

## III. Современное изменение климата Арктики

УДК 551.583:556.5(470.2)

# Изменения и изменчивость климата европейского Севера России и их влияние на водные объекты

*Н.Н. Филатов*, член-корреспондент РАН,*Л.Е. Назарова, А.П. Георгиев,*

ФГБНУ Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск,

*А.В. Семенов, А.Р. Анциферова, В.Н. Ожигина,*

ФГБУ Мурманское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, Мурманск,

*М.И. Богдан,*

Отдел гидрологических и морских ледовых прогнозов ФГБУ

Санкт-Петербургского Центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями, Санкт-Петербург

*В работе рассмотрены закономерности изменения климата и оценено возможное влияние этих изменений на некоторые характеристики гидрологического режима и биоты водоемов Севера Европейской территории России от умеренных широт до Арктики. Показаны общие закономерности и отличия климатических условий.*

## Введение

**Н**аибольшее внимание в течение последних 30 лет в проблеме изучения климата уделялось Арктике. За эти годы выполнены многочисленные исследования и выявлен ряд закономерностей, показаны региональные отличия влияния изменений климата на Арктику, Субарктику и умеренные широты (Кобышева и др., 2008; Стратегический прогноз изменений климата, 2005; Arctic Environment Variability, 2003). До сих пор дискуссионными остаются вопросы о причинах потепления климата и глобальном потеплении, а также трактовка обнаруженной изменчивости с разной квазипериодичностью от нескольких до 60 лет (Монин, Сонечкин, 2005; Фролов и др., 2010). При этом отметим, что на Севере Европейской терри-

тории России (ЕТР) наиболее длительные и надежные измерения климатических параметров, гидрологического режима, биотических характеристик имеются на гидрометеостанциях от Санкт-Петербурга до Архангельска и Мурманска. Тщательное изучение последствий изменения климата в этом регионе представляет несомненный практический интерес для оценки возможных оценок ущербов водным объектам, биоресурсам, экономике, здоровью населения. Важно оценить влияние изменений климата на водные объекты ЕТР с учетом перспектив развития Северного морского пути и водных путей, связывающих Арктику с такими важными транспортными артериями, как Беломорско-Балтийский, Волго-Балтийский, Северо-Двинский каналы. В настоящей работе рассмотрим особенности изменений и измен-

чивости климата, оценим неоднородности этих изменений в рассматриваемом регионе и покажем влияние этих климатических изменений на биоту и гидрологический режим водоемов разного размера, генезиса и формы, находящихся в разных физико-географических условиях от широты 60° с.ш. (Санкт-Петербург) до побережья Арктики (ст. Мурманск, Канин Нос). Для России детализированные по регионам оценки наблюдаемых и предполагаемых изменений климата особо важны, поскольку из-за значительных природно-обусловленных различий климата на ее территории изменения климата в регионах проявляются крайне неравномерно (Водные ресурсы России, 2008; Груза и др., 2008; Оценочный доклад, 2008).

Физико-географические и климатические особенности рассматриваемого региона неоднородны. Климат исследуемой территории можно охарактеризовать как субарктический морской, имеющий черты континентального в Мурманской и северо-западной части Архангельской областей, и переходный от морского к континентальному на территории Карелии и Ленинградской области (Климат Карелии, 2004). Характерной особенностью климата региона является частая смена воздушных масс, формирующихся, в основном, над Атлантикой и Арктикой. Сложные физико-географические условия региона с наличием значительных по площади крупных водоемов — Финского залива, Ладожского и Онежского озер, Белого и Баренцева морей, разветвленной сетью озерно-речных систем, разнообразием форм рельефа региона от зоны тайги до тундры обуславливают неоднородную картину климата региона. Все реки региона в зависимости от рельефа и других географических особенностей можно разделить на три основные группы: полуравнинные, озерного типа и горные (Водные ресурсы, 2008).

В последние годы важность тщательного изучения этого региона очевидна в связи с возрастанием интереса к освоению арктических ресурсов, предполагаемой интенсификацией использования Северного морского пути, что скажется и на формировании политической, экономической, социальной, научной деятельности. Это перспективы развития ледокольного флота, техники и технологий поиска углеводородов, планирования экономической деятельности в зоне вечной мерзлоты и др.

