

На правах рукописи

Назарова Лариса Евгеньевна

УДК 556.51:551.583 (282.247.211)

Изменчивость гидрологических характеристик
водосбора Онежского озера под влиянием
климатических воздействий

Специальность 25.00.27

Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата
географических наук

Санкт- Петербург
2008

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

Научные руководители: член-корреспондент РАН
Н.Н. Филатов
доктор физико-математических наук
С.А. Кондратьев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор К.В. Показеев
кандидат географических наук
Т.П. Гронская

Ведущая организация: Карельский государственный
педагогический Университет,
кафедра географии

Защита состоится 18 декабря 2008 г. в часов на заседании диссертационного совета Д 002.064.01 при Институте озероведения РАН по адресу: 196105, г. Санкт-Петербург, ул. Севастьянова, д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в Институте озероведения РАН

Автореферат разослан 17 ноября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к. в. н., доцент



В. Ю. Цветков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Данные наблюдений свидетельствуют, что с начала XX века происходят определенные изменения глобальной климатической системы. Региональные изменения приземной температуры воздуха в Карелии в целом отражают положительные тенденции изменения глобальной температуры в конце XX - начале XXI века. Однако, наблюдаемое потепление весьма неоднородно в пространстве. На уровне регионов обнаруживаются определенные особенности, отличные от глобальных. Своеобразие климата Карелии определяется влиянием большого числа водных объектов, расположенных на территории республики. Озерность территории составляет 12%, а с учетом карельских частей Онежского и Ладожского озер достигает 21%, являясь одной из самых высоких в мире.

Одно из первых обобщений данных о климате Карелии было сделано А.А. Романовым в 1961 г. Описанию климата отдельных регионов Карелии были посвящены работы «Климат Петрозаводска»(1982) и «Климат Сортавалы» (1988) (составлены в группе климата КГМО). Обобщение по климату Восточной Фенноскандии и влиянию его изменений на элементы водного баланса озер было сделано в 1987 г. (Филатов, 1997). Изменения климата последних 15-20 лет не нашли своего отражения в указанных исследованиях, хотя в это время во всем мире фиксируются наиболее значимые изменения в климато-гидрологических системах различного масштаба. До настоящего времени не уделялось должного внимания вопросу изучения и моделирования взаимосвязи климатических факторов и характеристик гидрологического режима для водоемов, расположенных на исследуемой территории. Всесторонний анализ изменений и изменчивости климато-гидрологической системы Онежского озера и его водосбора, занимающих значительную часть территории Карелии и играющих важную роль в социально-экономическом развитии региона, представляет собой актуальную задачу, поскольку при успешном ее решении будут установлены причины и масштабы уже происшедших и будущих изменений водной системы. Использование математических моделей позволит осуществлять оценку и прогноз возможных изменений гидрологического режима и состояния экосистем водных объектов, как при климатических, так и при антропогенных воздействиях, что явится научным обоснованием их рационального использования и охраны.

Цель и задачи работы. Основной целью данного исследования является выявление закономерностей изменчивости характеристик водного режима водосбора Онежского озера под влиянием изменения климата в регионе.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Выявить закономерности изменчивости климата в изучаемом регионе за 1950-2000 гг.,

2. Выполнить ретроспективную оценку уровня режима Онежского озера, характеристик его ледового режима и элементов водного баланса водосбора в результате происшедших в регионе климатических изменений.

3. Рассчитать возможное изменение температуры водной массы Онежского озера и годового стока с водосбора в соответствии с рассмотренными сценариями изменения климатических параметров (ЕСНАМ4/ОРУС3) на период до 2050 г.

4. Провести оценку возможного внутригодового перераспределения стока при условии реализации сценариев изменений характеристик климата (ЕСНАМ4/ОРУС3) на период до 2100 г.

Научная новизна:

В результате проведенного исследования получены следующие результаты, представляющие собой научную новизну.

1. Изучены особенности изменчивости и изменений основных характеристик климата Карелии в течение второй половины XX века и выявлены закономерности изменений характеристик ледового режима Онежского озера, элементов водного баланса водосбора под воздействием происшедших в регионе климатических изменений.

2. Впервые получены оценки возможных изменений термических характеристик Онежского озера и годового стока с водосбора в соответствии с рассмотренными сценариями потепления и похолодания климата на период до 2050 г.

3. Выполнена прогностическая оценка внутригодового перераспределения стока с водосбора при условии изменения климата на период до 2100 г.

Положения, выносимые на защиту:

1. Ретроспективная оценка изменчивости основных климатических параметров за 1950-2000 гг., свидетельствующая о неоднородности изменений климата во времени и в пространстве в изучаемом регионе.

2. Характеристики ледового режима Онежского озера и элементов водного баланса водосбора за 1950-2000 гг. в результате происшедших в регионе климатических изменений (возрастание безледоставного периода на озере, наличие положительных линейных трендов годовых температур воздуха, сумм атмосферных осадков, общего испарения и отсутствие линейного тренда в рядах речного стока).

3. Количественная оценка возможных изменений термических характеристик Онежского озера и годового стока с водосбора при условии реализации сценария изменения климатических параметров (ЕСНАМ4/ ОРУС3) на период до 2050 г.

4. Выявленные на основе проведенных расчетов особенности внутри-годового перераспределения стока в соответствии с рассмотренными сценариями возможных климатических изменений на период до 2100 г.

Апробация работы. Результаты исследований по теме диссертации были представлены на 15 научных конференциях, в том числе международных: «Поморье в Баренц-регионе на рубеже веков: экология, экономика, культура» (Архангельск, 2000 г.; в соавторстве с Ю.А. Сало), «Management of Northern River Basins» (Оулу, Финляндия, 2001 г.; в соавторстве с Н.Н. Филатовым и Ю.А. Сало), на XIII и XV международных симпозиумах «Северные речные бассейны» (Саариселькя, Финляндия, 2001 г.; в соавторстве с Н.Н. Филатовым, А.В. Семеновым и Ю.А. Сало; Лулеа, Швеция, 2005 г.; в соавторстве с Н.Н. Филатовым и Ю.А. Сало), на международных конференциях в Архангельске (2002, 2005, 2006 г.г.), Вологде (2005 г.), Томске (2003, 2004 г.; в соавторстве с Н.Н. Филатовым, Ю.А. Сало и др.), Петрозаводске (2005, 2006 г.г.), на IV международном Ладожском симпозиуме (Новгород, 2002 г.), VI Всероссийском гидрологическом съезде (СПб, 2004 г.). Результаты исследований были доложены и обсуждены на заседании Президиума Карельского научного центра РАН (2001 г.) и на заседаниях Ученого совета ИВПС КарНЦ РАН в 1999-2006 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 63 работы, (основные из них приведены в автореферате), в том числе 3 работы из перечня ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем работы - 182 страницы, содержит 69 рисунков, 19 таблиц и список использованной литературы из 158 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дается обоснование актуальности темы исследования, излагаются цели и задачи диссертационной работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена рассмотрению основных физико-географических особенностей территории Карелии. Территория Республики Карелия расположена между 60°40' с.ш. и 66°40' с.ш., 29°30' в.д. и 37°57' в.д., протяженность с севера на юг достигает 660 км. С запада на восток протяженность на широте г. Кемь составляет 424 км. Общая площадь республики 172,4 тыс. км².

