.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав и выводов к ним, заключения, списка литературы, включающего 392 источника, и приложения. Объем работы: 425 страниц, в т. ч. 110 рисунков; 55 таблиц; приложение на 96 страницах, включающее 88 рисунков, 109 таблиц, акты внедрения результатов исследования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* проанализированы основные задачи, связанные с формированием и изменением водных ресурсов Беларуси, выполнено их ранжирование по степени первоочередности их решения. Определено место рассматриваемой проблемы в контексте общих природоохранных проблем.

Последней фундаментальной обобщающей работой по водному балансу речных водосборов Беларуси была монография А. Г. Булавко «Водный баланс речных водосборов», вышедшая в 1971 году. Работа не потеряла своей актуальности и в настоящее время. Однако за прошедшие более чем 30 лет, благодаря работам белорусских ученых И. В. Войтова, Г. В. Васильченко, М. Г. Голченко, А. М. Гречко, В. В. Дрозда, М. Ю. Калинина, А. Н. Колобаева, А. В. Кудельского, И. М. Лившица, А. П. Лихацевича, П. С. Лопуха, Э. И. Михневича, А. М. Пеньковской, В. Н. Плужникова, В. П. Рогуновича, В. С. Усенко, Б. В. Фащевского, М. М. Черепанского, В. Ф. Шебеко, В. М. Широкова и др. в области водобалансовых исследований речных водосборов Беларуси, накопилось много нового материала. Длительность рядов наблюдений за гидрометеорологическими элементами увеличилась на 30 – 35 лет, разработаны новые методы и методики, далеко вперед шагнула вычислительная техника, предложено много интересных идей и концепций, возросли антропогенные нагрузки и т. д. Все это требует анализа, обобщения и выработки новой стратегии ведения водного хозяйства.

В *первой главе* дана характеристика современных природно-климатических факторов формирования водных ресурсов региона. Основными источниками данных об ЭВБ явились опубликованные и фондовые материалы стационарной гидрометеорологической сети Беларуси. Выполнен комплексный анализ научно-методических основ исследования пространственно-временных колебаний ЭВБ. В частности, анализируется возможность и целесообразность использования метода годовых точек для исследования однородности временных рядов ЭВБ. Суть метода состоит в установлении принадлежности отдельных временных рядов к объединенному ряду.

При решении уравнения водного баланса нами использована методика осреднения и интерполяции ЭВБ, предложенная ГГИ [Бабкин, Гусев и др., 1974]. Она основана на использовании теоремы Вейерштрасса, когда любую функцию $f(x)$, непрерывную в интервале (a, b) , можно представить в этом интервале с любой степенью точности через многочлен $P(x)$. С использованием аналогичного подхода выполнено осреднение и интерполяция ЭВБ.

Как альтернатива рассмотренной выше методике нами использовались нейронные сети для пространственной интерполяции тепловодобалансовых характеристик на примере Белорусского Полесья, что дало приемлемые результаты.

Описание пространственно-временных колебаний полей ЭВБ осуществлялось с помощью пространственных корреляционных функций (ПКФ), т. к. они являются более универсальными и меньше зависят от изменений сезонного и географического характера. Применение той или иной статистической модели поля обосновывалось анализом физико-географических условий формирования ЭВБ. Аппроксимация ПКФ выполнялась зависимостями различного типа, выбор которых производился по статистическим критериям. Оценка статистической однородности ПКФ осуществлялась по методу Г. А. Алексева.

Описание полей ЭВБ с помощью ПКФ недостаточно для количественной характеристики асинхронности. По нашему мнению, одним из наиболее доступных и надежных методов определения эффекта асинхронности гидрометеорологических величин является метод, разработанный Н. В. Сомовым. В его основу положено определение эффекта асинхронности по совмещенным кривым обеспеченности суммарных значений хронологического и равнообеспеченного рядов гидрометеорологических величин.

Преимущество указанного метода заключается в возможности однозначного определения асинхронности в любых зонах кривой обеспеченности в отдельности и для всей совокупности значений исследуемой величины.

Величина асинхронности ЭВБ зависит от расстояния между пунктами (ρ_j), направления между ними и обеспеченности самих величин (P), а для однородных стационарных полей функция пространственной асинхронности (ФПА), как и ПКФ, не зависит от координат полюса и не меняется при параллельных его перемещениях, т. е.

$$K_{ac}(P) = f(\rho_j; P). \quad (1)$$

Коэффициент пространственной асинхронности ЭВБ для любой территории или речного бассейна с учетом их конфигурации может быть определен следующим образом:

$$K_{ac}(P) = \frac{1}{A} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} f(\rho_j; P) \cdot dx \cdot dy, \quad (2)$$

где ρ_j — расстояние между пунктами, определяемое как функция от X , Y ; $A = (x_2 - x_1) \cdot (y_2 - y_1)$; $x_1; x_2; y_1; y_2$ — координаты крайних точек исследуемого участка.

Для реализации приведенной методики нами разработаны алгоритмы расчета и реализованы пакетом прикладных программ, составленных в системе Windows Visual Basic.

Оценка колебаний ЭВБ осуществлялась стандартными методами. Использованы многолетние ряды наблюдений за основными составляющими водного баланса речных водосборов (речной сток, атмосферные осадки, суммарное испарение, влажность почвы) с месячной дискретностью. Статистическим расчетам ЭВБ предшествовал анализ однородности исходной гидрометеорологической информации. Для оценки различий в статистических параметрах использовались критерии Стьюдента, Фишера и др. Оценка антропогенной составляющей стока осуществлялась с использованием ПКФ для различных периодов наблюдений.

Одновременно с концепцией случайности многолетних колебаний годового стока нами использовалась и концепция цикличности, т. е. повторяемое или обратимое чередование величин стока во времени [Рождественский, 1968]. Сложность в использовании циклов для прогноза стока заключается в их аperiodичности, поскольку фаза, амплитуда и длительность цикла меняются, не обнаруживая видимых закономерностей. В настоящее время нет единого мнения о природе этих циклов, отсутствует и объективная методика выделения и анализа циклов водности рек. Вместе с тем цикличность является основной характеристикой рассматриваемых процессов, и использование современных подходов выявления цикличности позволяет по-новому взглянуть на эту проблему.

В последние годы для более тонких исследований временных рядов применяется спектрально-временной анализ (СВАН). В этом методе спектры вариации вычисляются на скользящих временных отрезках и изображаются в виде СВАН-диаграмм. Спектр вариаций представляет набор амплитуд гармонических составляющих, которые устанавливаются путем спектральных разложений флуктуирующей величины на конкретном временном отрезке. Определение параметра хаотизации также представляет собой вид спектрально-временного анализа.

Во второй главе приведены методики анализа исходной информации и методы расчета элементов водного и теплоэнергетического балансов. В случае отсутствия данных наблюдений моделировались временные ряды суммарного испарения и баланса естественного увлажнения почвы.

В работе расчет месячных величин суммарного испарения осуществлялся с помощью метода гидролого-климатических расчетов (ГКР) [Мезенцев, 1982]. Для успешного использования метода ГКР в условиях Беларуси потребовалось разработать методику расчета теплоэнергетических ресурсов суммарного испарения, что позволило рассчитать величины суммарного испарения и их изменчивость.

Комплексная проверка рассчитанных значений ЭВБ показала, что получены достоверные и сравнимые между собой величины, образующие методически однородные пространственно-временные поля.

В связи с широким вовлечением малых рек в сферу природопользования необходимо детальное изучение режима стока этой категории рек. Нами разработан ряд моделей расчета основных гидрологических характеристик малых рек при отсутствии данных наблюдений. Построению моделей стока воды малых рек предшествовал комплексный анализ взаимной сопряженности ЭВБ и факторов, влияющих тем или иным образом на формирование водного режима малых рек.

Для расчета среднего многолетнего стока неизученных рек использовался метод расчета водного баланса, базирующийся на классическом уравнении [Евстигнеев, 1983; Евстигнеев, Ретеюм и др., 1986]:

$$\bar{H} = \bar{X} - \bar{E} \pm \Delta \bar{W}, \quad (3)$$

где \bar{H} – средний многолетний слой стока, мм; \bar{X} – средний многолетний слой атмосферных осадков, мм; \bar{E} – средний многолетний слой суммарного испарения, мм; $\pm \Delta \bar{W}$ – член, характеризующий среднюю многолетнюю инфильтрацию воды в глубокие водоносные горизонты, либо среднее многолетнее значение недренируемого грунтового стока ($+\Delta \bar{W}$), либо величину дополнительного питания речного стока подземными водами ($-\Delta \bar{W}$) вследствие их разгрузки в речную сеть.

Среднемноголетний слой стока рек, полностью дренирующих грунтовой сток, определяется как разность среднемноголетних слоев осадков и испарения. Отклонения гидрометрического стока от балансового могут дать представление о влиянии на сток естественных и антропогенных факторов.