Изменение климата в большинстве западных и многих российских исследованиях ассоциировалось с глобальным потеплением, имеющим антропогенную природу (см. например, отчеты IPCC, 2008, публикации, например, Arctic Environment Variability, 2003). Однако высказывались и опреде-

ленные сомнения в правильности указанной выше гипотезы (Кондратьев, 2004). Инструментальные данные наблюдений свидетельствуют о наличии некоторых тенденций роста и падения температуры приземного воздуха в Арктике с цикличностью несколько десятков лет, которые не воспроизводятся в рамках численного моделирования климата (Алексеев и др., 2010; Панин, 2010; Котляков, 2010). Данные температурных изменений, полученные по результатам анализа донных отложений озер Арктики и Субарктики, свидетельствуют о квазипериодической природе изменения температуры в Арктике в XX – начале XXI столетий с наличием многолетних циклов продолжительностью порядка 200 лет (Большаянов и др. 2009; Фролов и др., 2009). На этом основании авторами указанных работ делается вывод о том, что наблюдаемое потепление в Арктике обусловлено естественными, а не антропогенными факторами, имеющими крупномасштабную изменчивость с временными масштабами десятки-сотни лет. Ранее выполненный анализ данных наблюдений в умеренных и полярных широтах позволил выделить несколько квазипериодических компонент, имеющих временные масштабы около 60-ти, 30-ти, 10-ти лет, при этом отмечалась разная интенсивность этих колебаний в умеренных широтах и в Арктике. Причем для современных изменений приземной температуры воздуха (ПТВ) характерен 60-летний цикл, наиболее ярко проявляющийся в Арктике в виде чередования теплых и холодных эпох (Алексеев и др., 2010). В качестве альтернативы «парниковой теории» в понимании основных причин климатических изменений XX–начала XXI вв. – воздействие на атмосферу Земли изменений общей лучистой энергии Солнца (Гудкович и др., 2009). В ряде работ ААНИИ не подтверждается гипотеза о «полярном усилении» в изменчивости характеристик погоды и климата с широтой, к тому же отмечается, что время начала и окончания похолодания значительно отличаются в различных частях Арктики, а эти изменения ПТВ носят во времени полициклический характер, имеют региональные особенности (Фролов и др., 2010).

### Материалы и методы

Для выявления региональных закономерностей изменений климата и воздействия этих изменений на водные объекты были собраны сведения о ПТВ, осадках, а также гидрологических (сток рек, температура воды, ледовые условия) и химико-биологических характеристиках водных объектов

