

Министерство образования Российской Федерации  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

УДК 556.11(470.22)

**Сало Юрий Андреевич**

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ МНОГОЛЕТНИХ  
КОЛЕБАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ВОДНОГО БАЛАНСА  
ТЕРРИТОРИИ КАРЕЛИИ**

25.00.27 – гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

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

Санкт-Петербург

2003

Работа выполнена в Институте водных проблем Севера  
Карельского научного центра Российской академии наук

Научный руководитель: доктор географических наук,  
профессор Н. Н. Филатов

Официальные оппоненты: доктор географических наук,  
профессор А. М. Догановский,  
кандидат физико-математических наук  
С. И. Кузьмина

Ведущая организация: Карельский государственный педагогический  
университет, кафедра географии

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 200\_\_ г., в  
\_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета К212.197.01  
Российского государственного гидрометеорологического университета по  
адресу: г. Санкт-Петербург, Малоохтинский просп., д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского  
государственного гидрометеорологического университета

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.

153883K

Ученый секретарь диссертационного совета  
К212.197.01.

кандидат технических наук



А. В. Лубяной

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Изучение взаимосвязи и динамики элементов климата и водного баланса крупных регионов, оценка их изменчивости под влиянием естественных и антропогенных факторов представляет собой сложную научную задачу и имеет важное практическое значение для охраны водных объектов и их рационального использования. Основу функционирования многоотраслевого экономического комплекса Республики Карелия составляют полезные ископаемые, лесные и водные ресурсы. Поверхностные водные объекты являются основными источниками водоснабжения. Использование озер и рек в качестве приемников сточных вод с различным характером и степенью загрязнения является основным антропогенным фактором качественного изменения водных экосистем Карелии. Внутри- и межгодовая изменчивость режима природных вод во многом определяет как социально-экономический аспект использования водных ресурсов, так и тот естественный фон, на котором функционируют водные экосистемы.

Речной сток является одним из элементов системы регионального климата и водного баланса, поэтому наиболее рациональный подход к установлению закономерностей его колебаний во времени основан на исследовании изменчивости всех основных элементов системы с учетом их генезиса и пространственно-временной связанности.

Особое место в этой проблеме занимает разработка методов оценки возможных в ближайшем будущем изменений водного баланса территории при различных сценариях изменения климата и оценка экологических последствий таких изменений.

Объектом данного исследования является водный баланс административного района, а предметом – многолетние колебания элементов водного баланса (ЭВБ) и основных климатических факторов их формирования для территории Республики Карелия в целом.

**Цели и задачи исследования.** Цель исследования – установить закономерности многолетних колебаний основных составляющих водного баланса территории Карелии за период инструментальных наблюдений и разработать методы оценки их возможных изменений в перспективе.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

сформировать непрерывные ряды осредненных по территории годовых осадков, речного стока и температуры воздуха за период инструментальных наблюдений;

- оценить применимость известных методов для расчета испарения и испаряемости, уточнить их и рассчитать ряд суммарного испарения для исследуемой территории;

- разработать методы корректировки измеренных осадков и уравнивания водного баланса региона;

- выявлять закономерности изменчивости ЭВБ, статистически оценить детерминированные тенденции в ходе сформированных рядов, квазипериодические компоненты и случайные составляющие, установить взаимосвязь колебаний основных климатических характеристик и составляющих водного баланса;

- разработать схему стыковки моделей глобального климата (МГК) и модели регионального водного баланса, выбрать и обосновать критерии адекватности МГК, выполнить оценку возможных изменений элементов водного баланса территории при различных сценариях изменения климата;

В соответствии с задачами определены основные методы исследования – метод водного баланса и метод статистического анализа.

Научная новизна и практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

- разработан и впервые применен для территории Карелии метод уравнивания водного баланса для скользящих 15-летних с однолетней корректировкой измеренных осадков и расчетом суммарного испарения;

- предложена эмпирическая формула для расчета испаряемости за годовые и многолетние интервалы времени для водосборов Северо-Запада России, Карелии и Кольского полуострова; установлена нелинейная зависимость выборочных коэффициентов вариации гидрометеорологических рядов от соответствующих норм; выявлены особенности флуктуации рядов для различных фаз квазипериодических колебаний;

- установлено, что для условий избыточного увлажнения ведущим климатическим фактором, определяющим аккумуляционную составляющую водного баланса водосборов, является температура приземного воздуха; для территории Карелии получена в аналитическом виде зависимость годовой аккумуляции от температуры воздуха и осадков;

- разработан и апробирован для территории Карелии способ стыковки данных моделей глобального климата и регионального водного баланса.

Полученные результаты будут использованы для оптимизации мониторинга регионального климата и гидрологического режима; как информационная и методическая основа для построения комплексных моделей

природных экосистем, а также для проверки адекватности различных моделей глобального и регионального климата и сравнения результатов численных экспериментов различных МГК. Предложенное уравнение связи испаряемости и температуры воздуха может быть использовано для уточнения годовых и многолетних значений испаряемости и суммарного испарения, их расчета для неизученных водосборов, уточнения карт норм основных составляющих водного баланса региона.

Основные результаты получены автором в рамках научно-исследовательских тем, выполняемых в Институте водных проблем Севера Карельского научного центра РАН (ИВПС КарНЦ РАН), а также при выполнении исследований по проектам РФФИ и по грантам ИНТАС;

Достоверность результатов обоснована использованием современных методов анализа и обобщения исходной информации и привлечением данных наблюдений Росгидромета и государственной сети Финляндии;

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации были представлены на 8 научных конференциях, в том числе международных: «Финно-угорский мир: состояние природы и региональная стратегия охраны окружающей среды» (Сыктывкар, 1997 г.); «Поморье в Баренц-регионе: экология, экономика, культура» (Архангельск, 2000 г.); в соавторстве с Л. Е. Назаровой, «Управление северными речными бассейнами» (Финляндия, Оулу, 2001 г.); в соавторстве с Н. Н. Филатовым и Л. Е. Назаровой, на XIII международном симпозиуме «Северные исследовательские водосборы» (Финляндия, Саариселькя, 2001 г.); в соавторстве с Н. Н. Филатовым, А. В. Семеновым и Л. Е. Назаровой, на IV международном Ладожском симпозиуме (Новгород, 2002 г.). Основные положения и результаты исследования докладывались на заседании Президиума Карельского НЦ РАН (2001 г.), на заседании кафедры гидрологии суши РГГМУ (2003 г.), а также на заседаниях Ученого совета ИВПС КарНЦ РАН в 1999-2003 гг.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 8 научных статей, в основном в соавторстве с д. г. н., проф. Н. Н. Филатовым и гл. гидрологом Л. Е. Назаровой (ИВПС КарНЦ РАН). Личный вклад автора состоял в освещении вопросов, непосредственно связанных с решением поставленных в диссертации задач.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений; изложена на 132 страницах, включает 24 рисунка, 12 таблиц, 8 приложений и библиографический список использованной литературы из 109 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе рассмотрены основные черты физико-географических условий исследуемой территории.