При анализе и построении расчетных зависимостей $\bar{H}_b = \bar{X} - \bar{E}$ и фактических значений стока \bar{H}_Φ по измерениям на сети гидрологиче-

ских постов использован регрессионный аппарат и получено уравнение:

$$H = 1,001 \cdot H_6 - 6,13, \quad (r=0,83). \quad (4)$$

Уравнение 4 «снимает» систематическую погрешность определения балансовой разницы $(\bar{X} - \bar{E})$, если считать, что в пределах рассматриваемой территории при фиксированном наборе водосборов взаимно компенсируется величина $\pm \Delta \bar{W}$. Взаимная компенсация водообмена $\pm \Delta \bar{W}$ определяется как балансовая разница между вычисленным по (4) и фактическим стоком и составляет 5 мм (2,8 %), что находится в пределах точности определения среднегогодежного значения по фактическому ряду.

Уравнение регрессии зоны питания грунтовых вод имеет вид:

$$H = 1,02 \cdot H_6 - 86,2, \quad (r=0,96). \quad (5)$$

Для зоны разгрузки грунтовых вод имеем уравнение:

$$H = 0,81 \cdot H_6 + 94,0, \quad (r=0,97). \quad (6)$$

При объективном определении составляющих водного баланса и незначительности систематических ошибок должно соблюдаться равенство $H_{\Phi} \approx H_6$. В нашем случае только уравнение (4) с определенными допущениями соответствует рассматриваемому условию. Величину свободного члена уравнения (4), равную 6,13 мм, можно рассматривать как стокообразующий порог, т. е. минимальную разницу осадков и испарения, при которой образуется сток. В уравнении (5) величина -86,2 мм – питание грунтовых вод (отток в соседние водосборы), в уравнении (6) величина +94,0 мм – грунтовая подпитка (переток с соседних водосборов).

Если модель разработана для территории со стабильным влиянием хозяйственной деятельности, то можно выявить реки с измененным средним стоком. Представляется, что такой подход вполне возможен для выявления влияния хозяйственной деятельности на годовой сток.

Общий вид уравнений (4) – (6):

$$H_p = K_i \cdot (\alpha \cdot H_6 \pm \Delta W), \quad (7)$$

где H_p – расчетный слой речного стока, мм; K_i – поправочный коэффициент, учитывающий особенности подстилающей поверхности; α – эмпирический коэффициент.

Поправочный коэффициент (K_i) определяется в зависимости от расчетной формулы и имеет вид соответственно:

$$K_1 = 1,054 - 0,000328 \cdot \lambda - 0,00285 \cdot (A_{\text{общ. забол.}} + 1); \quad (8)$$

$$K_2 = 1,231 \cdot \frac{(J_{\text{рек}} + 1)^{0,108}}{(J_{\text{вод}} + 1)^{0,093} \cdot (A_{\text{оз}} + 1)^{0,131}}; \quad (9)$$

$$K_3 = 0,851 + 0,000118 \cdot A + 0,005269 \cdot A_{\text{сух.лес}}, \quad (10)$$

где λ – абсцисса центра тяжести водосбора в условной прямоугольной системе координат с центром в г. Минск, км; $A_{\text{общ. забол.}}$ – общая заболоченность водосбора, %; $J_{\text{рек}}$ – уклон реки, ‰; $J_{\text{вод}}$ – уклон водосбора, ‰; $A_{\text{оз}}$ – площадь водосбора, занятая озерами, %; A – площадь водосбора, км²; $A_{\text{сух.лес}}$ – площадь водосбора, занятая сухим лесом, %.

Для предварительных расчетов годовой нормы стока неизученных рек Беларуси нами разработана следующая полуэмпирическая модель:

$$H_p = 7,73 \cdot \frac{(X - E)^{0,31} \cdot V^{0,21} \cdot (\varphi + 300)^{0,23}}{(A_{\text{общ. забол.}} + 1)^{0,04}}, \quad (11)$$

где V – скорость ветра, м/с; φ – ордината центра тяжести водосбора в условной прямоугольной системе координат с центром в г. Минск, км; $A_{\text{общ. забол.}}$ – общая заболоченность водосбора, %.

Для детальных расчетов речного стока нами использовался гидролого-климатический метод, скорректированный для решения рассматриваемых задач и условий Беларуси.

На основе современных представлений о формировании стока, с использованием методов математической статистики и компьютерных технологий разработана следующая модель формирования речного стока с использованием взаимосвязи климатического и руслового стока малых рек Белорусского Полесья [Волчек, Лукша, 2002]:

$$Y_p = Y_{\text{кл}} \cdot \frac{\varphi^{n_2} \cdot \lambda^{n_3} \cdot (L + 1)^{n_4} \cdot I_{\text{ср.р.}}^{n_5} \cdot H_{\text{ср.}}^{n_6} \cdot (A_{\text{лес.}} + 1)^{n_7} \cdot \rho^{n_8}}{(A + A_{\text{кр}})^{n_9} \cdot (A_{\text{оз.}} + 1)^{n_{10}} \cdot (A_{\text{бол.}} + 1)^{n_{11}} \cdot (A_{\text{расн.}} + 1)^{n_{12}}} \cdot A \cdot 10^3 / t, \quad (12)$$

где Y_p – величина речного стока, м³/с; $Y_{\text{кл}}$ – климатический сток, мм; A – площадь водосбора, км²; $A_{\text{кр}}$ – первая критическая площадь, км²;

φ , λ – соответственно, географическая широта и долгота центра тяжести водосбора (градусы, минуты); L – расстояние от истока реки, км; $I_{\text{ср.р.}}$ – средний уклон основного тальвега реки, ‰; $H_{\text{ср.}}$ – средняя высота

водосбора, м; $A_{оз}$, $A_{бол}$, $A_{лес}$ — площадь, занятая озерами, болотами и лесом, % к площади водосбора; ρ — коэффициент густоты речной сети, км/км²; $A_{расп}$ — распаханность водосбора, %; t — период осреднения, с.

Полученная балансовая модель (12) в целом отражает процессы формирования водного режима, происходящие на водосборе, она использует только стандартную метеорологическую информацию, хорошо настраивается на исследуемые водосборы, а полученные данные удовлетворяют требованиям водного хозяйства при принятии решений по смягчению негативных последствий изменения стока.

Таким образом, с помощью полученных моделей можно решить целый ряд прикладных задач, а именно: рассчитать норму годового стока неизученных рек; установить зоны питания и разгрузки грунтовых вод; оценить антропогенную нагрузку на речной сток отдельных рек; спрогнозировать изменение годового стока рек при различных сценариях изменения климата.

Проведенная оценка устойчивости статистических характеристик временных рядов ЭВБ в зависимости от начала гидрологического года показала, что начало гидрологического года имеет существенное значение для коротких временных рядов.

После анализа исходных временных рядов ЭВБ на однородность выполнено приведение их к расчетному периоду, восстановление пропущенных или искаженных данных с помощью программного комплекса «Гидролог».

Третья глава посвящена анализу формирования пространственно-временных колебаний ЭВБ и их количественной оценке с использованием ПКФ и ФПА.

В зависимости от способа группировки данных рассмотрены варианты: по условиям формирования стока (Балтийский склон, Черноморский склон); по влиянию господствующих воздушных масс (поле ЭВБ ориентировано в направлении северо-восток — юго-запад, поле ориентировано в направлении запад — восток, поле ориентировано в направлении северо-запад — юго-восток) и для территории Беларуси в целом.

Здесь и далее под Балтийским и Черноморским склонами принята территория только в пределах Беларуси. Предполагается также, что характер анизотропии в пределах рассматриваемой территории и в пределах выделенных градаций углов не изменяется.

Если случайное поле $\xi(0)$ представлено в виде независимых составляющих $\xi(\rho) = \eta(\rho) + \delta(\rho)$, где $\eta(\rho)$ — мелкомасштабная, $\delta(\rho)$ — крупно-

масштабная составляющие, то его корреляционная функция, обладающая свойством аддитивности по отношению к независимым составляющим поля, может быть представлена как $R_{\xi}(\rho) = R_{\eta}(\rho) + R_{\delta}(\rho)$.

Для выявления характера внутригодовых соотношений между мелкомасштабной и крупномасштабной составляющими ЭВБ выполнены расчеты для месячных величин и вегетационного периода (май – август), теплого периода (апрель – октябрь), а также для года в целом. Рассчитаны ПКФ в диапазоне расстояний между метеостанциями (центрами тяжести водосборов) до 700 км. По эмпирическим коэффициентам корреляции R_{jk} и соответствующим им расстояниям ρ_{jk} между метеостанциями (центрами тяжести водосборов) получены эмпирические ПКФ. Они аппроксимированы линейными зависимостями, характеризующими убывание эмпирических коэффициентов корреляции с увеличением расстояния между пунктами наблюдений. Величина $R(0)$, как правило, несколько меньше единицы. Это обусловлено наличием в данных наблюдений случайных ошибок, а также микроклиматических ($\eta(\rho)$) различий в расположении метеостанций (бассейнов). При рассмотрении гидрометеорологических полей на большой территории они выступают как случайные. Этими различиями, в основном, и определяется имеющий место значительный разброс коэффициентов корреляции относительно средних величин. Анализ ПКФ позволяет оценить, какая доля изменчивости поля определяется естественной изменчивостью рассматриваемых элементов на территории, а какая возникает за счет случайного размещения метеостанций, погрешностей наблюдений. Показатель $\alpha_{\Gamma} = dR(\rho)/d\rho$ по физическому смыслу представляет градиент поля, т. е. показывает величину изменения ПКФ на единицу расстояния.