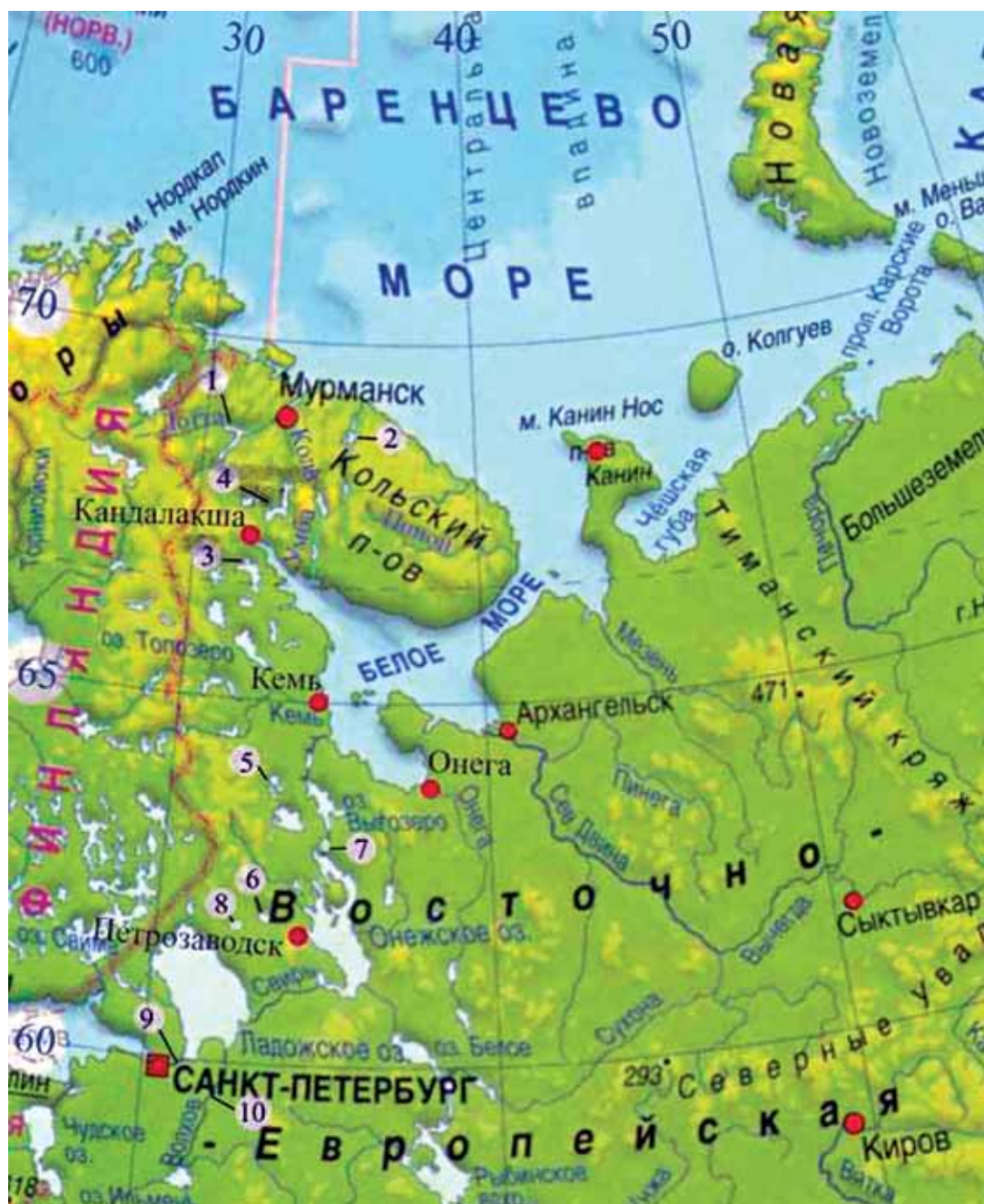


Рис. 1

Карта основных объектов наблюдений.

Номерами показаны следующие объекты:

- 1 – Верхне-Тулумское вдхр., 2 – Серебрянское вдхр.,
- 3 – оз. Ковдозеро, 4 – оз. Имандра,
- 5 – оз. Ругозеро, 6 – оз. Сямозеро, 7 – оз. Водлозеро,
- 8 – оз. Тулдозеро, 9 – р. Нева, 10 – р. Волхов



Севера ЕТР, включая Ладожское и Онежское озера, Белое море и разнообразные озера и реки региона. Изучение изменчивости климатического режима региона проводилось по данным наиболее длительных инструментальных наблюдений на метеорологических станциях и постах Федеральной службы Российской Федерации по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Рис. 1). При этом для каждого региона использовался существенно больший объем сведений. Например, по Мурманской области для анализа использовались данные о температуре приземного слоя воздуха и годовых суммах атмосферных осадков для 13 гидрометеорологических станций, Карелии — 15 станций, а для оценки элементов водного баланса, стока рек, уровенного режима, ледовых условий, температуры воды разнотипных озер региона использовались данные по более, чем 50 озерам. Самые длинные ряды измерений температуры воздуха имелись для Санкт-Петербурга и Архангельска, соответственно с 1752 г. и с 1814 г. Для Ладожского и Онежского озер база данных по уровню, ледовым условиям имеется с 1880 по 2010 гг. По температуре поверхности воды озер и ледовым условиям озер и водохранилищ Карелии и Кольского полуострова использованы наиболее длительные измерения по 11 водным объектам: по Карелии это Топозеро, Сегозеро, Ругозеро, Выгозеро, Сямозеро, Водлозеро (с 1950 по 2010 г.), а по Кольскому полуострову – Имандра и Ковдозеро (с 1961 по 2010 г.); водохранилища Верхнетуломское (1963–2010 гг.) и Серебрянское (1970–2010 гг.).