Характерными особенностями территории являются высокая заболоченность (23%), залесенность (49%) и озерность (12%, а с учетом части акватории Ладожского и Онежского озер — 21%).

Климат Карелии умеренно-континентальный с чертами морского, по генетической классификации Б. П. Алисова (1969) территория относится к западному району атлантико-арктической зоны умеренного пояса. Географическое положение района и связанное с ним количество поступающей солнечной радиации, близость Белого и Балтийского морей, преобладание западного переноса воздушных масс атлантического и арктического происхождения обуславливают интенсивную циклоническую деятельность и высокие значения нормы годовых осадков (600-800 мм по оценкам Ц. А. Швер (1984)). Норма годовой температуры воздуха изменяется по территории от 0 на севере до 4°C на юге. Вследствие повышенной влажности, большой облачности, невысокой летней температуры, исследуемая территория относится к зоне относительно малого суммарного испарения. Норма годового испарения с поверхности суши изменяется по территории от 310-340 на севере до 380-400 мм на юге.

В границах Республики Карелия насчитывается более 61 тыс. озер и 27 тыс. рек, густота речной сети составляет 0,53 км/км<sup>2</sup>. Норма стока изменяется по территории от 8 до 14 л/(с·км<sup>2</sup>), коэффициент вариации годового стока — от 0,16 до 0,33. Общие ресурсы поверхностных вод Карелии составляют 195 км<sup>3</sup>, из которых 25% приходится на долю речного стока, около 80 км<sup>3</sup> аккумуляровано в озерах-водохранилищах. Крупнейшие озерно-речные системы территории зарегулированы каскадами ГЭС, осуществляющими внутригодовое (суточное и сезонное) а также неглубокое многолетнее регулирование речного стока и объемов воды в крупных озерах-водохранилищах — Верхне-Свирском, Кумском, Топояозерском, Выгозерско-Ондском, Сегозерском, Юшкозерском.

Начало исследований отдельных элементов водного баланса было положено Б. Д. Зайковым и С. Ю. Белинковым в конце 30-х годов XX века. Знания о водном балансе территории, его структуре и изменчивости его элементов значительно расширились благодаря работам К. П. Воскресенского, Д. Л. Соколовского, А. П. Бочкова, В. Г. Андреянова, В. И. Бабки-

на, А. М. Владимирова, А. М. Догановского, В. Н. Водогрецкого, О. И. Крестовского и др. Важные научные результаты получены в ходе детальных исследований водного и теплового балансов на экспериментальных водосборах И. М. Нестеренко, Ю. В. Карпечко, А. А. Андриановым, Г. Н. Устиновым. Вместе с тем, накопленные к настоящему времени материалы инструментальных наблюдений, развитие принципов системного подхода и современных методов анализа данных позволяют более детально исследовать многолетние колебания основных элементов водного баланса территории Карелии в целом за максимально возможный исторический период.

В первом разделе второй главы обоснован выбор основных методов исследования — метода водного баланса и метода статистического анализа. В основе первого из них лежат генетические методы исследования причинно-следственных связей природных процессов и явлений. Вторым методом выбран в качестве базового для исследования статистических связей климатических характеристик и элементов водного баланса, их изменчивости, выявления и оценки достоверности трендов, периодических и случайных компонент рядов. Эти задачи решаются с использованием методов фильтрации, корреляционного анализа (линейной и множественной регрессии), анализа автокорреляционных и спектральных функций временных рядов, оценки погрешности расчетов. Исследование внутренних связей системы регионального климата и водного баланса потребовало применения элементов факторного и кластерного анализа.

В основу наших исследований, вместе с указанными методами, положен принцип пространственно-временного сглаживания полей основных его составляющих (осадков, суммарного испарения, речного стока) и температуры воздуха. При пространственном осреднении нивелируются локальные различия и выделяются общие, типичные для исследуемой территории закономерности изменения характеристик. Временное сглаживание позволяет снизить интенсивность высокочастотных составляющих, исключить влияние регулирования стока гидротехническими сооружениями, выявить основные низкочастотные компоненты в обобщенных по территории динамических рядах.

Уравнение водного баланса в целом для территории Карелии для  $i$ -го года может быть записано в приближенной форме в следующем виде:

$$P_i - R_i - E_i + R_{mmi} - R_{mci} + U_{1i} - U_{2i} \pm \Delta W_i \pm \eta = 0; \quad (1)$$

где  $P_i$  – атмосферные осадки, мм;  $R_i$  – общий (суммарный) речной сток, мм;  $E_i$  – суммарное испарение (эвапотранспирация);  $R_{mi}$  и  $R_{mc}$  – соответственно транзитный речной приток и сток, мм;  $U_{1i}$  и  $U_{2i}$  – подземный приток и подземный сток, мм;  $\Delta W_i$  – изменение запасов влаги внутри контура территории, мм;  $\eta$  – невязка баланса, характеризующая вклад неучтенных составляющих баланса и ошибки расчета,  $i=1, 2, \dots, n$  – номер года в течение расчетного периода, включающего  $n$  лет.

Для достаточно большого периода времени уравнение упрощается и записывается в форме многолетнего (равновесного) водного баланса. Объединяя основные характеристики климата и водного баланса, получим

$$P - R - E[P; E_o(T)] = 0, \quad (2)$$

где  $E_o$  – испаряемость, мм;  $T$  – температура воздуха, °С.