Поскольку осадки являются основным фактором, формирующим водный режим подстилающей поверхности, то рассмотрение годового цикла пространственной коррелированности ЭВБ начато с *атмосферных осадков*.

Так как циклоническая деятельность снижается в направлении с северо-запада на юго-восток, то и количество атмосферных осадков, и продолжительность их выпадения снижаются по пути влагонесущих потоков, нарушая плавное распределение осадков.

Существенное колебание фоновой составляющей атмосферных осадков отмечается в летне-осенний период. Высокая корреляция

осадков с широтой местности наблюдается в конце лета и практически на протяжении всего осеннего периода, что определяется усилением в это время меридиональных потоков влагопереноса. Существенные различия, зависящие от интенсивности влагопереноса, долготы местности, проявляются лишь в июле, сентябре – октябре.

Для всех месяцев имеет место неравенство $R(\rho) < 1$, которое увеличивается в летние месяцы, когда роль локальной неоднородности растет за счет конвективных осадков. Наименьший разброс точек относительно эмпирической линии регрессии $R(\rho)$ отмечается в зимние месяцы. В пространственной коррелированности месячных сумм атмосферных осадков четко выражен годовой ход в изменении связанности полей осадков: в холодный период он существенно выше, чем в теплый период – как для всей Беларуси в целом, так и для Черноморского и Балтийского склонов.

Для Беларуси в целом минимальная коррелированность наблюдается в летние месяцы, в частности, в июне, для Черноморского склона она смещается на август. Это вызвано несколько большей масштабностью конвективных процессов. Отмечается некоторое увеличение разнородности осадков по территории в феврале и в октябре за счет перехода от твердых осадков к жидким и наоборот.

Различия между ПКФ, вычисленными для отдельных месяцев, сравнительно велики и превышают возможные различия, обусловленные случайными факторами. Исходя из общих соображений, можно было бы ожидать, что, поскольку от мая к июлю увеличивается роль мелкомасштабных ливневых осадков, корреляция сумм осадков от мая к августу должна монотонно убывать. В действительности такая простая закономерность отмечается лишь для поля, ориентированного в направлении запад-восток, и для Черноморского склона. Для территории в целом этот эффект имеет место на больших расстояниях (более 200 км). На меньших расстояниях корреляция сумм осадков за июль оказывается выше, чем за июнь. Такая закономерность прослеживается и для других полей (при ориентации поля по направлению северо-восток – юго-запад).

Еще сложнее обстоит дело для Балтийского склона и поля, ориентированного в направлении северо-запад – юго-восток, для которых корреляция в августе оказывается наиболее высокой для вегетационного периода. Такой характер изменения корреляции от месяца к месяцу свидетельствует, что влияние синоптических условий на вид кор-

реляционных функций является более сложным, чем можно было предположить.

Проверка показала, что ПКФ осадков неоднородны, кроме апреля, октября, ноября и теплого периода, а соответствующие поля осадков Черноморского склона – изотропны.

Поля изокоррелят для каждого месяца имеют вид эллипсов, большая ось которых ориентирована в направлении преобладающего переноса воздушных масс. Так, в январе – феврале анизотропию поля сумм осадков определяет западный перенос воздушных масс, в мае, июне, июле – северо-восточный. Полученные результаты хорошо согласуются с данными Л. П. Кузнецовой по переносу влаги в атмосфере [Кузнецова, 1978]. Наименьшая анизотропия полей осадков наблюдается в апреле, августе, ноябре, а также за вегетационный период. Наибольшая анизотропность – в мае.

Речной сток является расходным элементом водного баланса. Водный режим рек рассматриваемой территории характеризуется большим разнообразием и находится в тесной связи как с метеорологическими условиями в данном районе, так и с особенностями подстилающей поверхности.

ПКФ среднемесячных расходов воды, как и осадков, вогнуты. Для всех месяцев при нулевом сдвиге наблюдается неравенство $R(0) < 1$, более выраженное в летние месяцы. Общая картина годового цикла ПКФ стока сходна с ПКФ осадков, потому что режим стока находится в прямой зависимости от режима осадков.

Наиболее высокая пространственная корреляция наблюдается в период зимней межени (январь, февраль), а для Балтийского склона – в декабре. В этот период реки данного региона имеют грунтовое питание, нарушаемое отдельными оттепелями, охватывающими большие территории.

Несколько меньшая, но достаточно высокая пространственная корреляция речного стока наблюдается и в весенние месяцы, когда происходит половодье. С уменьшением доли стока весеннего половодья уменьшается и пространственная корреляция речного стока, начиная с июня ПКФ речного стока повышается.

Попытка получить однородные ПКФ речного стока для различных направлений не дала положительного результата. Однородность увеличивается в направлении северо-восток – юго-запад для стока в декабре, а также вегетационном и теплом периодах. Наиболее неодно-

родны ПКФ в направлении северо-запад – юго-восток. Установлена однородность ПКФ стока рек Балтийского склона почти для всех интервалов осреднения (за исключением мая и июля). Менее однородны ПКФ стока рек Черноморского склона. Лишь ПКФ месячного стока за сентябрь и декабрь можно считать условно однородными. Уменьшение степени однородности ПКФ рек Черноморского склона связано с засушливостью климата и большей разнородностью подстилающей поверхности. Кроме того, в этом районе широко развиты водные мелiorации, которые в какой-то степени нарушают естественный водный режим.

Суммарное испарение – один из основных расходных ЭВБ речных водосборов, причем его роль становится определяющей в зоне неустойчивого и недостаточного увлажнения.

Для получения обеспеченных величин суммарного испарения рекомендуется использовать трехпараметрическое гамма-распределение и распределение Пирсона III типа, однако распределение Пирсона III типа, в большинстве случаев, лучше аппроксимирует эмпирические точки распределения суммарного испарения.

Годовой ход ПКФ поля суммарного испарения определяется годовым ходом осадков. Для всех месяцев характерно неравенство $R(0) < 1$, что свидетельствует о значительном суммарном вкладе локальной неоднородности испаряющей поверхности и ошибок наблюдений. Наибольшая связность ПКФ поля испарения наблюдается в зимние и весенние месяцы, когда испарение определяется только тепловыми ресурсами климата. Наибольшая влажность наблюдается в апреле, в это время ПКФ поля испарения обладает наибольшей пространственной связностью. По мере уменьшения содержания почвенной влаги связность поля суммарного испарения уменьшается и достигает своего минимума в июне. Затем, по мере увеличения количества осадков и уменьшения тепла, а также транспирации влаги растениями, связность поля испарения увеличивается.

Проверка однородности ПКФ поля суммарного испарения показала, что они однородны только для Черноморского склона в феврале, июне, июле, октябре, ноябре, вегетационный и теплый периоды, а также для года в целом.

Годовой ход изокоррелят суммарного испарения Беларуси имеет сложную структуру в виде эллипсов с различной ориентацией главной оси. Ориентация главной оси «северо-запад – юго-восток» наблюдает-

ся наиболее ярко в январе, апреле, менее ярко — в феврале, мае, т. е. в первой половине года, когда на формирование суммарного испарения основное влияние оказывают теплоресурсы климата. Ориентация главной оси «северо-восток — юго-запад» наблюдается наиболее ярко в июле, августе, декабре, сентябре.

Почвенная влага является одной из составляющих водного баланса и источником существования и развития природных экосистем. Для визуального анализа пространственной структуры построены карты продуктивных влагозапасов минеральных почв и их коэффициентов изменчивости для вегетационного периода (май — август) для слоев почвы 0 — 20, 0 — 50 и 0 — 100 см. Максимальная величина продуктивных влагозапасов минеральных почв приурочена к возвышенностям и северу Республики, где наиболее распространены суглинистые почвы и запасы продуктивной влаги превышают для слоя 0 — 50 см 100 мм, а для слоя 0 — 100 см превышают 200 мм. Менее 100 мм продуктивных влагозапасов наблюдается на юге Республики, на песчаных почвах влагозапасы колеблются: около 50 мм (слой 0 — 50 см) и 80 мм (слой 0 — 100 см).

Изменчивость продуктивных влагозапасов максимальна на юге Беларуси, в Полесье, на песчаных землях, и значительно превышает 0,5. Затем влагозапасы убывают в направлении на север по причине смены механического состава почв на более тяжелый, а также в результате уменьшения теплоресурсов и увеличения осадков и составляют 0,2 — 0,4.