При расчете аномалий температуры воздуха и осадков за климатическую норму принималось среднее многолетнее значение за базовый период 1961–1990 гг. Для сравнимости метеорологических и гидрологических рядов разных объектов рассматривались ряды одинаковой продолжительности. Выполнен вероятностный анализ данных длительных рядов наблюдений (Рожков, 2001), который дает возможность выявить закономерности изменения климата в регионе, оценить трендовую составля-

ющую, определить циклические изменения климата, элементов водного баланса и реакцию гидрологических и химико-биологических параметров озер и рек на изменения климата во временных масштабах от десятков лет до внутригодовых колебаний.

### Изменения температуры воздуха в регионе

Региональные изменения ПТВ, полученные по данным длительных инструментальных измерений на водосборах Балтийского, Белого и Баренцева морей, отражают общие черты и тенденции изменения температуры нижнего слоя атмосферы в Северном полушарии в XX – начале XXI века.

На рис. 2 представлены среднегодовые значения изменчивости температуры воздуха в исследуемом регионе с 1900 по 2010 гг., а для ряда станций – со времени начала их работы.

Средние многолетние значения средней годовой температуры воздуха изменяются от  $-1.0^{\circ}\text{C}$  на северо-западе Архангельской области и от  $0^{\circ}\text{C}$  на юге Кольского полуострова, до  $+2.6...+2.8^{\circ}\text{C}$  на юге Карелии и более  $4^{\circ}\text{C}$  в Санкт-Петербурге. Высокие нормы средней годовой температуры воздуха отмечены в районе Ладожского озера ( $+3.0^{\circ}\text{C}$  МС Сортавала и  $+3.3^{\circ}\text{C}$  МС Валаам). В рассматриваемом регионе значения среднегодовой температуры воздуха не являются монотонно возрастающими в течение 20-го века: за потеплением 1930-х годов пришло похолодание 1960–70 гг., которое, в свою очередь, сменилось повышением температуры воздуха с конца 1980-х гг. Данные, представленные на рис. 2, свидетельствуют о почти синхронном характере изменчивости среднегодовой температуры воздуха от Санкт-Петербурга до Архангельска и Мурманска с наличием квазипериодических колебаний с временными масштабами порядка 2, 10 и 30 лет. Однако наблюдаемое потепление в регионе за последних почти 20 лет не является однородным в пространстве. Региональные особенности процесса потепления могут, в первую очередь, быть связаны с долгопериодными (от десятилетия

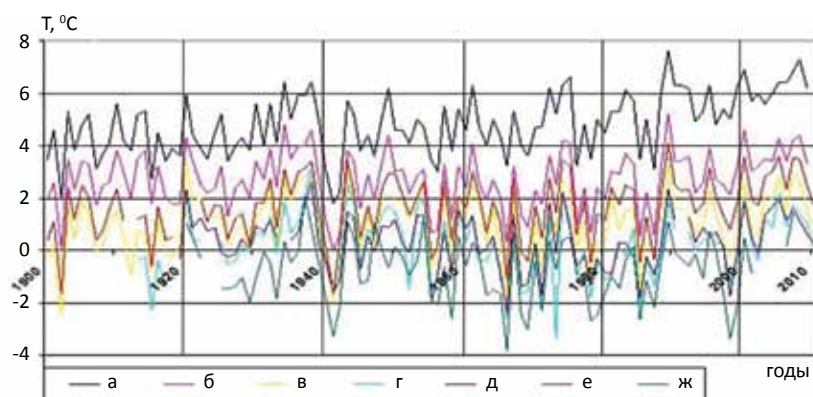


Рис. 2  
Среднегодовые значения температуры воздуха на станциях: а – Санкт-Петербург; б – Петрозаводск; в – Архангельск; г – Кандалакша; д – Мурманск; е – Онега; ж – Канин Нос за период наблюдений до 2010 г. включительно (данные с сайта [www.meteo.ru](http://www.meteo.ru))