Следовательно, задача состоит в выборе такого периода осреднения, для которого можно обосновано сделать допущения:  $R_{mi} = R_{mc}$ ;  $\Delta W = 0$ ;  $U_{1i} = U_{2i}$  и  $\eta = 0$ . В результате анализа интегральных разностных кривых годового стока р. Кемь, Шуя, Суна, Водла, а так же частных водосборов Белого моря, Ладожского и Онежского озер установлено, что продолжительность смежных многоводной и маловодной фаз в среднем близка к 15 годам (Карпечко, 1999). Как показали исследования А. Н. Афанасьева (1967), А. А. Андрианова и Г. Н. Устинова (1977), продолжительность внутривековых циклов в рядах годовой температуры воздуха, осадков и речного стока на Северо-Западе России изменяется в широких пределах, однако в среднем близка к 15 годам. Выполненные нами расчеты за период 1950–1999 гг. показали, что невязка водного баланса для территории Карелии для скользящих 15-летий не превышает 5% и в среднем равна 2%. Таким образом, выбор периода сглаживания равным 15 лет является, на наш взгляд, достаточно обоснованным, чтобы принять в качестве расчетного уравнение (2).

Во втором разделе выполнен качественный анализ и обобщение данных инструментальных наблюдений и решена задача формирования непрерывных рядов годовой температуры воздуха и ЭВБ для территории Карелии в целом.

В качестве исходной информации использованы ряды годовых величин температуры воздуха и осадков по 26 метеостанциям и годового стока по шести наиболее крупным речным водосборам Карелии (р. Ковда, площадь водосбора в границах исследуемой территории  $F = 13200 \text{ км}^2$ ; р. Кемь,  $F = 26900 \text{ км}^2$ ; р. Нижний Выг,  $F = 27100 \text{ км}^2$ ; р. Суна,  $F = 7670 \text{ км}^2$ ;

р. Шуя,  $F = 10100 \text{ км}^2$  и р. Водла,  $F = 8960 \text{ км}^2$ ) за весь период наблюдений по 2000 г. включительно. Учитывая высокую плотность (6200  $\text{км}^2/\text{пункт}$ ); относительно равномерное распределение метеостанций по территории и синфазность полей годовых величин, пространственно осредненные ряды годовой температуры воздуха (1947–2000 гг.) и осадков (1955–2000 гг.) были рассчитаны по методу среднего арифметического со средней ошибкой  $\pm 0,2^\circ\text{C}$  и  $\pm 19 \text{ мм}$  соответственно. Годовой сток с территории Карелии для периода 1915–2000 гг. за исключением отдельных пропусков вычислен по формуле средневзвешенного по шести водосборам, при этом весовые коэффициенты были приняты равными отношению площади соответствующего водосбора к сумме их площадей.

Восстановление пропусков и удлинение рядов выполнено по методу аналогии. В качестве рядов-аналогов использованы данные по шести станциям и четырем стоковым постам с наиболее продолжительными периодами наблюдений, а также опубликованные ряды годовых осадков на акваторию Ладожского озера (Попов, 1966), годовых осадков и речного стока, осредненных по территории Финляндии (Куусисто, 1992; Хейно, 1994) и ряд суммарного стока рек Вуокса, Волхов и Свирь (Шнитников, 1966). В результате расчетов получены соответствующие уравнения множественной регрессии, по которым рассчитаны осредненные по территории ряды годовой температуры воздуха (1752–2000 гг., длина ряда 249 лет), осадков (1837–2000 гг., 164 года) и речного стока (1847–2000 гг., 154 года). Вследствие того, что длина рядов-аналогов, их количество и точность исходных данных были различными, суммарная погрешность расчетов для различных интервалов совместного периода 1847–2000 гг. находится в пределах  $\pm(0,2-0,4)^\circ\text{C}$  для годовой температуры воздуха,  $\pm(3-15)\%$  для осадков и  $\pm(8-15)\%$  для годового стока.

В исследуемом районе отсутствуют массивные и продолжительные наблюдения элементов радиационного баланса, режима грунтовых вод, водно- и теплофизических свойств почвогрунтов, градиентные измерения метеорологических характеристик. Поэтому при выборе методов расчета суммарного испарения предпочтение отдано эмпирическим формулам, основанным (в том или ином виде) на уравнениях связи испарения  $E$  и осадков  $P$  с учетом испаряемости  $E_o$ .

В данной работе выполнена оценка применимости для исследуемой территории известных уравнений связи  $E = E(P, E_o)$ , предложенных П. Шрайбером, Э. М. Ольдекопом, М. И. Будыко, В. С. Мезенцевым, Л. Тюрком и А. Н. Постниковым (1999). В качестве исходной информации использованы опубликованные данные по многолетнему водному балансу и норме годовой температуры воздуха для 46 расчетных водосборов

Северо-Запада России и Кольского полуострова. Каждое из уравнений было преобразовано относительно  $E_0$ , затем, в результате структурно-параметрической идентификации, были получены уравнения связи  $E_0 = E_0(T)$ , где  $T$  — норма температуры воздуха. Были также приняты во внимание эмпирические формулы  $E_0 = E_0(T)$ , полученные Л. Тюрком и А. Н. Постниковым. Сравнительный анализ показал, что расчет суммарного испарения для речных водосборов Северо-Запада России, Карелии и Кольского полуострова целесообразно выполнять по формуле Э. М. Ольдекопа

$$E = E_0 \cdot th(P/E_0), \quad (3)$$

в которой испаряемость рассчитывается по полученной нами формуле

$$E_0 = 329 + 62T + 2,14T^2, \quad (4)$$

Контрольные расчеты, в том числе по независимой выборке (15 водосборов), показали, что стандартная ошибка расчета по формулам (3) и (4) в среднем составила 8%, по уравнениям связи М. И. Будыко, В. С. Мезенцева и А. Н. Постникова — 11-15%. Таким образом, формула (3) была принята в качестве расчетной для оценки суммарного испарения с поверхности исследуемой территории за период 1837-2000 гг. Уравнение связи (4) может быть использовано в качестве региональной формулы для расчета испаряемости за периоды времени более одного года.

В третьем разделе обсуждается проблема корректировки измеренных осадков и уравнивания водного баланса. В настоящее время общепринятым способом корректировки считается введение поправок к количеству измеренных осадков на приведение результатов дождемерных измерений к осадкомерным, на ветровой недоучет и на смачивание. Наибольшие методические трудности возникают при расчете поправки на ветровой недоучет, из-за необходимости использовать дополнительную информацию — среднюю за расчетный период (месяц, год) скорость ветра, вид осадков, долю осадков, выпадающих с интенсивностью 0,03 мм/мин, от их общей суммы (Методические указания... № 89, 1984). Отсутствие детальной информации за ретроспективный 154-летний период не позволило применить указанный способ и требовало поиска новых решений проблемы.