В данной главе подробно рассматриваются геологическое строение, рельеф, особенности гидрографической сети Карелии. Общая протяженность водной сети Карелии 83 тыс.км. Основными элементами гидрографической сети являются озера и водохранилища, которых на территории республики насчитывается более 61 тысячи, суммарная площадь – около 18 тыс.км². Кроме того, в пределах республики находится около 50% акватории Ладожского и 80% - Онежского озер. Число рек также велико – 26,7 тысяч. Высокий процент озерности территории способствует формированию своеобразных климатических условий исследуемой территории. Карелия расположена в северо-западной части умеренного климатического пояса. Климатический режим республики можно охарактеризовать как переходный от морского к континентальному; по классификации Б.П.Алисова климат Карелии относится к атлантико-арктической зоне умеренного пояса, в течение года характерно преобладание воздушных масс атлантического и арктического происхождения. В среднем за год на территории Карелии, относящейся к зоне избыточного увлажнения, выпадает 550-750 мм осадков. Преобладают ветры южного, юго-западного и западного направлений. Средняя годовая температура воздуха изменяется от 0°С на севере до 3°С на юге. Самый холодный месяц – январь (-12-13°С в северной части, -9-10°С – в южной). Самый теплый месяц года - июль (14-15°С на севере и 16-17°С на всей остальной территории республики).

Вторая глава посвящена описанию материалов и основных методов исследования. Для анализа были использованы данные многолетних наблюдений на станциях и постах Северо-Западного, Северного и Мурманского территориальных управлений по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. База данных содержит сведения по 28 метеорологическим станциям Карелии за период наблюдений по 1999-2003 гг. по всем основным метеорологическим показателям, плотность пунктов наблюдения для Карелии составляет примерно 6200 км²/пункт. Также использованы данные наблюдений по 12 МС Мурманской области, западной части Архангельской и северной части Ленинградской областей. Восстановление пропусков и удлинение рядов выполнено по методу аналогии.

В качестве основного метода исследования процессов формирования водного режима и взаимосвязи, существующей между факторами, его определяющими, использован метод водного баланса. Для исследования структурных связей климатических характеристик и элементов водного баланса региона был выбран метод статистического анализа. Были исследованы пространственные и временные закономерности изменения гидрологических (уровень озера, поверхностные приток в озеро, продолжительность ледостава, даты вскрытия и замерзания озера) и метеорологических (температура воздуха и атмосферные осадки) элементов. Испол-

зовались корреляционный анализ (линейная и множественная регрессия), анализ автокорреляционных и спектральных функций временных рядов. Для изучения влияния процессов атмосферной циркуляции на режим озера привлекались данные об индексах Северо-Атлантического колебания. Для определения степени континентальности климата был использован метод расчета индексов континентальности по Горчинскому.

Расчет средней температуры воздуха и сумм осадков по месяцам был выполнен по данным инструментальных наблюдений за период 1950-2000 гг. Данный период был выбран неслучайно, поскольку именно в 1952-53 гг. произошло нарушение однородности рядов наблюдений над осадками, вызванное сменой измерительных приборов. Кроме того, как было показано Ц.А. Швер, для рядов атмосферных осадков при вычислении средних многолетних величин, средние значения становились постоянными, когда ряды данных наблюдений достигали 50 лет. Выполненный анализ позволил оценить тренды средних месячных и годовых значений температуры воздуха и сумм осадков для всех МС Карелии за указанный период времени и их значимость по критерию Стьюдента. Для расчета годовых значений температуры и осадков средних по водосбору Онежского озера в качестве расчетного использован метод тяготеющих площадей (полигонов Тиссена). Средняя по Карелии годовая температура воздуха за 1950-2000 гг. была рассчитана как среднее арифметическое из годовых температур по данным наблюдений 28 МС. Далее полученный ряд был удлинен до 1881 года по методу аналогий по данным наблюдений на МС Петрозаводск. Суммарная ошибка удлинения ряда составила $\pm 0,22^{\circ}\text{C}$. Затем, используя в качестве ряда-аналога ряд наблюдений за температурой воздуха на МС Санкт-Петербург (Ленинград) с 1752 до 1989 г., были реконструированы значения средней годовой температуры воздуха по территории Карелии в целом до 1752 г. Ошибка удлинения ряда в данном случае составила $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$.

По данным наблюдений гидрологической сети был оценен средне-взвешенный годовой сток трех основных речных систем (рек Шуя, Суна и Водла) за время наблюдений с 1946 по 2000 г. и установлена связь последнего с рассчитанным годовым притоком в Онежское озеро за период 1960-1975 гг. В результате расчетов получены соответствующие уравнения множественной регрессии, по которым был рассчитан ряд годового притока в Онежское озеро за период 1946-2000 гг.

Для оценки возможных изменений основных характеристик климата исследуемой территории и для расчетов термических характеристик Онежского озера и годового стока с водосбора использованы результаты численного моделирования на модели глобальной циркуляции атмосферы и океана ECHAM4/OPYC3, разработанной в Гамбургском Метеорологическом институте Макса Планка, Германия. Расчеты проводились по

двум сценариям изменения климата. В первом случае (в работе условно сценарий G) предполагается удвоение содержания углекислого и других парниковых газов в атмосфере Земли на период 2000-2100 гг., во втором (условно GA) сценарии дополнительно учитывается увеличение концентрации аэрозолей техногенного происхождения.

Для расчетов внутригодового перераспределения стока в соответствии с рассмотренными сценариями возможных климатических изменений на период до 2100 г. использовалась гидрологическая модель, разработанная в Институте озераведения РАН. (Кондратьев и др., 2007). Модель описывает накопление и таяние снега, увлажнение почв зоны аэрации, испарение с поверхности водосбора, формирование стока с разделением на быструю и медленную составляющие. В процессе моделирования водосбор представляется в виде однородной имитирующей емкости, накапливающей поступающую воду и затем постепенно ее отдающей. Шаг расчетов по времени составляет 1 месяц. Модель классифицируется, как концептуальная модель формирования стока с сосредоточенными параметрами (Кондратьев, 2007).

В третьей главе дается ретроспективная оценка изменчивости и изменений основных климатических параметров за 1950-2000 гг., а также изменений характеристик ледового режима Онежского озера и элементов водного баланса водосбора в результате происшедших в регионе климатических изменений.