до нескольких десятков лет) колебаниями в системе океан-атмосфера, а также с эффектом относительно короткоживущих аэрозолей, уменьшающих эффект парниковых газов (Груза и др., 2009). Следует также отметить гипотезу о влиянии скорости возрастания температуры воздуха для крупных городов – мегаполисов, к каковым относится Санкт-Петербург (Климат Санкт-Петербурга, 2010). На *рис. 2* заметно, что скорость возрастания температуры воздуха за последние 20 лет наибольшая по Санкт-Петербургу, в то время как по всем остальным населенным пунктам региона отмечается меньшая скорость возрастания температуры воздуха. Изменчивость температуры воздуха за весь период измерений с 1752 по 2010 гг. по ст. Санкт-Петербург свидетельствует о значительной ее временной неоднородности.

В первый период с 1752 по 1829 гг. дисперсия флуктуаций температуры воздуха существенно меньше по сравнению с последующим 1830–2010 гг. Объясняется это может известными методическими особенностями измерений в разные годы, а также влиянием крупного мегаполиса (Климат Санкт-Петербурга, 2010).

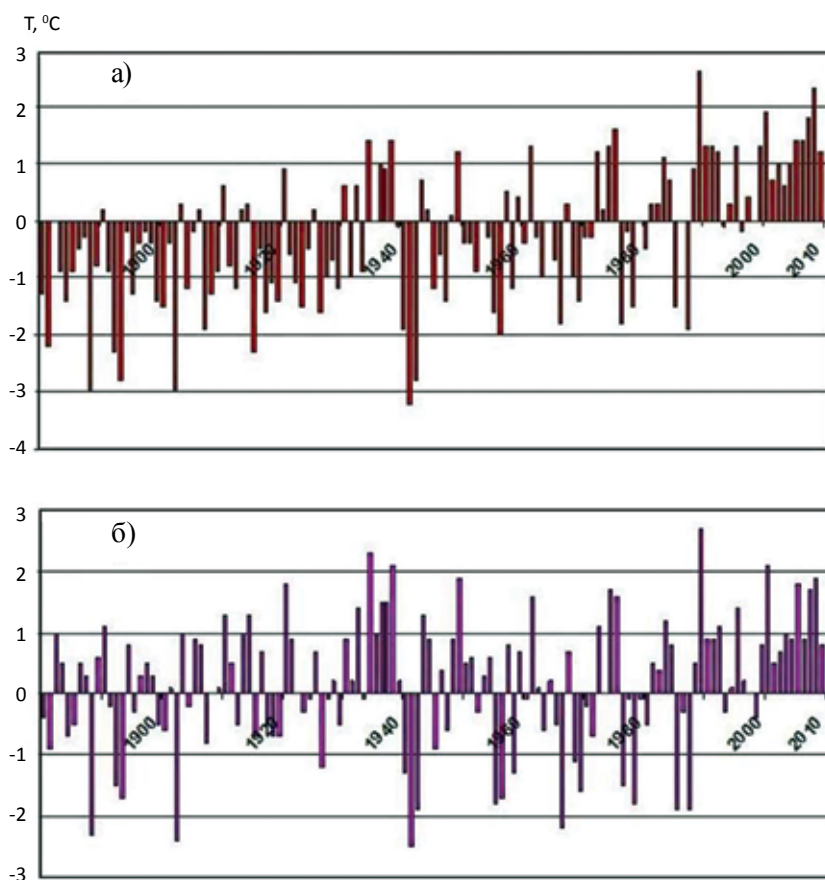


Рис. 3

Отклонения средней годовой температуры воздуха от нормы (1961–1990 гг.) по данным: а) МС Санкт-Петербург и б) МС Петрозаводск с 1880 по 2010 г.