Предлагаемый метод объективной корректировки измеренных осадков, осредненных за достаточно продолжительные периоды, основан на учете генетических связей метеорологических и гидрологических эле-

ментов, объединенных уравнением равновесного водного баланса. Расчет выполняется итерационным способом в соответствии со схемой (рис. 1) в следующей последовательности. Для каждого расчетного интервала (в нашем случае — скользящих 15-летий) по осредненным значениям измеренных осадков  $P$  и температуры воздуха  $T$  рассчитывают испаряемость  $E_0(T)$ , суммарное испарение  $E(E_0, P)$  по формуле (3) и вычисляют невязку баланса  $\Delta = P - R - E$ . Если  $\Delta \neq 0$ , то исходную величину осадков изменяют на величину невязки с учетом знака последней и повторяют расчет по схеме. По достижении  $\Delta = 0$  расчет завершают и принимают в качестве исправленных те значения осадков и суммарного испарения, для которых невязка равна нулю. В результате расчетов, выполненных для территории Карелии за период 1847-2000 гг., установлено, что для корректировки измеренных осадков и уравнивания баланса за 15-летние скользящие периоды достаточно 2-4 итераций. Начальная невязка баланса составляла от -92

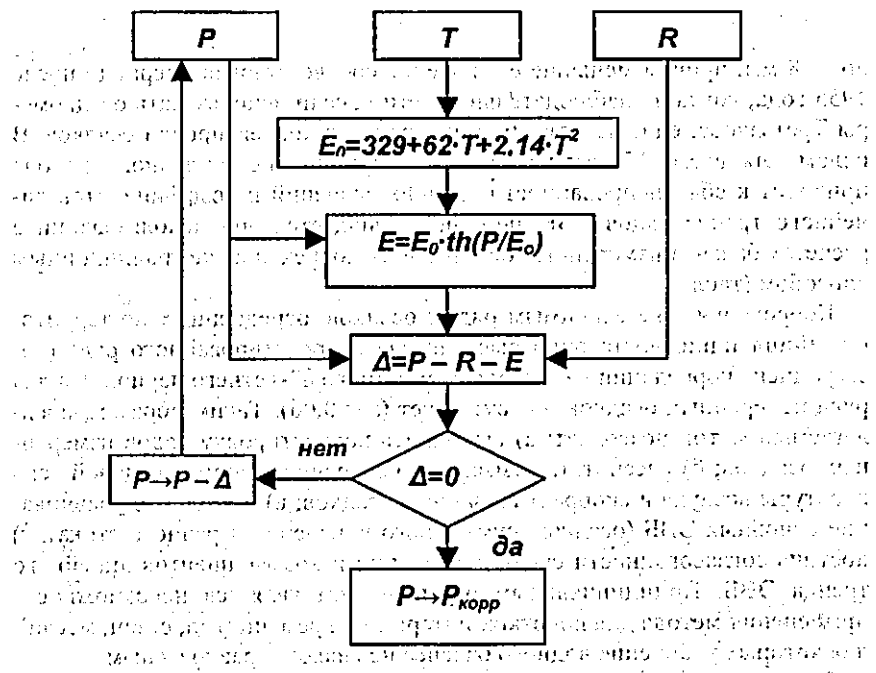


Рис. 1. Расчетная схема корректировки измеренных осадков и уравнивания водного баланса

Таблица 1

Средние значения (мм) и коэффициенты линейного тренда (мм/100 лет) рядов ЭВБ территории Карелии за период 1854-1993 гг.

Элемент	А. С учетом измеренных осадков		Б. Осадки, исправленные на ветровой недоучет		В. Осадки, скорректированные по предложенному методу	
	сред.	тренд	сред.	тренд	сред.	тренд
Осадки	540	64	674	79	725	22
Речной сток	321	-10	321	-10	321	-10
Испарение	368	38	397	40	406	32
Невязка, мм	-149	36	-44	49	-2	0

до -188 мм, причем меньшие ее значения соответствовали периоду после 1955 года, когда на наблюдательной сети начали использовать осадкомеры Третьякова, единые методики измерения и корректировки осадков. В целом для всего 154-летнего периода применение указанного метода приводит к сбалансированности средних значений и коэффициентов линейного тренда рядов ЭВБ, чего не наблюдается при использовании в расчетах баланса измеренных осадков и их корректировке традиционным способом (табл. 1).

Корреляция с независимым рядом осадков, осредненных по территории Финляндии, достаточно высокая для скорректированного ряда (коэффициент корреляции  $r = 0,9$  для совместного 83-летнего периода), а для ряда измеренных осадков - отсутствует ( $r = 0,06$ ). Таким образом, предлагаемый метод позволяет: а) выполнить корректировку рядов измеренных осадков; б) рассчитать суммарное испарение с учетом годовой температуры воздуха и скорректированных осадков; в) выполнить уравнивание основных ЭВБ (осадков, суммарного испарения и речного стока); г) достичь согласованности средних значений и коэффициентов линейного тренда ЭВБ. Принципиальным ограничением является невозможность применения метода для коротких интервалов времени (год, сезон, месяц), для которых уравнение водного баланса не является равновесным.

Применение предложенного метода и данных наблюдений позволило сформировать непрерывные ряды годовой температуры воздуха, осадков, суммарного испарения, испаряемости и речного стока, осредненные для

всей территории Республики Карелия за период с 1847 по 2000 год (154 года).

В третьей главе приведены результаты анализа полученных рядов и исследования структурных связей системы регионального климата и водного баланса.

Анализ выполнен для двух периодов. Для первого (1950-1999 гг.) привлекались данные по водному балансу за годовые интервалы. Это позволило оценить межгодовую изменчивость, выявить высокочастотные квазипериодические компоненты и тренды за относительно короткий 50-летний период. Второй период (1847-1999 гг.) является достаточно продолжительным, чтобы достоверно выявить закономерности внутривековых изменений исследуемых характеристик, представленных 15-летними скользящими средними величинами.