Для нестационарных процессов, к которым относятся процессы изменения температуры воздуха, характерно постоянное изменение среднего значения, поэтому следует считать среднее значение (норму) функцией времени. В ряде работ (Груза и др., 2004; Мещерская и др., 2002) показано, что при изучении климатических временных рядов могут быть полезны методы и алгоритмы анализа с применением скользящих средних величин, которые можно рассматривать как некоторые «динамические климатические нормы». По мнению авторов, такие нормы могут лучше характеризовать текущий климат, чем стандартные. График на рис. 1 показывает, как с течением времени менялось значение климатической нормы годовой температуры воздуха в Карелии. Можно отметить довольно ровный временной ход средних многолетних величин в течение XIX века и значительный рост нормы с началом индустриального периода. В изменении средних многолетних величин годовой температуры воздуха, рассчитанных по скользящим 30-летиям, нашли отражение потепление 1930-х годов, похолодание 1960-70 гг. и повышение температуры воздуха с конца 1980-х гг., продолжающееся до настоящего времени. Согласно Ц.А. Швер (1984), изменение средних значений метеорологических параметров может быть связано «либо с

наличием сверхвековых колебаний, больших, чем фактическое число лет наблюдений, либо с реально быстрым изменением метеорологического режима в данном районе».

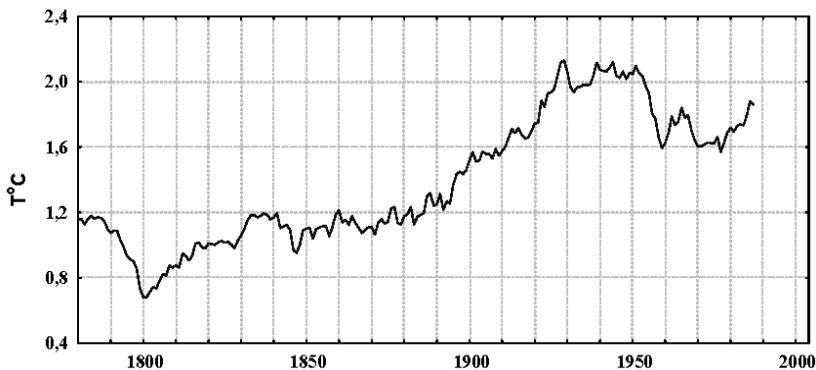


Рис. 1. Изменение нормы годовой температуры воздуха по скользящим 30-летиям для территории Карелии в целом за период 1752 -2000 гг. Значения нормы отнесены к середине периода.

Региональные изменения приземной температуры воздуха в исследуемом районе в целом отражают положительные тенденции изменения глобальной температуры в течение XX века. В среднем по Карелии общая тенденция изменения температуры приземного слоя воздуха составляет $+ 0.2^{\circ}\text{C}$ за 100 лет (1901-2000 гг.) и $+ 0.6^{\circ}\text{C}$ за 50 лет (1951-2000 гг.). Если рассматривать изменения температуры воздуха по месяцам, то тенденции будут не столь однозначны. Оценка направленных изменений приземной температуры воздуха (ее тренд) позволила сделать вывод, что наиболее четко положительный линейный тренд средней месячной температуры выражен в марте и составляет на разных станциях от 3.0 до 5.0°C за 50 лет. Причем только в этом месяце он значим по критерию Стьюдента на 95%-ном уровне на всех станциях. Апрель теплеет существенно медленнее, чем март (от 0.5 до $2.1^{\circ}\text{C}/50$ лет). Тенденции эти статистически незначимы, но также отмечаются на всех станциях. Тенденции к потеплению наблюдаются с января по май. В летний период и значительную часть осеннего сезона изменения температуры разнонаправленны и малы по абсолютной величине (меньше $1.7^{\circ}\text{C}/50$ лет). К ноябрю они повсеместно сменяются тенденцией к похолоданию на $0.4 - 1.1^{\circ}\text{C}/50$.

Анализ сезонных температур воздуха, выполненный нами по данным метеорологических станций, расположенных на севере европейской территории России (ЕТР), позволил выявить пространственно-временную дифференциацию тенденций изменения температуры по сезонам. Только весенняя температура воздуха имеет положительные тренды (до $+3.5^{\circ}\text{C}/50$ лет) по всей изучаемой территории (рис.2). Для остальных сезонов районы с положительными значениями трендов расположены, в основном, в южной части региона вблизи крупнейших озер Европы – Ладожского и Онежского.

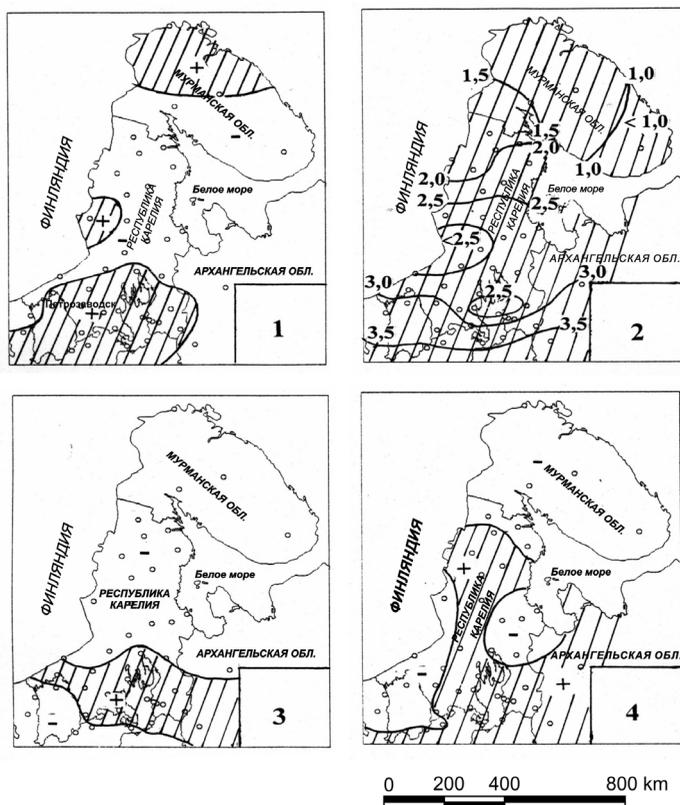


Рис. 2. Пространственное распределение зон положительного (+) и отрицательного (-) трендов сезонных температур воздуха на территории северо-запада России за период 1951-2000.

(1 – декабрь-февраль, 2 – март-май, 3 – июнь-август, 4 – сентябрь-ноябрь).