В ходе исследования временных рядов продуктивных влагозапасов их эмпирическое распределение аппроксимировалось наиболее распространенными функциями: трехпараметрическим гамма-распределением и распределением Пирсона III типа. В большинстве случаев распределение Пирсона III типа лучше описывает эмпирические распределения временных рядов продуктивных влагозапасов.

ПКФ продуктивных влагозапасов вегетационного периода минеральных почв Беларуси для различных слоев в целом неоднородна, вследствие чего нет четкой зависимости изменения коэффициентов корреляции от расстояния. Это обусловлено пестротой механического состава почв, различными условиями формирования теплового и водного режимов почв.

Результаты расчетов *баланса естественного увлажнения* (БЕУ) показывают, что он закономерно увеличивается с северо-востока на юго-

запад Беларуси. Это вызвано повышением среднесуточной температуры воздуха в этом направлении.

Сезонный ход изменчивости связности поля БЕУ почвы устанавливается достаточно уверенно: минимум корреляция достигает в мае. Отмечается большая коррелированность поля БЕУ в апреле, июне и в сентябре. Поле БЕУ почвы в апреле характеризуется значительной однородностью, так как в это время влаги в почве достаточно, чтобы поддерживать оптимальный водно-воздушный режим, и БЕУ почвы по всей территории избыточный, наблюдаются однородные поля на достаточно обширных территориях. В мае влагозапасы значительно истощаются, большую роль играют механический состав почвы и атмосферные осадки, которые в этот период неоднородны. В этот переходный месяц наблюдаются как дефициты, так и избытки влаги в почве. В июне весенние влагозапасы, в основном, расходованы, и по всей территории наблюдается дефицит водного баланса корнеобитаемого слоя. В сентябре достаточно затяжные дожди, которые охватывают большие территории, и в это время почти повсеместно отмечаются избытки влаги.

Количественная оценка эффекта асинхронности стока рек Беларуси и сопредельных территорий рассматривалась в работах В. Н. Плужникова, Б. В. Фашевского, Н. М. Кургановой, Т. М. Красовской, Ю. П. Бурнейкиса, А. А. Волчека и др. Количественная оценка асинхронности других ЭВБ изучена гораздо слабее, хотя это также представляет как научный, так и практический интерес.

Как показал анализ, картина обеспеченности ЭВБ по территории для характерных лет довольно сложная. Значительно большая однородность характерна для очень маловодных по стоку лет. Более сложные изменения водности по территории отличаются для остальных характерных лет. Для одного и того же календарного года в различных частях Республики колебания ЭВБ существенно разнятся по обеспеченности. Сопоставление характера изменчивости обеспеченности по ЭВБ показало, что из года в год характер водности (засушливости) для Республики различен. Можно отметить некоторую тенденцию в смене водности (засушливости) в направлении с северо-востока на юго-запад.

Величина пространственной асинхронности ЭВБ в зависимости от обеспеченности колеблется в широком диапазоне. Для всех ЭВБ про-

слеживается достаточно тесная связь коэффициентов асинхронности и обеспеченности.

В годы 50 % обеспеченности и близкие к ним коэффициенты асинхронности, как правило, не выходят за пределы точности расчетов. С увеличением (уменьшением) водности (засушливости) года величина асинхронности увеличивается.

Среднемесячная асинхронность колебаний ЭВБ, как правило, больше среднегодовой. Кратковременные аномалии месячных величин взаимно компенсируются при их осреднении за год в целом. Асинхронность стока во внутригодовом разрезе в 1,5 – 2 раза больше, чем в целом за год.

На основании анализа пространственно-временных колебаний ЭВБ установлены устойчивые зависимости коэффициентов асинхронности от расстояния и обеспеченности, которые аппроксимируются зависимостями типа:

$$K_{ac}(P) = K_0(P) \cdot (\rho + 1)^{\alpha(P)}, \quad (13)$$

где $K_0(P)$ – значение коэффициента асинхронности при $\rho=0$; $K_0(P) \rightarrow 1$; $\alpha(P)$ – эмпирический коэффициент, зависящий от интервала осреднения, обеспеченности и элемента водного баланса.

После интегрирования, преобразований и некоторых упрощений получим зависимость коэффициентов асинхронности для территории:

$$\bar{K}_{ac}(P) = K_0(P) \cdot (A + 1)^{0.5 \cdot \alpha(P)}, \quad (14)$$

Представленные результаты исследований показывают наличие статистически значимой пространственно-временной асинхронности колебаний ЭВБ Беларуси. Величина коэффициентов асинхронности зависит от ряда причин и колеблется в пределах 4 – 50%.

В *четвертой главе* выполнен анализ изменений водного баланса территории Беларуси, даны количественная оценка этих изменений и их причины. Изменение климата Беларуси происходит на фоне глобальных изменений, связанных с естественными и антропогенными факторами.

Комплексный анализ элементов водного и теплоэнергетического балансов для двух ключевых метеостанций Беларуси (Василевичи и Шарковщина), расположенных в разных зонах и находящихся на расстоянии около 400 км, за каждый месяц вегетационного периода (май – август) показал, что в последние годы отмечается увеличение про-

странственной неоднородности выпадения *атмосферных осадков*. Появились зоны увеличения количества атмосферных осадков (районы Витебской области, а также Житковичский район) и зоны уменьшения (юго-восток Беларуси).

В связи с тем, что для изменения годовых сумм осадков характерна зональность, выполнено физико-географическое районирование территории Беларуси, основанное на анализе изменений градиентов атмосферных осадков (рис.1). Выделено три зоны: юго-западная (I), центральная (II) и северо-восточная (III). Критерием является годовой показатель среднемноголетних изменений осадков. К первой зоне относится территория со значением градиента менее -10 мм/10лет (зона отрицательных трендов), ко второй зоне – от -10 до $+10$ мм/10лет (зона неустойчивых трендов) и к третьей – более 10 мм/10лет (зона положительных трендов).

Для многолетних внутригодовых изменений атмосферных осадков практически для всей территории Беларуси в апреле – мае и октябре – декабре характерны отрицательные линейные тренды. Зона IIIа (ст. Гомель, Славгород, Костюковичи) в апреле – мае характеризуется незначительной положительной тенденцией – $0,5$ и $3,2$ мм/10 лет соответственно.

Положительная тенденция в изменении атмосферных осадков относится к марту и сентябрю для всех рассматриваемых зон. В теплые месяцы (май – август) максимально положительные линейные тренды отмечаются в июне для северной части Беларуси (зоны IIIб, IIIв), а в июле – в центральной и южной частях (зоны I – IIIа). Зоны I и IIа характеризуются отрицательными годовыми трендами ($-19,8$ и $-6,3$ мм/10 лет), тогда как для остальных зон характерны положительные тренды – $3,7$; $20,9$; $13,7$ и $31,8$ мм/10 лет соответственно.

Для оценки нулевой гипотезы $H_0: \alpha=0$ (градиент изменения атмосферных осадков равен нулю) проведен анализ статистической значимости усредненных зональных трендов. В многолетнем ходе зональных осадков статистически значимые линейные тренды характерны для годовых трендов: отрицательные – для зон I, IIа, а положительные – для зоны IIб – III. Во внутригодовом распределении осадков по всем зонам статистически значимые тренды получены для сентября (положительные: от $+5,6$ до $+12,1$) и для ноября (отрицательные: от $-1,0$ до $-6,0$ мм/10 лет).

Для теплого периода характерно уменьшение разности осадков между июнем и августом и их рост в сентябре – на 15-20 мм по сравнению с августом. Проведено исследование статистической значимости осредненных норм атмосферных осадков за два периода наблюдений: 1966 – 1987 гг. и 1988 – 2002 гг. (рис. 2). Год 1988 является началом положительных трендов в годовых температурах воздуха. Для этого использовалась разница между средними суммами атмосферных осадков за период 1988 – 2002 гг. и период 1966 – 1987 гг. Анализ показал, что по 75 % метеостанций различия средних величин атмосферных осадков статистически различимы. Особенно заметны рост количества осадков в северо-восточной и падение в юго-западной части Беларуси в последние 15 лет.

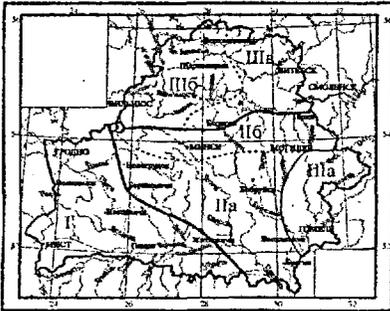


Рис. 1. Районирование атмосферных осадков по годовому градиенту.

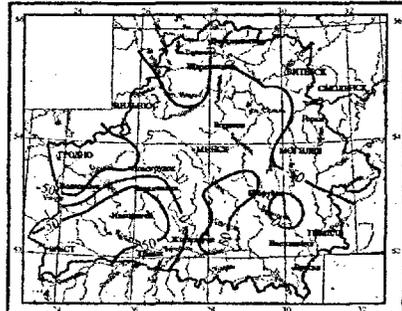


Рис. 2. Пространственная структура разностей атмосферных осадков Беларуси за период 1966 – 1987 гг. и 1988 – 2002 гг.