В первом разделе третьей главы исследована межгодовая изменчивость характеристик климата и водного баланса за период 1950-1999 гг. Уравнение водного баланса для годовых интервалов было рассмотрено в виде:

$$P - R - E[P, E_o(T)] \pm U = 0, \quad (5)$$

$$E = E_o th(P/E_o),$$

$$E_o = 329 + 62T + 2,14T^2,$$

где  $U$  - остаточный член уравнения, объединяющий аккумуляционные и неучтенные составляющие годового баланса, а также погрешности расчета всех характеристик; остальные обозначения соответствуют принятым выше. Средние по территории годовые осадки  $P$  исправлены на все виды поправок, включая поправку на ветровой недоучет.

Для отдельных лет величина суммарной невязки изменяется от 229 мм (+26% годовой суммы осадков) в относительно влажном и холодном 1966 году до -138 мм (19% годовой суммы осадков) в исключительно теплом и среднем по увлажненности 1989 году. Таким образом, величина суммарной невязки не является случайной составляющей баланса, имеет генетическую обусловленность и отражает накопление или расходование влаги в пределах исследуемой территории, которое зависит от соотношения поступления тепла и влаги за конкретный год. Знак и величина суммарной невязки определяются гидрометеорологическими условиями конкретного года. Установлена зависимость суммарной невязки от годовой температуры воздуха (коэффициент парной корреляции  $r = -0,73$ ) и годовой суммы осадков ( $r = +0,44$ ) в следующем виде

$$U = 0,46P - 0,81T - 198.$$

Коэффициент множественной корреляции полученной зависимости равен 0,90, среднеквадратическая ошибка расчета составляет 34 мм.

Таким образом, в условиях избыточного увлажнения ведущим фактором является годовая температура воздуха. Ее вклад в общую дисперсию аккумуляции составляет 53%, тогда как вклад годового количества осадков равен 21%.

Оценка линейных трендов показала, что все рассматриваемые 50-летние ряды содержат положительные тенденции, однако статистически значимыми можно считать только тренды в рядах осадков (уровень значимости  $\alpha=1\%$ ) и стока ( $\alpha=10\%$ ), равные 22 и 9 мм/10 лет соответственно. Однородными по дисперсии являются все исследуемые ряды, а по выборочным средним таковыми можно считать ряды годовой температуры воздуха и аккумуляционной составляющей. Ряды осадков и стока неоднородны по выборочным средним при уровне значимости  $\alpha=10\%$ . В целом за период 1950-1999 гг. коэффициенты вариации осредненных по территории Карелии годовой температуры воздуха и аккумуляционной составляющей водного баланса равны 0,61; для речного стока, суммарного испарения и осадков 0,16, 0,14 и 0,12 соответственно.

Структурная упорядоченность обуславливает согласованные циклические колебания характеристик климата и водного баланса, выделенных в результате кластерного и дисперсионного анализа в генетически связанные группы. Для первой группы (температура воздуха, суммарное испарение, аккумуляционная составляющая) максимумы автокорреляционных функций наблюдаются при временном сдвиге около 7 и 10 лет. Для рядов годовой суммы осадков и стока рек, выделенных во вторую группу, максимумы соответствуют сдвигу 4-5 и 13-14 лет. Более достоверно выявить высокочастотные квазипериодические компоненты и оценить их значимость позволил анализ функций спектральной и взаимной спектральной плотности рядов. Временные ряды предварительно были приведены к условиям стационарности удалением тренда и вычитанием соответствующего выборочного среднего. Сглаживание рассчитанных функций спектральной плотности выполнено по формуле Парзена по пяти ординатам.

В результате анализа установлено, что исследуемые 50-летние ряды годовой температуры воздуха и суммарного испарения содержат согласованные и значимые ( $\alpha=5\%$ ) квазипериодические компоненты с временными масштабами около 10 лет, для аккумуляционной составляющей

циклическость с указанным периодом значима при  $\alpha=10\%$ . В рядах годовых осадков и стока выделяются 4-5-летние циклическости ( $\alpha=5\%$ ). Флуктуации с периодом 2-3 года присутствуют во всех рядах, однако их вклад в общую дисперсию менее 10%. Максимумы квадрата когерентности отмечаются на частотах, соответствующих циклическостям 2-3 и 4-5 лет (осадки и сток), 2-3 и около 10 лет (температура воздуха и аккумуляция) и 4-5 лет (осадки и аккумуляция).

Во втором разделе третьей главы основное внимание уделено анализу низкочастотных квазипериодических компонент и трендов динамических рядов за период 1854-1999 гг. Отметим следующие особенности: а) для всех рядов каждое значение представляет собой выборочное среднее, отнесенное к середине соответствующего 15-летнего интервала осреднения; б) уравнение водного баланса (5) для каждого 15-летнего периода включает три составляющих - осадки, сток и суммарное испарение; в) величина аккумуляции принята равной нулю. Количественное подтверждение обоснованности последнего допущения получено на основе анализа данных за период 1950-1999 гг.

Оценка однородности длинных рядов выполнена общепринятым способом - разбиением исходных рядов на две выборки одинаковой длины (1854-1923 и 1924-1992 гг.) и расчетом критериев значимости различия выборочных средних и дисперсий по статистикам Стьюдента и Фишера. За исключением ряда осадков, все исследуемые 139-летние ряды элементов являются однородными по дисперсии. По средним значениям ряды температуры воздуха, осадков, суммарного испарения и стока существенно ( $2\alpha=1\%$ ) неоднородны, что обуславливает наличие значимых линейных трендов в указанных рядах:  $+0,6^\circ\text{C}/100$  лет для температуры воздуха,  $+22$  мм/100 лет для осадков,  $+32$  и  $-10$  мм/100 лет для суммарного испарения и стока соответственно. По величине и знаку коэффициенты линейного тренда полностью согласованы и генетически обусловлены. Увеличение суммарного испарения на протяжении рассматриваемого периода происходило более интенсивно, чем увеличение осадков. Это обусловлено ростом годовой температуры воздуха, и, следовательно, потенциально возможного испарения (испаряемости), величина которого, вместе с осадками, определяет суммарное испарение с территории. При этих условиях речной сток имеет тенденцию к снижению.

Исследование структуры рядов в частотно-временной области позволило выявить следующие закономерности. Основной вклад в общую изменчивость 139-летних рядов годовых осадков и речного стока вносят компоненты с гармониками  $m < 6$ , что соответствует циклическости с периодом 26-30 лет. Статистически значимой объективно следует считать и



составляющую с периодом около 46 лет, несмотря на то, что ряды включают не более трех полных периодов такой продолжительности. В то же время, в сглаженных рядах температуры воздуха и суммарного испарения низкочастотные компоненты с такой цикличностью проявляются слабо и не являются статистически значимыми.