По данным о среднесуточной температуре воздуха за период времени с 1951 по 1995 г. для МС Кемь-порт (побережье Белого моря) и МС Петрозаводск (Онежское озеро) нами были рассчитаны даты устойчивого перехода температуры воздуха через определенные градации, т.е. были получены даты начала климатических сезонов года. В результате анализа полученных данных сделан вывод, что к середине 1990-х годов на территории Карельского побережья Белого моря и в районе водосбора Онежского озера не произошло смещение дат наступления климатических сезонов года. Только дата перехода через 0°C в сторону понижения (дата наступления холодного периода) сместилась с 25 на 31 октября в районе г. Кемь и с 1 на 4 ноября в районе г. Петрозаводск, в результате чего теплый период года увеличился на 6 и на 3 дня соответственно. Значительное мартовское потепление не повлияло на смещение средней многолетней даты наступления весеннего сезона – 7 апреля (Петрозаводск) и 20 апреля (Кемь) - (устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через 0°C в сторону повышения), но выразилось в изменении климатической нормы среднемесячной температуры воздуха с $-5,6$ до $-4,7$ на побережье Онежского озера и с $-7,3$ до $-6,2^{\circ}\text{C}$ на Карельском побережье Белого моря.

Анализ изменений количества осадков в Карелии за период 1951-2000 гг. позволяет сделать вывод о том, что, несмотря на разнонаправленность линейных трендов месячных сумм осадков в течение года, наблюдается рост годовых сумм осадков для всех районов республики за указанный период. Тенденция к увеличению количества осадков отмечается на всех станциях в период с октября по апрель. С мая по сентябрь по данным метеостанций в различных районах Карелии отмечается как увеличение, так и уменьшение сумм осадков за месяц. Для территории Карелии в целом увеличение годового количества выпадающих атмосферных осадков составляет 20 мм/100 лет.

В работе выявлены тенденции современных изменений климата на водосборе Онежского озера и оценено их возможное воздействие на гидрологический режим водоема. Анализ основных тенденций в долгосрочных климатических и гидрологических временных рядах по территории водосбора Онежского озера с 1950 по 2000 г. выявил наличие положительных линейных трендов годовых температур воздуха, сумм атмосферных осадков, общего испарения и отсутствие линейного тренда в рядах речного стока.

Далее рассматриваются особенности гидрологического режима Онежского озера. Процессы, происходящие в экосистемах крупнейших озер Европы, вызывают особый интерес, поскольку они отражают происходящие климатические изменения. Исследованию закономерностей межгодовых колебаний уровня озер, стока рек, изучению изменений климата и

их воздействий на озера посвящены работы И.В. Молчанова, А.Н. Афанасьева, Г.П. Калинина, А.В. Шнитникова, Т.И. Малининой, М.Д. Масановой и И.В. Филатовой, О.А. Дроздова, И.П. Дружинина, В.Е. Привальского, В.Н. Адаменко, Д.Я. Ратковича, М.Г. Хубляряна, А.М. Догановского и Н.В. Мякишевой, Ю.А. Трапезникова, А.С. Григорьева, Н.Н. Филатова, Т.П. Гронской и Н.А. Лемешко и других авторов.

До начала 1950-х гг., когда Онежское озеро было зарегулировано, тенденции изменения уровня для Ладожского и Онежского озер были одинаковыми. После превращения озера в Верхне-Свирское водохранилище (1953 г.) для его уровня стало характерно повышение, для Ладожского озера среднее значение уровня было ниже нормы. Начиная с 90-х годов XX века тенденция падения уровня наметилась и для Онежского озера. Однако если мы уберем из значений уровня Онежского озера антропогенную составляющую, то получим согласованный ход колебаний уровня озер. В данной главе подробно рассматриваются характеристики уровня озера.

Кроме констатации факта изменчивости климатических характеристик важно определить и причины, их вызывающие. Погода и климат Северной Европы определяются преимущественно характером атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой, представленной двумя системами низкого и высокого атмосферного давления – Исландский минимум и Азорский максимум. Стандартизированная разность атмосферного давления между этими центрами действия атмосферы характеризуется индексом Северо-Атлантического колебания (САК или NAO- North Atlantic Oscillations). Индекс NAO отражает интенсивность динамики циркуляции атмосферы.

В работе рассмотрены особенности изменчивости индекса NAO и параметров, характеризующих изменчивость климата в Карелии. Проведенный корреляционный анализ показал, что для рядов значений индекса NAO и температуры воздуха над Онежским озером средний коэффициент корреляции 0.53, однако в отдельные периоды времени отмечены коэффициенты от 0.16 до 0.76. Колебания уровня озер и NAO имеют общую низкую корреляцию, коэффициенты от -0.19 до 0.33. Низкую корреляцию со значениями NAO также имеют величины продолжительности безледного периода на Онежском озере.

Изменение термического режима в исследуемом районе проявляется в увеличении продолжительности безледного периода на Онежском озере. Анализ данных о датах начала и окончания ледостава на Онежском озере за период с 1884 по 1998 год показал, что к концу XX века число дней, когда озеро свободно от ледяного покрова возросло в среднем с 217 до 225 дней. Увеличение продолжительности безледоставного периода для Онежского

озера произошло из-за весеннего смещения дат вскрытия ледового покрова на 8 дней раньше. Для сроков наступления ледовых фаз установлено, что при достижении суммы отрицательных температур воздуха 280-450°C в зависимости от интенсивности процесса охлаждения воздуха и волнения происходит замерзание всей акватории озера. Для сравнения – Ладожское озеро замерзает полностью при сумме отрицательных температур воздуха 700°C (Догановский и др., 2000). Сумма положительных температур воздуха, необходимых для начала процесса вскрытия озера составляет 50-80°C. Период весеннего дрейфа льда продолжается в среднем 2-12 суток.

Анализ среднемесячной температуры воздуха в весенние и осенние месяцы, дат начала разрушения и установления ледового покрова на Онежском озере и значений индекса NAO, характеризующих интенсивность циклонической деятельности, за эти же месяцы показал, что температура апреля объясняет 32% дисперсии ряда времени начала разрушения ледостава, в то время, как значения индекса NAO в мае, имеющие наибольший коэффициент корреляции с датами вскрытия озера, объясняют лишь 16%. В основном корреляция между среднемесячной температурой воздуха и индексами NAO соответствующих месяцев слабая (в отличие от годовых значений), за исключением марта ($r=0,49$). На время установления ледостава на Онежском озере наибольшее влияние оказывает температура декабря, влияние температуры других месяцев и индексов NAO весьма незначительно или не было выявлено в результате исследований с использованием линейной корреляции, поскольку все связи в климатической системе не только прямые и обратные, но и нелинейные, и опосредованные.