Наблюдаемые изменения в режиме выпадения атмосферных осадков на территории Беларуси являются существенными как по территории, так и в многолетнем плане, что необходимо учитывать при водно-балансовых расчетах и прогнозах.

Водный режим больших рек (Западной Двины, Днепра, Березины, Сожа, Припяти, Немана) отличается от режима средних рек. Наибольшее различие в водном режиме больших рек наблюдается на реках, расположенных в северных и южных районах территории.

Анализ показывает, что различия в годовом стоке за выбранные периоды осреднения находятся в пределах точности расчета – как для средних величин, так и для обеспеченных. В результате переброски части стока р. Виляя в р. Свислочь ее собственный сток уменьшился

на $0,2 \text{ км}^3/\text{год}$, соответственно, также увеличился сток Днепра. На остальных основных реках статистически значимых изменений речного стока не установлено. Это объясняется относительно небольшой суммарной антропогенной нагрузкой на речной сток, в основном, за счет безвозвратных потерь воды при водопотреблении, не превышающей 3 % по сравнению с его абсолютной величиной, что находится в пределах точности гидрологических расчетов. Увеличение стока Припяти, наблюдавшееся в 1965 – 1985 гг., вызвано в большей степени особенностями колебания водности лет и в меньшей – антропогенными воздействиями.

Изменения максимального стока выходят за пределы точности расчета, и для всех рек характерно его уменьшение. Наиболее существенны изменения на рр. Березина, Неман, Днепр, меньшие изменения наблюдаются на рр. Западная Двина и Припять.

Изменения минимального стока на реках Беларуси за рассматриваемые периоды произошли по-разному: так, минимальный сток на р. Припять существенно повысился, менее заметно он повысился на р. Днепр – г. Орша, на остальных реках сток не изменился.

Выполненные исследования внутригодового распределения стока за различные периоды показывают некоторую его трансформацию.

Для выявления пространственной структуры изменения стока малых рек имеющиеся ряды наблюдений разбиты на два периода и определены относительные изменения годового стока как $k_i = (Q_{cp2} - Q_{cp1}) / Q_0$, где Q_{cp1} и Q_{cp2} – средние значения годового стока за период до 1965 г. и с 1966 г. до настоящего времени, соответственно; Q_0 – норма годового стока воды. Полученные коэффициенты картированы (рис. 3) с использованием координат центров водосборов рек.

Анализ пространственной структуры колебания годового стока показывает, что в северной и центральной частях Беларуси, менее подверженных мелиоративным воздействиям, изменений годового стока практически не произошло. В северо-западной части расходы воды незначительно уменьшились за период 1966 – 2000 гг., в то время как для южной и юго-западной частей Беларуси произошло увеличение годового стока за этот же период по сравнению с периодом до 1965 г.

Аналогичные карты построены и для стока весеннего половодья рек Беларуси, минимального летне-осеннего и минимального зимнего стоков (рис. 4 – 6).

Анализ пространственной структуры изменения стока весеннего половодья рек Беларуси показывает повсеместное его уменьшение. Наиболее существенно этот процесс отмечается на р. Днепр и ее притоках. Существенное уменьшение наблюдается и на рр. Западная Двина и Неман. В меньшей степени это относится к рр. Западный Буг и Припять, а также их притокам.

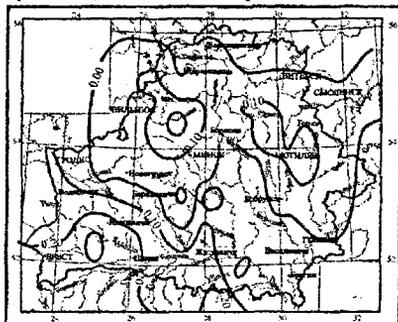


Рис. 3. Пространственная структура изменения годового стока рек Беларуси.

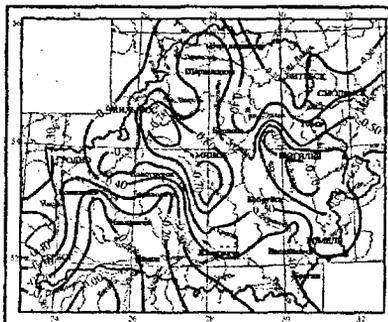


Рис. 4. Пространственная структура изменения максимального стока весеннего половодья рек Беларуси.

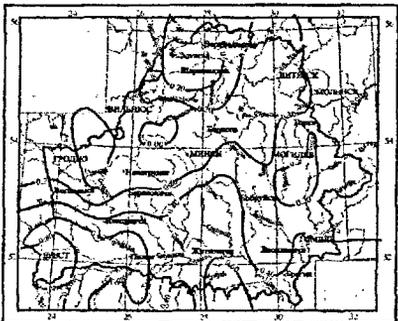


Рис. 5. Пространственная структура изменения минимального летне-осеннего стока рек Беларуси.

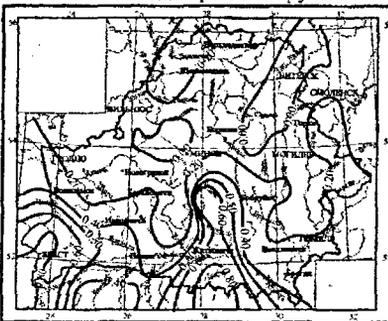


Рис. 6. Пространственная структура изменения минимального зимнего стока рек Беларуси.

Такое повсеместное уменьшение максимального стока нельзя объяснить влиянием мелиорации или другими антропогенными факторами, в данном случае причиной являются естественные процессы. В част-

ности, увеличение количества оттепелей, в результате которых частично, а в отдельные периоды и полностью расходуются снеговые запасы воды зимой, вызывая повышение зимней межени, а порой приводя и к зимним паводкам. Этот процесс наблюдается повсеместно.

Противоположная картина наблюдается при изменении минимального летне-осеннего стока рек Беларуси. Здесь наблюдается повышение стока лишь в пределах Полесской низменности. На остальной территории изменений в основном не произошло. Увеличение минимальных летне-осенних расходов воды связано с осушительными мелиорациями, в результате которых были частично сброшены вековые запасы грунтовых вод верхнего горизонта. Кроме того, произошло сгущение проводящей сети. Ранее влага накапливалась в торфяном болоте и расходовалась на испарение, после устройства осушительных каналов уменьшились пути фильтрации и поверхностного стока, вода быстрее попадает в систему мелиоративных каналов, что приводит к увеличению минимального летне-осеннего стока и уменьшению суммарного испарения.

В подтверждение гипотезы антропогенного изменения водного режима рек на территории Полесья нами выполнен сравнительный анализ изменения ПКФ за различные периоды в зависимости от водного режима рек рассматриваемого региона. Расчеты выполнены для трех характерных периодов: наибольших расходов воды весеннего половодья (В), минимальных летне-осенних (Л) и годовых (Г) расходов. Так, сравнение ПКФ для периода, не подверженного мелиоративным воздействиям, с ПКФ для периода крупномасштабного мелиоративного строительства указывает на статистически значимые различия между ними ($\Delta R(0)_в=0,040$; $\Delta R(0)_л=0,326$; $\Delta R(0)_г=0,111$). Различия наиболее существенны для минимального стока (47,5 %), что может быть связано с изменением общей водности реки, величины водосборной площади, размера площади осушительных болот и заболоченных земель, густоты осушительной сети и степени канализованности. В Полесье преобладают мелкозалежные торфяники на хорошо проницаемых песках, глубокая дренажная сеть и канализованные русла рек врезаются в подстилающий грунт, поэтому здесь отмечается значительное изменение в колебаниях. Налицо факт антропогенного изменения стока, вызванного крупномасштабными гидромелиоративными работами в Белорусском Полесье.

Из антропогенных факторов, способных существенно влиять на речной сток в Беларуси, следует отметить забор воды из природных источников. Выполненный нами детальный анализ водопотребления Республики Беларусь показал, что в настоящее время степень влияния безвозвратного водопотребления и потери воды при регулировании речного стока невелики и находятся в пределах ошибки измерения.

Таким образом, основное влияние на колебания речного стока крупных рек оказывают природно-климатические факторы. Влияние антропогенных факторов на сток малых рек более существенно, чем на сток крупных рек.

Суммарное испарение является связующим звеном между тепловыми и водными ресурсами. Нами проанализированы материалы наблюдений за суммарным испарением по основным метеостанциям Беларуси с месячной дискретностью. С конца 90-х годов прошлого столетия наметилась тенденция к уменьшению суммарного испарения в большинстве районов Беларуси.

Для мая характерен рост суммарного испарения, связанного с увеличением температуры воздуха и повышенным увлажнением, вызванным снеготаянием. В остальные месяцы суммарное испарение лимитируется недостатком почвенной влаги. Кроме того, уменьшение скорости ветра в последнее время является фактором, существенно влияющим на скорость испарения.