Более информативным является спектральный анализ рядов температуры воздуха, осадков и речного стока, представленных годовыми величинами. Наиболее продолжительный 249-летний ряд годовой температуры воздуха содержит квазипериодические компоненты с временными масштабами около 22-28, 13 и 7 лет, причем цикличность с периодом около 13 лет является значимой при  $\alpha=5\%$  и оценке как по белому, так и по красному шуму. Ряд годовых осадков длиной 139 лет содержит цикличности различных временных масштабов, однако значимыми при  $\alpha=10\%$  являются только флуктуации с периодом около 5 лет. Для речного стока характерны квазипериодические компоненты колебаний с периодами около 28 и 4-6 лет. Оценка соответствия между частотными компонентами рядов осадков и стока показал, что наибольшие значения квадрата когерентности (0,8 и выше) отмечены на частотах, соответствующих цикличностям около 4-6 лет.

В заключительной части второго раздела рассмотрена внутривековая динамика основной количественной характеристики изменчивости динамических рядов — коэффициента вариации ( $C_V$ ). Пространственная изменчивость коэффициента  $C_V$  и его зависимость от физико-географических характеристик водосборов к настоящему времени изучена достаточно подробно. Наряду с пространственной изменчивостью, коэффициент вариации подвержен колебаниям и во времени. Поэтому представляется важным исследовать динамику не только нормы, но и самого коэффициента вариации временных рядов на протяжении достаточно продолжительного периода времени, включающего различные фазы колебаний.

С этой целью были вычислены выборочные средние значения и коэффициенты вариации годовой температуры воздуха (249 лет) и речного стока (139 лет) для скользящих 15-летий и проанализированы хронологические совмещенные графики  $T(t)$ ,  $R(t)$  и  $C_V(t)$ , где  $t$  — время. Установлено, что изменение выборочных значений  $C_V$  происходит асинфазно по отношению к изменению соответствующих средних. В аналитическом виде для территории Карелии получены следующие зависимости:

153883K

где  $\tilde{T} = \frac{T}{\bar{T}}$ ,  $\tilde{R} = \frac{R}{\bar{R}}$  и  $\tilde{C}_V = \frac{C_V}{\bar{C}_V}$  — выборочные средние и коэффициенты вариации, нормированные по соответствующим среднемноголетним значениям, вычисленным для всего периода (по аналогии с модульными коэффициентами).

Аналогичные по структуре зависимости для годовых осадков и годового стока приведены в работе В. В. Коваленко (1993) и отражают пространственную закономерность изменения  $C_V$ . Существенно, что структура и временных зависимостей для различных гидрологических и климатических рядов (температура, осадки, сток) одинакова, что указывает на общее свойство усиления флуктуаций полициклических природных процессов при уменьшении выборочных средних (норм). Чувствительность коэффициента вариации годовой температуры воздуха и стока нелинейно возрастает для  $\tilde{T} < 1$  и  $\tilde{R} < 1$ .

В четвертой главе рассмотрены критерии адекватности моделей глобального климата (МГК), изложен способ стыковки данных МГК и модели регионального водного баланса, выполнена оценка возможных изменений ЭВБ территории Карелии.

В соответствии с принципами системного анализа, любая территория со свойственными ей гидрометеорологическими процессами рассматривается как открытая подсистема глобальной климатической системы, которой свойственны целостность, структурность, иерархичность. Поэтому наиболее рациональный подход к оценке возможных в перспективе изменений климата и водного баланса региона заключается в использовании результатов МГК для различных сценариев климатических условий будущего. Если модель глобального климата адекватна, т. е. реалистично отображает процессы, происходящие в подсистеме регионального климата в течение контрольного периода времени, то и результаты расчетов по модели на предстоящий период могут считаться достоверными. Укажем основные требования к модельным рядам. Во-первых, они не должны иметь существенных расхождений с контрольными (фактическими), по крайней мере, в средних значениях рядов и их дисперсиях. Во-вторых, модельный и фактический ряд должны быть связаны значимой линейной зависимостью. Необходимо также, чтобы совместный период был доста-

точно продолжительным, поскольку мощность критериев, используемых для проверки статистических гипотез, в значительной степени зависит от длины выборки. Таким образом, задача сводится к выбору критериев оценки значимости различия выборочных средних, дисперсий и параметров линейной регрессии модельного и фактического рядов. Решение задачи выполнено на основе соответствующих критериев Стьюдента и Фишера, принятых в качестве стандартов в практике гидрологических расчетов.

**Критерий 1.** Различие выборочных средних модельного и контрольного рядов должно быть статистически незначимо (при выбранном уровне значимости). При этом условии модельный ряд не имеет аддитивного смещения по отношению к контрольному.

**Критерий 2.** Различие дисперсий обоих рядов должно быть статистически незначимо. При выполнении данного условия можно считать, что модельный ряд достоверно воспроизводит вариацию фактического ряда.

**Критерий 3.** Модельный и контрольный ряд должны быть связаны статистически значимой линейной зависимостью. Выполнение этого условия означает, что модельный ряд достоверно отображает общую тенденцию (тренд) контрольного ряда. При этом коэффициент корреляции должен быть положительным, поскольку, например, в случае асинхронности (асинфазности) сопоставляемых рядов даже при выполнении первых двух критериев тренды модельного и контрольного рядов будут противоположны по знаку.

Можно сформулировать и другие критерии, однако слишком жесткие требования к достаточно общим МГК на данном этапе их развития представляются нецелесообразными. В этом смысле указанные выше условия могут рассматриваться как минимальный набор критериев адекватности.

Практически все МГК имеют пространственное разрешение по площади порядка нескольких градусов (нескольких сотен километров) и не учитывают физико-географических особенностей небольших водосборов или отдельных территорий. Поэтому необходима предварительная корректировка модельных данных в узлах модели, расположенных внутри контура исследуемой территории или вблизи него.