Были получены зависимости между датами установления и разрушения ледостава на Онежском озере и температурой воздуха в весенние и осенние месяцы и индексами NAO за эти же месяцы. Для дат окончания ледостава уравнение множественной регрессии было получено в следующем виде:

$$D_{\text{разр}}=40,8+1,44NAO_{\text{III}}+0,992NAO_{\text{IV}}+1,19NAO_{\text{V}}-0,877T_{\text{III}}-2,17T_{\text{IV}}-1,72T_{\text{V}} \quad (2)$$

$$R=0,75, \delta=\pm 7 \text{ дней}, N=31 \text{ год.}$$

Если в уравнении использовать только среднюю месячную температуру воздуха марта-мая, коэффициент множественной регрессии уменьшается до 0,68, что приводит к уменьшению процента объясненной дисперсии с 56 до 46 %.

Для расчета времени установления ледового покрова на Онежском озере уравнение множественной регрессии имеет следующий вид:

$$D_{\text{уст}}=93,5+0,444NAO_{\text{X}}+0,398NAO_{\text{XI}}-0,532NAO_{\text{XII}}+0,851T_{\text{X}}+1,43T_{\text{XI}}+2,42T_{\text{XII}} \quad (3)$$

$$R=0,68; \delta=\pm 7 \text{ дней}; N=30 \text{ лет.}$$

Поскольку Онежское озеро фактически является водохранилищем, а уровень воды в водохранилищах регулируется, то в качестве климато-зависимого элемента был исследован приток воды в озеро. Поступление речной воды в Онежское озеро формируется, главным образом, стоком рек Шуя, Суна и Водла (в среднем около 60 % всего притока в озеро). Речной сток поступает с водосборной площади размером 66 284 км² (в естественном состоянии площадь бассейна Онежского озера с учетом самого озера составляла 62 800 км²).

Для оценки влияния изменения климата на речной сток с водосбора была установлена связь между речным стоком и климатическими характеристиками. Для годовых интервалов уравнение водного баланса было рассмотрено в виде:

$$P - R - E[P, E_0(T)] \pm W = 0 \quad (4)$$

где P – суммы атмосферных осадков, мм; R – общий речной сток, мм; E – суммарное испарение с водосбора (эвапотранспирация); E_0 – испаряемость, мм; W – остаточный член уравнения, объединяющий аккумуляционные и неучтенные составляющие годового баланса, а также погрешности расчета всех характеристик.

Для расчета суммарного испарения для речных водосборов была использована формула Э.М. Ольдекопа

$$E = E_0 \cdot \tanh (P/E_0) \quad (5)$$

в которой испаряемость E_0 рассчитывалась по формуле, полученной для территории Карелии Ю.А. Сало (2003):

$$E_0 = 239 + 62T + 2,14T^2 \quad (6)$$

Далее была установлена зависимость W от средней по водосбору годовой температуры воздуха и годовых сумм атмосферных осадков, коэффициенты парной корреляции равны $-0,81$ и $+0,59$ соответственно. Квазиньютоновским методом была получена формула

$$W = -211 + 0,38P - 46,04T \quad (7)$$

Коэффициент множественной корреляции полученной зависимости равен $0,80$, стандартная ошибка расчета по формуле составила $5,7\%$. Полученная формула для водосбора Онежского озера может быть использована для расчета параметра, объединяющего аккумуляционные и неучтенные составляющие годового баланса, используя ряды годовой температуры воздуха и годовых сумм осадков. Данная формула позволяет корректно замкнуть уравнение водного баланса водосбора.

На рис. 3 представлены значения суммарного притока в Онежское озеро по данным многолетних наблюдений за 1950-2000 гг. и результаты расчета суммарного притока в водоем, выполненные по формулам. Как следует из приведенных графиков, полученные расчетные результаты хорошо соответствуют измеренным величинам. Коэффициент корреляции составляет 0,83, средняя ошибка расчета 10%.

В дальнейшем указанная схема вычисления была использована при работе с модельными данными.

В результате спектрального анализа рядов годовых значений температуры воздуха, сумм атмосферных осадков, испарения и речного стока для территории водосбора Онежского озера за период 1950-2000 гг., были выявлены квазипериодические компоненты и оценена их значимость. Функции спектральной плотности рядов годовой температуры воздуха и испарения имеют максимумы, соответствующие временным масштабам около 10 лет (при уровне значимости $\sigma = 5\%$), в рядах осадков и речного стока выделены согласованные и значимые ($\sigma = 5\%$) 4-5-летние квазипериодические составляющие. В спектре колебаний уровня Онежского озера (ряд с 1881 по 2000 г.) отмечаются составляющие с временными масштабами порядка 30 и 6-7 лет (соответствуют частотам $0,032$ и $0,164$ Год^{-1}), вклад которых в общую изменчивость составляет около 40%.

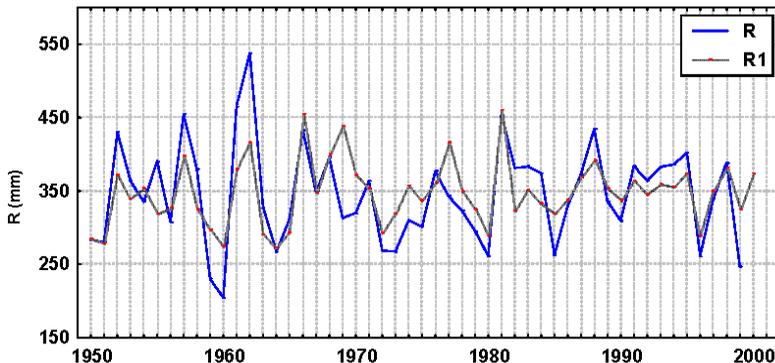


Рис. 3. Суммарный приток в Онежское озеро по данным наблюдений за 1950-2000 гг. (R) и рассчитанный по формулам (4-7) (R1).

В четвертой главе выполнена количественная оценка возможных изменения термических характеристик Онежского озера и годового стока с водосбора при условии реализации сценариев изменения климатических параметров (ЕСНАМ4/ ОРУС3) на период до 2050 г.

Для оценки реакции климатической системы и водных ресурсов на возможные изменения климата в работе были использованы результаты численного моделирования на модели глобальной циркуляции атмосферы и океана, разработанной в Метеорологическом институте Макса Планка, Германия.

Анализ полученных модельных данных позволил сделать следующие выводы

В районе водосбора Онежского озера в течение 2001-2050 гг. возможно увеличение температуры воздуха на 0,5 – 1,7 °С. Увеличение норм годовых значений суммарного испарения может составить от 20 мм (сценарий GA) до 80 мм (сценарий G). Характер изменения годовых сумм атмосферных осадков различен по двум сценариям. Согласно сценарию G возможно увеличение годовых осадков на 40 мм, сценарий GA предсказывает уменьшение количества осадков приблизительно на 10 мм. В результате этого величина притока в Онежское озеро изменится весьма незначительно, в пределах точности измерения (вычисления) притока (табл.1 и рис.5).