Временные ряды суммарного испарения имеют сложную картину, отмечается рост суммарного испарения в мае по метеостанции Василевичи, а в сентябре – по метеостанции Шарковщина, кроме того, в июне по метеостанции Василевичи наблюдается уменьшение суммарного испарения, причем во всех случаях имеют место статистически значимые линейные тренды.

Колебания интенсивности испарения с водной поверхности Беларуси, а следовательно, и режима суммарного испарения вызваны, главным образом, изменениями скорости ветра и, в меньшей степени, уменьшением суммарной солнечной радиации. Происходящие процессы разнятся как по территории, так и по направленности, и по скорости самих процессов. Они являются одной из основных причин изменения стока рек и уровней озер в последние 25 – 30 лет.

В изменении *продуктивных влагозапасов* чаще преобладает тенденция к увеличению продуктивных влагозапасов в целом за вегетационный период и в отдельные месяцы этого периода. Тенденция к уве-

личению связана, на наш взгляд, с уменьшением суммарного испарения, которое, в свою очередь, вызвано значительным уменьшением скорости ветра (рис.7).

Статистически значимые различия в изменениях влажности почвы за вегетационный период до 1980 г. и после 1981 г. наблюдаются на следующих станциях: Барановичи, Бобруйск, Волковыск, Верхнедвинск, Гродно, Жлобин, Лельчицы, Минск, Марьина Горка, Полеская, где абсолютная разница в продуктивных влагозапасах составила более 15 % (рис. 8).

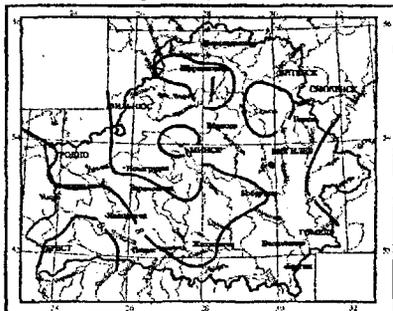


Рис. 7. Градиенты изменения продуктивных влагозапасов за май–август, мм/10лет.

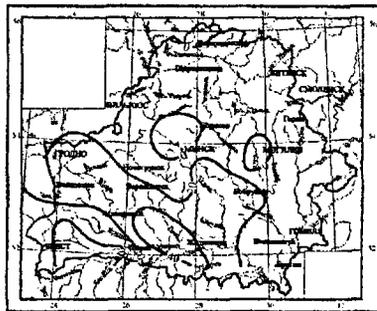


Рис. 8. Изменения продуктивных влагозапасов минеральных (50-сантиметрового слоя) почв Беларуси, %.

В пятой главе дан прогноз изменения ЭВБ. В настоящее время для описания многолетних колебаний годового стока в основном используются простая цепь Маркова (учитывается корреляция между смежными членами ряда) и сложная цепь Маркова (допускается наличие ближних и дальних внутрирядных связей). В последнем случае для описания многолетних колебаний ЭВБ используется автокорреляционная функция (АКФ). Коэффициенты автокорреляции ($r(1)$) годового стока рек Беларуси представлены в виде карт, что позволяет использовать данные методы для слабо изученных рек.

Анализ АКФ и ЧАКФ позволил построить следующие модели: р. Припять – г. Мозырь – АР(1) (модель авторегрессии первого порядка); р. Неман – г. Гродно – АР(2) (модель авторегрессии второго порядка); СС(2) (модель скользящего среднего второго порядка), кроме того, может использоваться и АР(1); р. Днепр – АР(1); р. Западная Двина – г. Витебск – АРСС(1) (модель авторегрессии и скользящего среднего первого порядка).

В целом, аналогичная картина отмечается и для минимальных летне-осенних расходов воды рек Беларуси.

Для описания временных рядов минимальных летне-осенних расходов воды можно рекомендовать модели $AR(1)$, а для р. Неман – г. Гродно можно также дополнительно использовать модель $AR(2)$.

Параллельно с концепцией случайности многолетних колебаний годового стока используется концепция цикличности.

Скользющие средние подтвердили гипотезу увеличения годового и минимального летне-осеннего стока и уменьшения максимального стока весеннего половодья. Это вызвано изменением характера зим, т. е. учащением зимних оттепелей, что приводит к таянию снега зимой и поступлению его в речную сеть до весеннего половодья.

Для оценки трендовых изменений стока основных рек Беларуси выполнен прогноз на ближайшие 10 лет с использованием стандартных статистических методик для годового, максимального и минимального стоков. Как показывает прогноз стока на ближайшие 10 лет, при существующих ныне тенденциях изменения годового стока не выйдут за пределы точности прогноза. Максимальный сток повсеместно будет уменьшаться, минимальный сток существенных изменений претерпеть не должен.

Для более тонких исследований временных рядов нами использован спектрально-временной анализ с временным окном 35 лет, т. е. треть полного периода. По этой причине СВАН-диаграммы охватывают временной отрезок с 1900 по 1980 гг. На рис. 9 приведены СВАН-диаграммы рядов различных видов стока воды для ряда рек Беларуси.



Рис. 9. СВАН-диаграммы годовых, максимальных (весеннего половодья) и минимальных (летне-осенних) расходов воды р. Припять – г. Мозырь.

Анализ диаграмм показал следующие закономерности. Доминирующими короткопериодными циклами являются 2 – 3, 4 – 6, 9 – 12, 13 – 14-летние. Из долгопериодических циклов следует отметить 20 –

25, 30 – 50-летние. Кроме того, имеются различия в цикличности на севере и юге Беларуси, что требует дополнительных, более тщательных исследований, указывает на сдвиг спектра доминирующих циклов р. Западная Двина в сторону больших значений (появление 16,6 и 25-летних циклов), чем в р. Припять – г. Мозырь, в которой преобладают 2,0 – 2,27-летние циклы [Логоинов, Иконников, 2003].

Для СВАН-диаграмм максимального стока весеннего половодья наблюдается общая картина преобладания мощных циклов с обертонами около 2,0 – 3,0 в верхней части диаграмм, кроме Припяти, что можно объяснить различными условиями формирования стока, рельефом местности, геологическими и гидрогеологическими условиями Белорусского Полесья.

СВАН-диаграммы максимального стока весеннего половодья в отличие от минимального летне-осеннего стока существенно различаются для рек Беларуси. Это может быть связано с генетическими условиями формирования минимальных расходов, различным уровнем антропогенной нагрузки на водосборы рек и особенностями грунтового питания рек различных регионов Беларуси. Существенный разброс в значениях продолжительности циклов минимального стока (часто встречаются циклы с обертонами порядка 30 – 50) возможен в связи с относительной неорганизованностью (отсутствием дружности) формирования минимальных летне-осенних расходов по отношению к максимальным расходам весеннего половодья, имеющим часто непродолжительные пикообразные гидрографы.

В дополнение к СВАН-диаграммам использовались параметры хаотизации. Для годовых расходов воды р. Припять – г. Мозырь более слабо выражены колебания параметра хаотизации. Низкие величины отмечены в 1940 – 1950 гг. Для стока р. Неман – г. Гродно при общей картине снижения параметра хаотизации в 1940 – 1950 гг. с дальнейшим выходом на относительное плато отмечен постепенный его рост после 1950 г. Для стока р. Днепр – г. Орша характерно наличие ряда мелких пиков в распределении этого параметра при тенденции постепенного его роста. Резкое снижение отмечается в 1940 – 1950 гг. Аналогичная картина наблюдается в р. Днепр – г. Речица. Однако после 1970 г. наблюдается резкое снижение параметра хаотизации на этом посту. Для р. Березина – г. Бобруйск отмечается увеличение этого параметра в конце периода наблюдений, однако затем он постепенно снижается. Амплитуда колебаний параметра хаотизации в р. Западная

Двина – г. Витебск составила от 0 до 0,9. Следует отметить, что наблюдается тенденция увеличения параметра хаотизации в последние годы.

Таким образом, анализ приведенных выше спектрально-временных диаграмм показал, что наблюдается изменение длительности циклов в колебаниях расходов воды в реках Беларуси. Особенно резкие изменения прослеживаются в стоке р. Припять (1970; 1980).

В заключение отметим, что спектрально-временной анализ позволил отследить устойчивость различных циклов гидрологических рядов и, как следствие, оценить возможность использования цикличности при прогнозе стока рек.

Анализ цикличности выполнен с помощью СВАН-анализа (окно 11 лет) других ЭВБ по метеостанциям Василевичи и Шарковщина. Расчетный период принят с 1959 по 2002 гг., чтобы оценить имеющиеся место в последнее время изменения в ЭВБ, а также выявить тенденции и на основе их дать прогноз.