В данной работе предложена следующая последовательность подготовки (корректировки) модельных рядов годовой температуры воздуха и осадков:

для контрольного периода по фактическому и модельному рядам выбирается оптимальное количество узлов модели известными способами (шаговым регрессионным методом, методом исключения, методом перебора всех возможных регрессий);

для первой половины контрольного периода выполняется параметризация уравнения регрессии

где  $X$  – фактические данные (температура воздуха, осадки), осредненные по территории;  $X_i$  – модельные данные в  $i$ -м узле сетки модели;  $a_0, \dots, a_n$  – параметры модели, определяемые по методу наименьших квадратов;  $n \geq 1$  – количество узлов;  $n$  – количество узлов;  $n$  – количество узлов;  $n$  – количество узлов.

(для второй половины контрольного периода оценивается адекватность модельных данных по критериям 1-3; если условия критериев выполнены, если модельные данные адекватны, то для всего контрольного периода выполняется параметризация уравнения (6), после чего оно используется для расчета основных характеристик климата исследуемой территории по данным МГК на предстоящий период в соответствие с предлагаемой схемой (рис. 2).

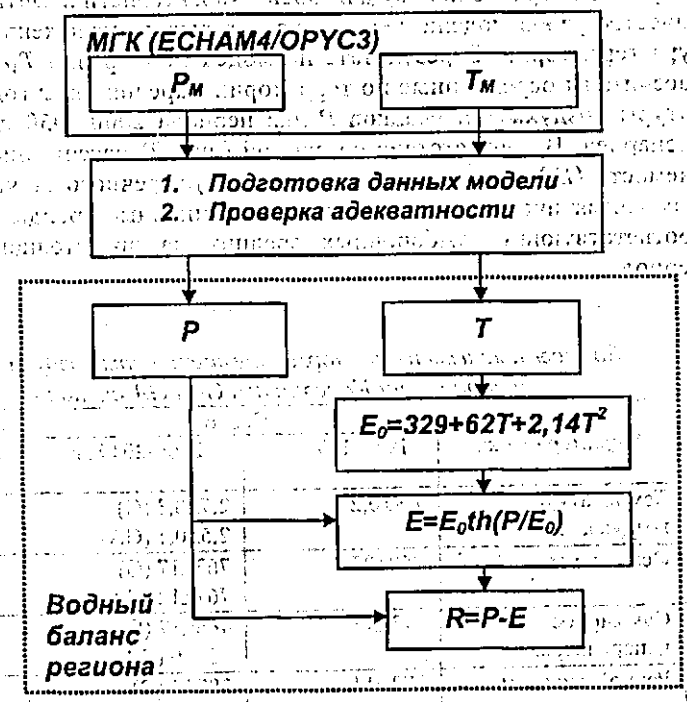


Рис. 2. Схема стыковки данных модели глобального климата (МГК) и модели регионального водного баланса

Оценка возможных изменений основных элементов климата и водного баланса территории Карелии выполнена на период 2000-2050 гг. Входными данными являются ряды годовой температуры воздуха  $T_M$  и осадков  $P_M$  для двух сценариев на 2000-2050 гг., полученные в результате численных экспериментов на объединенной модели «океан-атмосфера-суша» ЕСНАМ4/ОРУС3, разработанной в Метеорологическом институте Макса Планка (Гамбург, Германия) для двух сценариев изменения глобального климата. Первый из них (G-сценарий) предполагает удвоение содержания углекислого и других парниковых газов в атмосфере Земли к 2100 г., во втором (GA-сценарий) дополнительно учитывается прямой эффект аэрозолей техногенного происхождения. Пространственное разрешение модели  $2,8^\circ$  по широте и долготе. Для контрольного периода (1950-1999 гг.) выполнена подготовка модельных данных, проверена адекватность МГК и произведена параметризация уравнения (6) для обеих характеристик. Оптимальное количество узлов модели  $n=3$ , два из которых расположены внутри контура территории. В результате по модельным рядам  $T_M$  и  $P_M$  были рассчитаны осредненные по территории Карелии ряды годовой температуры воздуха  $T$  и осадков  $P$  для периода 2000-2050 гг. для обоих сценариев. В соответствии со схемой (рис. 2) рассчитаны ряды испаряемости ( $E_0$ ), суммарного испарения ( $E$ ) и речного стока ( $R$ ) для новых климатических условий, оценены линейные тренды и изменения соответствующих выборочных средних на предстоящий 50-летний период.

Таблица 2  
Возможные изменения нормы температуры воздуха и ЭВБ территории Карелии для G- и GA-сценария

Характеристика	Период		Изменения, %
	1950-1999 гг.	2000-2049 гг.	
Температура воздуха, °C	$1,8 \pm 0,2$	$2,7 \pm 0,3$ (G) $2,5 \pm 0,1$ (GA)	+(38-50)
Осадки, мм	$750 \pm 25$	$763 \pm 17$ (G) $767 \pm 12$ (GA)	+(1-2)
Суммарное испарение, мм	$413 \pm 13$	$466 \pm 17$ (G) $455 \pm 9$ (GA)	+(10-13)
Речной сток, мм	$322 \pm 14$	$297 \pm 7$ (G) $312 \pm 7$ (GA)	-(3-8)

Выполненные расчеты показывают, что если глобальный климат будет изменяться в соответствии с предполагаемыми сценариями G и GA, то по сравнению со второй половиной XX века норма региональной температуры воздуха возрастет на  $0,4-1,4^\circ\text{C}$  (табл. 2, рис. 3). Увеличение нормы суммарного