Таблица 1

Возможные изменения средних многолетних значений температуры воздуха и ЭВБ водосбора Онежского озера

Характеристика	Период	Среднее за период	Возможные изменения по сравнению с 1951-2000 гг.
Температура воздуха, °С	1951-2000	2,3 ± 0,2	
	2001-2050, сценарий G	4,0 ± 0,3	+ 1,7
	2001-2050, сценарий GA	2,8 ± 0,3	+ 0,5
Осадки, мм	1951-2000	744 ± 25	
	2001-2050, сценарий G	783 ± 17	+ 39
	2001-2050, сценарий GA	735 ± 12	- 9
Суммарное испарение, мм	1951-2000	434 ± 13	
	2001-2050, сценарий G	516 ± 17	+ 82
	2001-2050, сценарий GA	453 ± 9	+ 19
Речной сток, мм	1951-2000	346 ± 14	
	2001-2050, сценарий G	351 ± 7	+ 5
	2001-2050, сценарий GA	335 ± 7	- 11

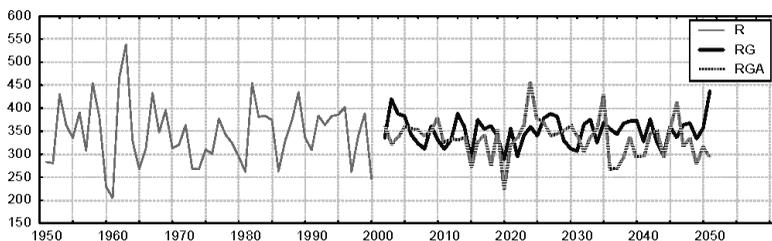


Рис. 5. Фактические (данные наблюдений до 2001 г.) и модельные ряды суммарного притока в Онежское озеро.

Для территории Карелии были рассчитаны индексы континентальности климата по Грочинскому по данным за период 1951-2000 гг. и на перспективу до 2050 г. и построена карта-схема расположения районов с переходным и континентальным климатом в настоящее время и при возможных климатических изменениях в регионе. В новых климатических условиях переходный к морскому климат сохранится лишь в районах, прилегающих к крупным водоемам (Белому морю, Ладожскому и Онежскому озерам).

При увеличении температуры воздуха возрастет температура воды озера. Для оценки возможных изменений среднемесячной температуры водной массы Онежского озера была установлена связь среднемесячных значений температуры водной массы со средневзвешенной температурой воздуха над акваторией Онежского озера. В результате проведенного анализа установлено, что увеличение средней годовой температуры водной массы Онежского озера по данным модели ЕСНАМ4-ОРУС3 может составить от +0.6 до +0.8°C по различным сценариям.

Кроме «парниковых» сценариев модели ЕСНАМ-4 для оценки влияния изменения климата на речной приток в Онежское озеро были использованы гипотетические сценарии изменения температуры воздуха и атмосферных осадков (увеличение и уменьшения температуры воздуха на 1-2 °C при увеличении и уменьшении количества осадков на 10-20 %). Результаты расчетов приведены на рис. 6. При увеличении температуры воздуха на 1°C суммарный приток в Онежское озеро может остаться неизменным при увеличении годовой суммы осадков приблизительно на 3%, а в случае потепления на 2°C – при увеличении их примерно на 6%. При уменьшении среднегодовой температуры воздуха на водосборе Онежского озера на 1°C речной сток в озеро не изменится при условии уменьшения годовой суммы осадков примерно на 3 %, а в случае похолодания на 2 °C – при уменьшении их примерно на 7 %.

В пятой главе на основе анализа результатов математического моделирования водного режима водосбора Онежского озера выявлены особенности внутригодового перераспределения стока в соответствии с рассмотренными сценариями возможных климатических изменений на период до 2100 г.

В качестве инструмента для расчетов с шагом по времени один месяц стока с водосбора Онежского озера при изменяющихся климатических параметрах использовалась гидрологическая модель, разработанная в Институте озероведения РАН и верифицированная на ряде водосборов бассейна Ладожского озера (Кондратьев, 1990; Кондратьев, Бовыкин, 2000, 2003; Кондратьев, Шмакова, 2005). Модель описывает накопление и таяние снега, увлажнение почв зоны аэрации, испарение с поверхности водосбора, формирование стока с разделением на быструю и медленную составляющие. Дополнительная верификация модели проведена по данным измерений расходов воды в

закрывающем створе реки Шуя, имеющей площадь водосбора 9 560 км² и озерность 10 %. На рис. 7 приведены результаты расчетов гидрографа стока для указанной реки, выполненные с шагом по времени 1 месяц и подтверждающие адекватность выбранной гидрологической модели изучаемым процессам формирования стока на водосборе Онежского озера.

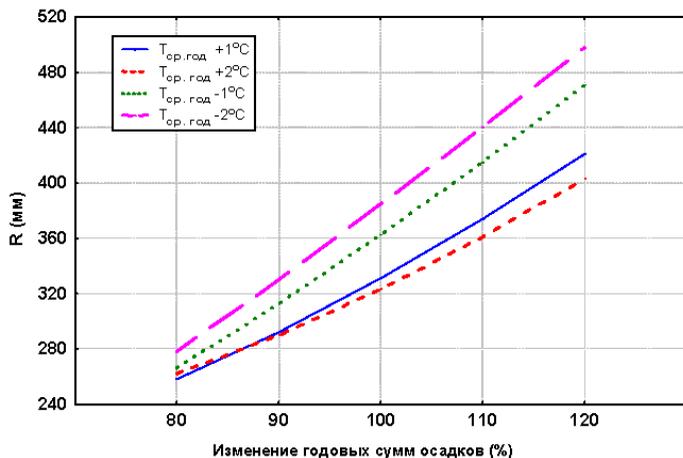


Рис. 6. Изменения притока в озеро при разных сценариях (потепление и похолодание) изменения климата. (100% - количество выпадающих на водосбор атмосферных осадков при существующих условиях).

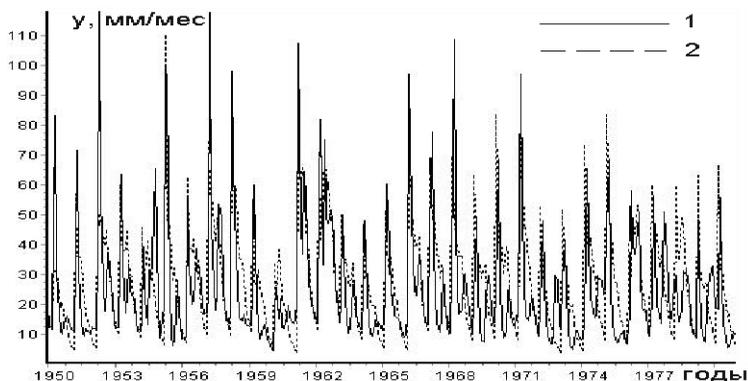


Рис. 7. Измеренные (1) и рассчитанные по гидрологической модели ИО РАН (2) значения слоя стока y (мм/мес) в замыкающем створе реки Шуя.