Атмосферные осадки. Характерны 3 и 11-летние циклы, хотя встречаются 4 и 6-летние циклы. *Суммарная радиация.* Преобладают короткие 2, 3 и 4-летние, но также встречаются средние 11-летние циклы. *Радиационный баланс.* Преобладают 11-летние циклы, достаточно часто встречаются 2, 3 и 4-летние циклы, в отдельных случаях имеются и 6-летние циклы. *Скорость ветра.* Преобладают 2, 4 и 11-летние циклы, хотя встречаются 3 и 6-летние циклы. *Испарение с водной поверхности.* Преобладающими являются 3 и 4-летние циклы, достаточно часто встречаются и 11-летние циклы, и изредка имеют место 2 и 5-летние циклы. *Суммарное испарение.* Характерны 5, 3 и 2-летние циклы, достаточно часто встречаются и 11-летние циклы. *Продуктивные почвенные влагозапасы.* Преобладающими являются циклы 3 и 11 лет, значительно реже встречаются 4-летние циклы и очень редко – 2 и 6-летние.

Исследование межгодовой изменчивости среднемесячных модулей стока в соответствии с методикой, разработанной В. М. Федоровым [Федоров, 2001] для климатических данных и адаптированной нами для речного стока, позволило установить статистически достоверные периодические изменения, близкие к 5 годам. Приблизительно каждые 2,5 года среднемесячный модуль стока приближается к среднему многолетнему значению. С периодом, близким к 2,5 годам, изменяется не сама функция (среднемесячный модуль стока), а ее амплитуда.

Гармоника с периодом, близким к 5 годам, может считаться одним из достоверных параметров хронологической структуры гидрологического режима рек Беларуси и учитываться при разработке долгосрочных прогнозов среднемесячных расходов (модулей стока).

Для исследования возможности прогнозирования гидрологических характеристик нейронными сетями использованы годовые расходы воды рек с наиболее длительными временными рядами наблюдений. Численный эксперимент проводился на отрезке 15 лет с 1986 по 2000 гг. с заблаговременностью прогноза 1, 2, 3, 4 и 5 лет.

Результаты прогнозирования с заблаговременностью 1 год по различным рекам Беларуси являются приемлемыми. Так, в диапазон $\pm 5\%$ попало 45 % от всего количества прогнозируемых лет, а в диапазон $\pm 20\%$ – 88,3 %. По мере увеличения заблаговременности прогноза точность предсказания снижается.

Для прогнозирования годовых расходов воды рек перспективно использование нейронных сетей. В целом, численный эксперимент дал хорошие результаты. Тем не менее использование нейронных сетей для прогнозирования гидрологических временных рядов потребует от исследователя высокой профессиональной подготовки и опыта работы.

Первыми работами, посвященными изменению водных ресурсов в Беларуси в связи с изменением климата, являются работы А. Г. Гриневиц, В. Н. Плужникова [Гриневиц, Плужников, 1997] и В. Ф. Логинова [Климат..., 1996; Логинов, 1998.]. Развивая идеи вышеприведенных работ, используя гидролого-климатическую гипотезу В. С. Мезенцева [Мезенцев, 1995], нами разработана многофакторная модель, в основе которой лежит стандартное уравнение водного баланса участка суши с независимой оценкой основных элементов баланса. Разработанная модель использована для оценки возможных изменений водных ресурсов рек Белорусского Полесья в зависимости от тех или иных гипотез изменения климата и воздействия на характеристики водосборов. На основе анализа существующих оценок возможного антропогенного изменения климата численный эксперимент проведен для всех сочетаний повышения (понижения) средней годовой температуры воздуха на 2°C и годовых атмосферных осадков на 10 % по сравнению с современным уровнем. Кроме того, рассматривались варианты антропогенных воздействий на водосборе (изменение заболоченности, залесенности, гус-

тоты речной сети, распаханности и т. д. в пределах ± 5 , 10, 20 и 30 % от существующих).

Анализ различных сценариев развития климата и антропогенной нагрузки позволил комплексно оценить трансформацию речного стока. Речной сток наиболее чувствителен к одновременному уменьшению количества атмосферных осадков и увеличению температуры воздуха. Значения стока существенно уменьшатся для летних месяцев (до 50 – 53 %). Таким образом, наиболее уязвимыми окажутся реки Белорусского Полесья, где может произойти уменьшение стока до 45%, а при наложении антропогенной составляющей уменьшение среднего годового стока может достигнуть 50 %.

Полученные результаты моделирования изменения стока рек Белорусского Полесья в зависимости от вариантов изменения климатических факторов хорошо корреспондируют с выводами В. Ю. Георгиевского, А. В. Ежова, И. А. Шикломапова, А. И. Шерешевского [Возможные ..., 1996], которые провели исследования изменения стока для рек бассейна Днепра. Их прогноз изменения стока р. Днепр составил от 25 до 40 % и более в зависимости от вариантов воздействия, которые основывались на моделях общей циркуляции атмосферы, глобального потепления климата и росте содержания CO_2 в атмосфере.

Прогноз изменений почвенных влагозапасов Белорусского Полесья свидетельствует о необходимости заблаговременной подготовки к возможным негативным последствиям обеспечения влагой корнеобитаемого слоя почвы. В наибольшей степени это скажется на условиях возделывания ряда сельскохозяйственных культур. По одному из вариантов прогноза изменения климата могут существенно уменьшиться влагозапасы, что приведет к увеличению уже существующего дефицита влажности почв как в отдельные годы, так и внутри года. При этом увеличится изменчивость ЭВБ и, как следствие, возрастет диапазон изменчивости балансовых величин. Все это потребует дополнительной подачи воды на сельскохозяйственные поля, для чего необходимо должное внимание уделить особенностям функционирования существующих мелиоративных систем, их технической реконструкции и совершенствованию методов управления водным режимом. Однако при прогнозируемом развитии климата, помимо уменьшения влагозапасов в корнеобитаемом слое почвы, произойдет и уменьшение речного стока, что потребует дополнительных затрат для поиска водных ресурсов и покрытия дефицитов воды. Прогнозируемое потепление климата вы-

зовет очередную негативную реакцию водных экосистем, особенно это скажется на поймах рек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые с использованием наиболее полного массива гидрометеорологических данных и современных статистических методов, включая методы, разработанные автором диссертации, выполнен комплексный анализ формирования водного баланса речных водосборов Беларуси в условиях изменяющихся природных и антропогенных факторов. Основные результаты исследований сводятся к следующему.

1. Разработана методика качественной и количественной оценки пространственно-временных колебаний полей ЭВБ с помощью пространственных корреляционных функций и функций пространственной асинхронности.

2. Комплексный анализ пространственно-временных колебаний ЭВБ с месячной дискретностью позволил получить следующие новые результаты:

- с использованием ПКФ установлена однородность стока рек Балтийского склона почти для всех интервалов осреднения (исключение – май и июль); атмосферных осадков Черноморского склона – для апреля, октября, ноября и теплого периода в целом, суммарного испарения Черноморского склона – для февраля, июня, июля, октября, ноября, вегетационного и теплого периодов, а также для года в целом;

- оценена анизотропность полей ЭВБ Беларуси для каждого месяца;

- доказана стабилизация антропогенного воздействия на речной сток после прекращения интенсивных мелиораций (после 1990 г.) в бассейнах водосборов рек.

3. Анализ изменений ЭВБ за период инструментальных наблюдений позволил выявить следующие закономерности:

- в изменениях годовых атмосферных осадков выделены три зоны: а) юго-западная, зона отрицательных трендов (градиенты менее -10 мм/10лет); б) центральная, зона неустойчивых трендов (градиенты – от -10 до +10 мм/10лет); в) северо-восточная, зона положительных трендов (градиенты более 10 мм/10лет). Установлены зависимости характера и величины тренда от месяца года;

– среднегодовые и обеспеченные величины стока крупных рек Беларуси практически не изменились. Увеличение стока рр. Свислочь и Днепр вызвано переброской части стока р. Виляя ($0,2 \text{ км}^3/\text{год}$);

– изменению максимального стока для всех рек характерно его уменьшение. Наиболее существенны изменения на рр. Березина, Неман, Днепр;

– минимальный сток на р. Припять повысился;

– установлена трансформация внутригодового распределения на р. Припять, р. Днепр – г. Речица и р. Березина.

– годовой сток малых рек в южной и юго-западной частях Беларуси увеличился. В северо-западной части незначительно уменьшился;

– максимальный сток весеннего половодья малых рек уменьшился;

– минимальный летне-осенний сток малых рек повысился в пределах Полесской низменности, на остальной территории изменений практически не произошло;

– антропогенная нагрузка на речной сток, в основном за счет безвозвратных потерь воды при водопотреблении, не превышает 3 % и находится в пределах точности гидрологических расчетов. Влияние антропогенных факторов на сток малых рек более существенно, особенно крупномасштабных мелиораций на Полесье;

– с конца 90-х годов прошлого столетия на большей части Беларуси уменьшилась скорость ветра, что повлекло за собой уменьшение суммарного испарения и испарения с водной поверхности. Это может быть одной из основных причин изменения водного режима рек и уровней озер, а также свидетельством изменения климатических условий за последние 15 – 20 лет;

– установлены тенденции роста продуктивных влагозапасов в целом за вегетационный период. Они связаны с уменьшением суммарного испарения. Кроме того, в северной части Беларуси произошло увеличение атмосферных осадков. Статистически значимые различия в изменениях влажности почвы за вегетационный период до 1980 г. и после 1981 г. выявлены в центральной части Беларуси, а также в Пинском и Мозырском Полесьях;

– анализ стока воды крупных рек с помощью СВАН-диаграмм позволил выявить следующие циклы: 2 – 3, 5, 9 – 12,5, около 17 лет;

– анализ частотной структуры месячных значений ЭВБ и определяющих их факторов показал наличие 2 – 3, 4 – 6 и 11-летних циклов. В колебаниях межгодовой изменчивости среднемесячных модулей

стока выявлены статистически значимые циклы изменения, близкие по продолжительности к 5 годам.