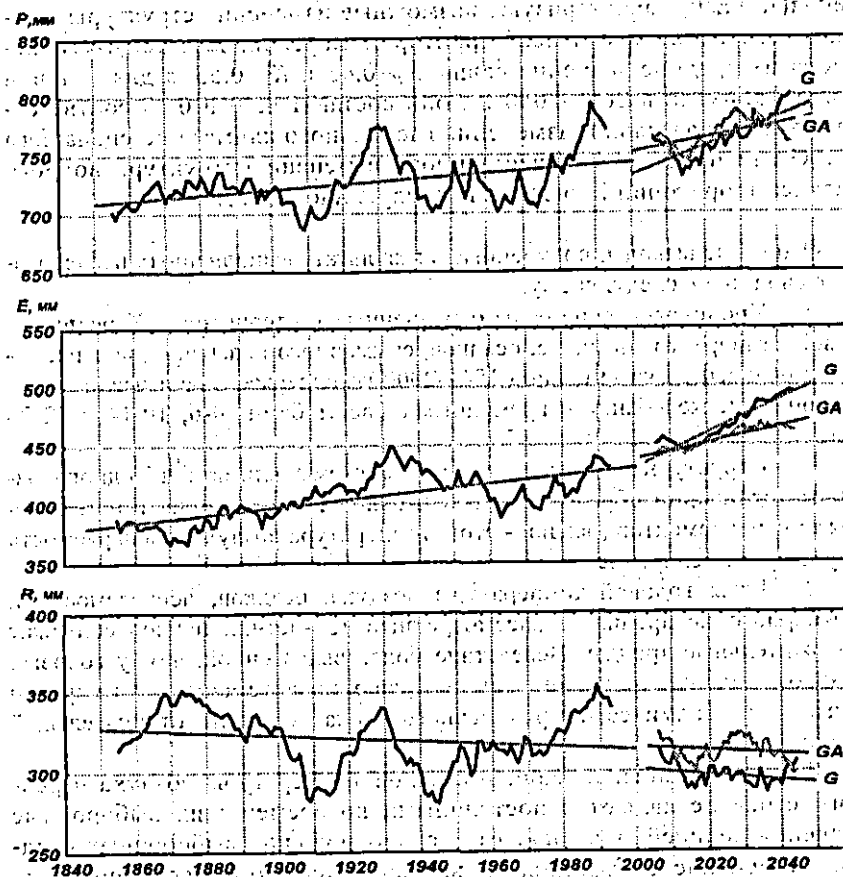


Рис. 3. Фактические (до 2000 года) и модельные ряды основных элементов водного баланса территории Карелии по сценариям G и GA (15-летние скользящие средние)

испарения с территории Карелии составит 10-13% и будет на порядок выше, чем увеличение осадков. Вследствие непропорционального увеличения осадков и суммарного испарения норма речного стока для территории Карелии незначительно (в пределах точности расчета) уменьшится. Изменения коэффициентов стока ( $K_R=R/P$ ) и испарения ( $K_E=E/P$ ) характеризуют возможные изменения структуры многолетнего водного баланса территории Карелии. Для текущего периода их средние значения равны  $K_R=0,45$  и  $K_E=0,55$ , а для условий нового климата в 2000-2050 гг. они составят 0,40 и 0,60 соответственно. Следовательно, изменения глобального климата по сценариям G и GA не приведут к существенному изменению структуры водного баланса территории Карелии в последующие 50 лет.

Основные выводы, полученные в результате выполненных исследований, сводятся к следующему.

1. Хронологические ряды осредненных по территории Карелии годовой температуры воздуха, осадков, суммарного испарения, испаряемости и речного стока за период 1847-2000 гг. содержат значимые квазипериодические колебания с временными масштабами 4-6, 10-14 и 22-28 лет.

2. Структурная упорядоченность системы климата и водного баланса территории обуславливает согласованные колебания генетически связанных элементов (осадки - сток, температура воздуха - испаряемость - суммарное испарение).

3. Ряды годовой температуры воздуха, осадков, испаряемости и суммарного испарения за рассмотренный 154-летний период содержат положительные тренды. Вследствие более выраженной, чем у годовых осадков, положительной тенденции в рядах испаряемости и суммарного испарения динамический ряд речного стока содержит отрицательный тренд.

4. Коэффициенты вариации рядов температуры воздуха и речного стока не являются постоянными во времени; их выборочные значения нелинейно зависят от соответствующих выборочных средних. Изменения коэффициентов вариации происходят асинхронно по отношению к нормам, в периоды маловодья флуктуации годового стока возрастают.

5. Установлено, что для условий избыточного увлажнения ведущим метеорологическим фактором, определяющим знак и величину аккумуляционной составляющей водного баланса водосборов, является температура воздуха, ее вклад в общую дисперсию аккумуля-

ции составляет 53%, тогда как вклад годового количества осадков не превышает 20%.

6. При изменении глобального климата в соответствии с рассмотренными сценариями, существенных изменений структуры водного баланса территории Карелии в первой половине XXI не произойдет; среднемноголетние значения годовых осадков и суммарного испарения с водосборов возрастут на 1-2 и 10-13% соответственно; сохранится тенденция снижения суммарного речного стока и его норма уменьшится на 3-8%.

#### Основные публикации по теме диссертации:

1. Исследование локальных проявлений потепления климата на территории Карелии // Экологические исследования природных вод Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1999. С.17-21.
2. Водные ресурсы // Онежское озеро. Экологические проблемы. Петрозаводск: КНЦ РАН, 1999. С.15-22. (соавтор Карпечко В. А.)
3. Изменение климата, состояния водоемов и водосборов // Физические проблемы экологии (экологическая физика) Вып. № 6. М.: Физич. ф-т МГУ, 2001. С. 76-88. (соавторы Н. Н. Филатов, Л. Е. Назарова)
4. Изменение климата и водные ресурсы Восточной Финноскандии / Препринт докл. на засед. Презид. КарНЦ РАН 27 февраля 2001 г. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 36 с. (соавторы Л. Е. Назарова, Н. Н. Филатов).
5. Динамика и прогноз изменения климата Восточной Финноскандии // Гидроэкологические проблемы Карелии и использование водных ресурсов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2003. С. 33-40. (соавторы Н. Н. Филатов, Л. Е. Назарова, А. В. Семенов).
6. Perennial variations of water balance elements for the territory of Karelia // Finno-ugric world: State of nature and regional strategy of environmental protection. Abstr. of the Intern. Conf. June 2-5 1997. Syktyvkar: 1997. Pp. 155-156.
7. Water resources and climate changes in Eastern Fennoscandia (Karelia and Kola Peninsula) // Northern Research Basins. 13<sup>th</sup> Int. Symph. and Worksh.. Finnish Environ. Inst., 2001. Pp. 91-100. (соавторы Н. Н. Филатов, Л. Е. Назарова, А. В. Семенов)

8. Possible climate and water balance changes in Karelia (Russia) during the first half of the XXI century. / Large Rivers. J. Arch. Hydrobiol. Suppl., 2002. Vol. 13. No. 3-4 Pp. 341-352. (соавторы Л. Е. Назарова, Н. Н. Филатов).

*Paul*

Water Resour. Res. 2004, 40, W04101, doi:10.1029/2003WR018701  
© 2004 American Meteorological Society

Water Resour. Res. 2004, 40, W04101, doi:10.1029/2003WR018701  
© 2004 American Meteorological Society