Общая тенденция увеличения годовой температуры воздуха будет сохраняться в течение XXI века. Годовая температура воздуха возрастет к 2050 г. от 1,6 до 2,7-3,0°C в среднем по Карелии. В будущем наибольшее потепление возможно в осенние и зимние месяцы. Годовые суммы осадков для территории Карелии возрастут в течение первой половины XXI века от 580 до 610-635 мм. В это же время возможно существенное внутригодичное перераспределение осадков. До 30 % возрастут осенние и зимние осадки. Весенние осадки практически не изменятся, а уменьшение летних осадков достигнет 18 % по отношению к периоду тестирования модели. В новых климатических условиях возможно смещение годовых изотерм и изогет в северном направлении.

Выполненные на основе гидрологической модели расчеты позволяют оценить изменения как межгодовой, так и внутригодичной динамики гидрологических характеристик изучаемого водосбора (водного эквивалента снежного покрова, испарения, увлажнения почв зоны аэрации, стока) с учетом возможного потепления в совокупности с изменением осадков в 21 веке. Внутригодичные изменения значений суммарного зимнего снегозапаса X , летнего увлажнения почв зоны аэрации W_s и слоя стока с водосбора Y в результате предполагаемых изменений климата проиллюстрированы на рис. 8-10.

Возможное возникновение положительных температур воздуха в ноябре приведет к тому, что выпадающие осадки не будут формировать снежный покров в осенний период, как это было в период 1951-2000, а пойдут на увлажнение почвы и формирование стока. Сокращение продолжительности холодного периода с отрицательными температурами воздуха приводит к сокращению сроков накопления снегозапасов и снижению их значений, несмотря на увеличение зимних осадков (рис. 8). Если в период инструментальных наблюдений значения максимальных снегозапасов на водосборе составляли около 190 мм водного эквивалента, то по результатам расчетов следует ожидать их уменьшения до 146 мм в 2051 – 2100 гг., т. е. на 23% по отношению к исходному периоду.

Снижение летних осадков в совокупности с возрастанием температуры воздуха и испарения, возможно, приведет к снижению значений влажности почв на водосборе Онежского озера в летний период 2001 – 2050 и 2051 – 2100 гг., соответственно, на 5 и 12 % по отношению к интервалу времени 1951-2000.

Можно также предположить, что к концу 21 века произойдет смещение максимальных расходов весеннего половодья в более ранний период (рис.10) за счет предполагаемого потепления. Существенное увеличение суммарного испарения в теплый период года приведет к

снижению меженных расходов до 20% по отношению к исходному периоду и, возможно, к небольшому снижению (до 5 %) суммарного годового стока на изучаемой территории.

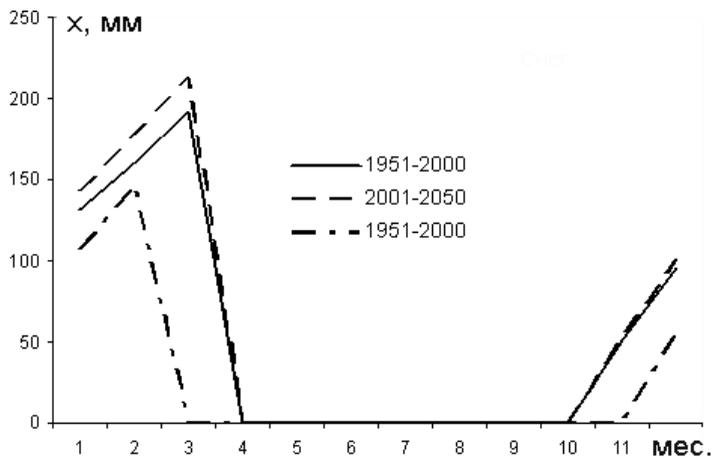


Рис. 8. Суммарный снегозапас X (мм водного эквивалента) на водосборе Онежского озера, рассчитанный по осредненным данным об осадках и температуре воздуха для интервалов 1951-2000, 2001-2050 и 2051-2100 гг.

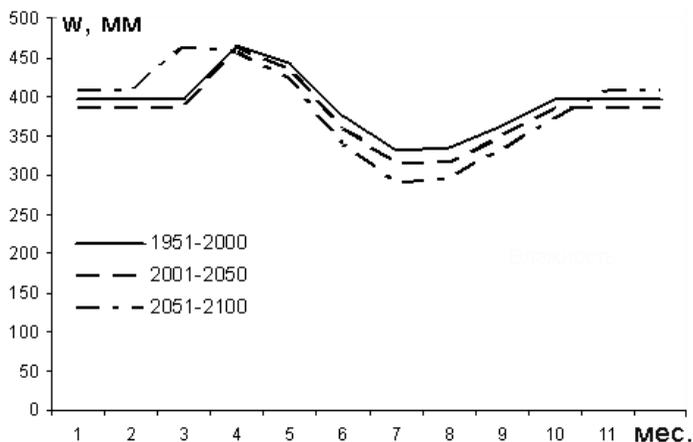


Рис. 9. Влажность почв зоны аэрации W ($L=1.5$ м) водосбора Онежского озера, рассчитанная по осредненным данным об осадках и температуре воздуха для интервалов 1951-2000, 2001-2050 и 2051-2100 гг.

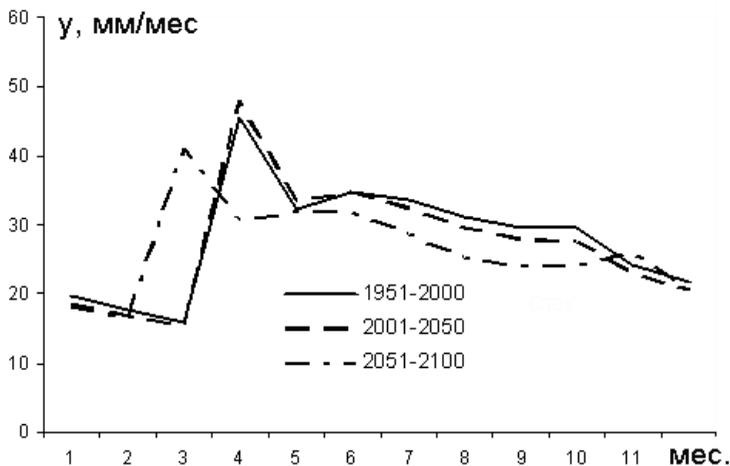


Рис. 10. Слой стока Y с водосбора Онежского озера, рассчитанный по усредненным данным об осадках и температуре воздуха для интервалов 1951-2000, 2001-2050 и 2051-2100 гг.