4. Полученные надежные и наиболее полные данные по формированию водного режима Беларуси и созданная уникальная электронная база данных за период инструментальных наблюдений являются основой планирования, оптимизации водохозяйственных мероприятий и сохранения природных водных объектов как важнейших элементов окружающей среды, а разработанный программный комплекс «Гидролог» позволяет автоматизировать эти расчеты.

5. Разработан прогноз изменения стока рек при различных сценариях климата будущего с учетом индивидуальных особенностей этих водосборов. Показано, что при наиболее неблагоприятном сценарии потепления климата сток малых рек Белорусского Полесья уменьшится в отдельные периоды на 45 %. При этом произойдет увеличение испаряемости, существенно уменьшатся почвенные влагозапасы, что усугубит уже существующий дефицит влажности почв. Кроме того, возрастет изменчивость ЭВБ. Все это потребует дополнительной подачи воды на сельскохозяйственные поля, что будет возможно только при технической реконструкции мелиоративных систем и совершенствовании методов управления водным режимом. Уменьшение речного стока потребует дополнительных затрат покрытия дефицитов воды.

6. Разработанные автором методики позволяют более эффективно решить ряд прикладных задач водного хозяйства: определить основные характеристики стока слабо изученных малых рек Беларуси; выявить зоны питания и разгрузки грунтовых вод на территории Беларуси; оценить антропогенную нагрузку на сток отдельных рек; восстановить сток малых рек методом пространственной интерполяции; рассчитать внутригодовое распределение стока рек Беларуси методом статистической компоновки; определить параметр дружности весеннего половодья; смоделировать динамику почвенных влагозапасов мелиорированных сельскохозяйственных полей; и др.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Волчек А. А., Калинин М. Ю. Водные ресурсы Брестской области. – Мн.: Изд. Центр БГУ, 2002. – 440 с.
2. Бурлибаев М. Ж., Волчек А. А., Шведовский П. В. Проблемы оптимизации природопользования и природообустройства в математических моделях и методах. – Алматы: Каганат, 2003. – 532 с.
3. Логинов В. Ф., Волчек А. А., Шведовский П. В. Практика применения статистических методов при анализе и прогнозе природных процессов. – Брест: Изд-во БГТУ, 2004. – 316 с.
4. Волчек А. А., Плужников В. Н. Пространственно-временные колебания элементов водного баланса (на примере Белоруссии) // Водные ресурсы, 1991. – №5. – С. 21 – 29.
5. Волчек А. А. Пространственно-временные колебания суммарного испарения на территории Беларуси // Вестник БПИ – Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – 2000. – №2. – С. 17 – 43.
6. Волчек А. А. Характер синхронных колебаний стока рек Беларуси // Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. – 2001. – №2(8). – С. 31 – 36.
7. Волчек А. А. Синхронности в колебаниях стока рек Беларуси и его оценка // Природные ресурсы, 2001. – №2. – С. 44 – 48.
8. Калинин М.Ю., Волчек А. А. Водные ресурсы Белорусского Полесья: использование и охрана // Природные ресурсы, 2001. – №4. – С. 35 – 49.
9. Бурлибаев М. Ж., Волчек А. А., Шпендик Н. Н. О роли статистической структуры полей баланса естественного увлажнения почв при обосновании оросительных норм и экологического стока рек // Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2002. – №4. – С. 70 – 81.
10. Логинов В. Ф., Волчек А. А., Лукша В. В. Оценка антропогенного воздействия на водные ресурсы рек Белорусского Полесья // Природные ресурсы, 2003. – №1. – С. 15 – 22
11. Бурлибаев М. Ж., Волчек А. А., Шведовский П. В. Принципы и методы оценки риска и неопределенности функционирования гео- и агроландшафтных систем/ Гидрометеорология и экология. – Алматы, 2003. – №2. – С. 161 – 168.
12. Волчек А. А. Колебания элементов водного баланса Беларуси / Водные ресурсы. – Минск, 2003. – №14. С. 132 – 143.

13. **Волчек А. А.,** Олесик И. А. Динамика использования и качество поверхностных вод Белоруссии// Известия РАН. Серия географическая, 2005. – №3. – С. 76 – 83.
14. **Логинов В. Ф., Волчек А. А.,** Лукша В. В. Многолетние колебания речного стока Припяти// Природопользование. Сб. научн. тр./ Под ред. И. И. Лиштвана, В. Ф. Логинова. Вып. 10. Ин-т пробл. использования природ. ресурсов и экологии НАН Беларуси. – Мн.: ОДО «Тонпик», 2004. – С. 8 – 15.
15. **Логинов В. Ф., Волчек А. А.,** Маньяков Н. В. Прогнозирование годовых расходов воды рек с помощью нейронных сетей// Природопользование. Сб. научн. тр./ Под ред. И. И. Лиштвана, В. Ф. Логинова. Вып. 10. Ин-т пробл. использования природ. ресурсов и экологии НАН Беларуси. – Мн.: ОДО «Тонпик», 2004. – С. 16 – 21.
16. **Волчек А. А.** Многолетние колебания годового стока воды реки Неман (белорусской части)// Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство и теплоэнергетика. – 2004. – №2(26). – С. 2 – 12.
17. **Логинов В. Ф., Волчек А. А.,** Шпендик Н. Н. Изменения продуктивных влагозапасов на территории Беларуси// Природные ресурсы, 2004. – №4. С. 5 – 14.
18. **Логинов В. Ф., Волчек А. А.** Изменение испарения с водной поверхности на территории Белоруссии// География и природные ресурсы, 2005. – №2. – С. 137 – 144.
19. **Плужников В. Н., Волчек А. А.,** Пачкаева Т. И. Оценка пространственно-временных колебаний водных ресурсов и потребления в планах развития орошения земель// Управление использованием водных ресурсов. – М.: ВНИИГиМ, 1987. – С. 36 – 41.
20. **Волчек А. А.** Исследование пространственно-временных колебаний испарения// Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – Мн.: Вышэйшая школа, 1989. – Вып.18. – С. 5 – 9.
21. **Волчек А. А.** Автоматизация гидрологических расчетов// Водохозяйственное строительство и охрана окружающей Среды: Труды международной научно-практической конференции по проблемам водохозяйственного, промышленного и гражданского строительства и экономико-социальных преобразований в условиях рыночных отношений/ Брест. политехн. институт. – Биберах – Брест – Ноттингем, 1998. – С. 55 – 59.
22. **Волчек А. А.,** Науменко В. Я. Пространственно-временные колебания стока рек Беларуси// Прикладная лимнология: Лимнологи-

- ческое и геоморфологическое обеспечение рационального природопользования; Сб. науч. ст. Вып. 3/ Под общ. ред. П. С. Лопуха. – Мн.: БГУ, 2002. – С. 235 – 242.
23. Волчек А. А. Оценка влияния возможного потепления на водный режим минеральных почв Белорусского Полесья// Экология. Наука, образование, воспитание. Сборник научных трудов. Вып. 3. – Брянск, 2002. – С. 14 – 17.
 24. Волчек А. А. Исследование среднемноголетнего стока малых рек Беларуси методом водного баланса// Брэсцкі геаграфічны веснік, том IV, выпуск 1. – Брэст, 2004. – С. 19 – 25.
 25. Логинов В. Ф., Волчек А. А. Сравнительный анализ многолетних колебаний элементов водного баланса территории Белорусского Полесья и Белорусского Поозерья// Природопользование. Сб. науч. тр./ Под ред. И. И. Лиштвана, В. Ф. Логинова. Вып. 11. Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси. Мн.: ОДО «Тонпик», 2005. – С. 29 – 35.
 26. Волчек А. А., Лукша В. В. Анализ структуры временных рядов годовых расходов воды основных рек Беларуси// Вестник БГТУ. Водохозяйственное строительство и теплотехника. – 2005. – №2(33). – С. 6 – 15.

Подписано в печать 27.12.2005 г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Ризография. Усл. печ. л. 2,21. Уч.-изд. л. 2,01.
Тираж 110 экз. Заказ 4546.

Отпечатано в
ЧУПП «Издательство Академия»:
224013 г. Брест, пр-т Машерова 75/1, к. 312.