Изменение климата, возможное его потепление как за счет антропогенного накопления парниковых газов, так и при естественных его флуктуациях приводит к изменениям водных и наземных экосистем. Повышение температуры воздуха приведет к сокращению площади льдов, что уменьшит альбедо подстилающей поверхности и увеличит количество поглощенной коротковолновой радиации, будет способствовать дополнительному росту температуры и дальнейшему разрушению ледяного покрова. Уменьшение площади ледяного покрова приведет к перестройке поля температуры приземного слоя воздуха, что повлияет на биоту. При увеличении температуры воздуха повысится температура воды озер, более интенсивной станет динамика водных масс. Изменится и режим поверхностных вод. Колебания во времени количества осадков приведут к вариациям стока, времени наступления и интенсивности паводков, температуры воды озер, испарения и, в конечном итоге, повлияют на экосистему в целом. При сокращении периода существования снежного покрова на водосборах возрастет эрозия почв. Изменение водного баланса, уровня озер приведет к необходимости скорректировать водохозяйственную деятельность. Изменения могут иметь для экономики и населения как положительные, так и отрицательные последствия. Уменьшение притока речных вод и понижение уровня озер приводят в основном к негативным последствиям. Как правило, это связано с ухудшением обеспечения населения водой и ухудшением экологического

состояния водоемов. Увеличение речного стока и повышение уровня воды в озерах могут иметь и положительные, и отрицательные последствия. Для обеспечения водой населения, гидроэнергетики, сельского хозяйства южных регионов России в большинстве случаев это может быть благоприятно. Однако, увеличенный приток воды в водоемы может приводить к затоплению населенных пунктов, сельскохозяйственных угодий, эрозии берегов, заболачиванию почвенного покрова и т.д. Изменения климатического и водного режима потребуют изменения в управлении водохозяйственными системами и отраслями экономики, базирующимися на использовании водных ресурсов (гидроэнергетика, промышленное и коммунальное водоснабжение, сельское хозяйство и д.т.).

Основные выводы и результаты, полученные в результате проведенных исследований можно сформулировать следующим образом:

1. Анализ многолетней изменчивости основных характеристик климата показал, что для территории водосбора Онежского озера за период 1951-2000 гг. характерны повышение годовой температуры воздуха на $0,9^{\circ}\text{C}$, общего испарения 40-50 мм, сумм атмосферных осадков на 45 мм. Рост годовых сумм осадков компенсируется ростом общего испарения, в результате чего линейный тренд в ряде суммарного речного притока в озеро отсутствует.

2. Изменение термического режима в исследуемом районе проявляется в увеличении продолжительности безледного периода на Онежском озере. К концу XX века число дней, когда озеро свободно от ледяного покрова возросло в среднем с 217 до 225 дней. Выявлено влияние интенсивности Северо-Атлантического колебания на даты установления и разрушения ледового покрова на Онежском озере.

3. Расчеты термических характеристик Онежского озера и годового стока с водосбора при условии реализации сценария ЕСНАМ4/ОРУС3 показали, что к 2050 г. в Карелии возможно повышение годовой температуры воздуха на $0,5-1,7^{\circ}\text{C}$, рост суммарного испарения на 5-18 %, увеличение сумм осадков может составить до 5%. При этом изменение годового речного стока в Онежское озеро незначительно (1-4%). Температура водной массы Онежского озера может увеличиться на $0,6-0,8^{\circ}\text{C}$. Степень континентальности климата Карелии возрастет по сравнению с настоящим временем.

4. Результаты математического моделирования стока с водосбора с учетом внутригодовой изменчивости входных величин и параметров позволяют предположить, что к концу 21 века произойдет смещение максимальных расходов весеннего половодья в более ранний период. Сократятся период снегонакопления и суммарный зимний снеготоплив (на 23 %

к 2051 – 2100 гг.). Увеличение испарения в теплый период года, возможно, приведет к снижению меженных расходов до 20% по отношению к исходному периоду и к небольшому снижению (до 5 %) суммарного годового стока на изучаемой территории.

Основные публикации по теме диссертации:

1. Многолетние изменения температуры воздуха в Карелии // География и природные ресурсы, № 3, 2008. С. 75-79.

2. Региональный климат: возможные сценарии изменения климата Карелии. Похолодание или потепление? // Изв. РГО, Т. 139., Вып.3, С-Пб, 2007. С. 72-79. (соавторы Н.Н. Филатов, Ю.А. Сало).

3. Водный режим водосбора Онежского озера под воздействием изменений климата // Изв. РГО, Т. 140., Вып. 3, С-Пб, 2008. С. 21-26. (соавторы С.А. Кондратьев, И.В. Бовыкин, М.В. Шамова, Е.Г. Маркова).

4. Изменение температурного режима Карельского побережья Белого моря // Экологическое состояние континентальных водоемов северных территорий. С-Пб, Наука, 2005. С. 148-153.

5. Возможные изменения климата и элементов водного баланса территории Карелии в 2001-2005 гг. // Климат Карелии: изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. С. 88-101. (соавтор Ю.А. Сало).

6. Изменения климата, состояния водоемов и водосборов // Физические проблемы экологии (экологическая физика) Вып. № 6. М.: Физич. ф-т МГУ, 2001. С.75-88. (соавторы Н.Н. Филатов, Ю.А. Сало).

7. Изменение климата и водные ресурсы Восточной Фенноскандии / Препринт доклада на засед. Презид. КарНЦ РАН 27 февр. 2001 г. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2001. 36 с. (соавторы Н.Н. Филатов, Ю.А. Сало).

8. Water resources and climate changes in Eastern Fennoscandia (Karelia and Kola peninsula) // Northern Research Basins. 13th Int. Symp. and Workshop. Finnish Environ. Inst., 2001. Pp. 91-100. (соавторы Н.Н. Филатов, Ю.А. Сало, А.В. Семенов).

9. 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 Н.Н. Филатов, Ю.А. Сало).

10. Regional change analysis: north-western Russia. In : Bobylev L.P., Kondratyev K.Ya. and Johannessen O.M. (ed.), Arctic Environment Variability in the Context of Global Change. Praxis Publishing Ltd, Springer, UK, 2004. Pp. 391-411. (соавторы Н.Н. Филатов, С.П. Гриппа, Ю.А. Сало).

11. Climate of the White Sea catchment and scenarios of climate and runoff changes // White Sea. Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change. Springer, 2005. Pp. 53-73. (соавторы Н.Н. Филатов, Ю.А. Сало).

Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Гарнитура «Times».
Уч.-изд. л. 1,1. Усл. печ. л. 1,4. Подписано в печать 14.11.08.
Тираж 100 экз. Изд. № 130. Заказ № 761.

Карельский научный центр РАН
Редакционно-издательский отдел
185003, Петрозаводск, пр. А. Невского, 50