По всей рассматриваемой территории повышение средней годовой температуры воздуха происходило неравномерно. Наибольшие значения коэффициентов линейных трендов были получены по данным наблюдений метеостанций, расположенных в южных районах Карелии вблизи побережья Ладожского озера: МС Олонец  $+0.34^{\circ}\text{C}/10$  лет, МС Сортавала  $+0.3^{\circ}\text{C}/10$  лет. В центральных районах Карелии тенденции повышения средней годовой температуры воздуха менее выражены:  $+0.26\dots+0.27^{\circ}\text{C}/10$  лет. Значения коэффициента линейного тренда средней годовой температуры воздуха, характеризующие потепление в северных районах Карелии наименьшие: около  $+0.2^{\circ}\text{C}/10$  лет. Изменение средней годовой температуры воздуха на территории Кольского полуострова за период наблюдений с 1936 по 2009 гг. составляет  $0.04^{\circ}\text{C}$  за 10 лет. Самым холодным 11-летним периодом на Кольском полуострове стал период наблюдений с 1978–1988 гг.; самым теплым – период с 1999 года по настоящее время. Таким образом, для рассматриваемого региона интенсивность повышения средней годовой температуры воздуха постепенно

возрастает по мере продвижения от высоких широт к более низким. Приведенные результаты показывают, что это не совпадает с гипотезой наибольшего потепления в Арктике и Субарктике, что также отмечается в работах ААНИИ (Алексеев и др., 2010; Гудкович и др., 2009). По данным измерений ПТВ на станциях Санкт-Петербург, Архангельск и Петрозаводск выделяются флуктуации с временными масштабами порядка 10 и 30 лет и отмечается проявление 60-летних флуктуаций, которые наблюдаются более четко в Арктике (Алексеев и др., 2010; Панин, 2010). Изменения температуры последних 30 лет в работе И.Е. Фролова с соавторами (2008) объясняются проявлением 60-ти летнего цикла и относятся к естественным изменениям климата. В работе (Корнева и др., 2011) для Гренландии показано, что в изменениях температуры воздуха существует глобальная вековая составляющая и региональные циклические колебания с продолжительностью несколько десятков

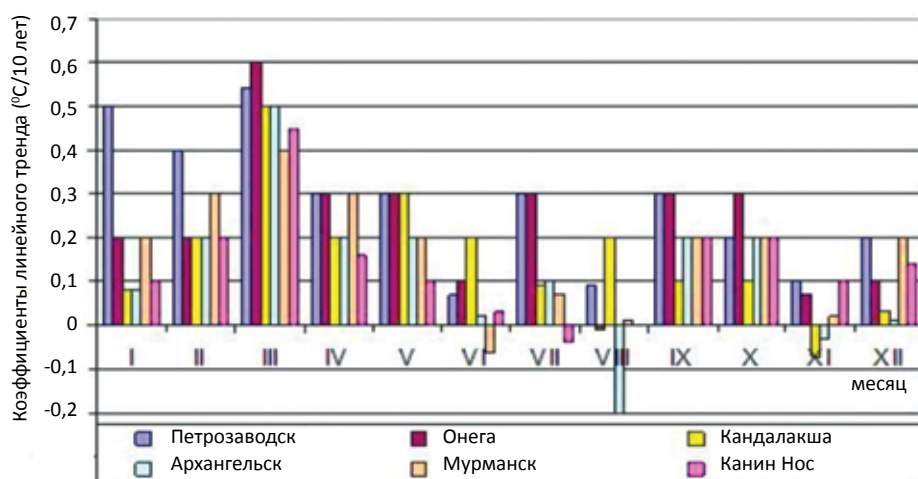


Рис. 4

Коэффициенты линейного тренда ( $^{\circ}\text{C}/10$  лет) средней месячной ПТВ по станциям региона за период 1951–2010 гг.

лет с очень большой амплитудой, которые могут объяснять временное похолодание в регионе. Далее приведем изменения средней годовой температуры воздуха в отклонениях от нормы (1961–1990 гг.) по данным: а) Санкт-Петербург и б) Петрозаводск с 1880 по 2010 г. (Рис. 3).

Рис. 3 показывает, что основные периоды похолодания и потепления для указанных городов совпадают, однако, имеется и существенное отличие изменений отклонений от нормы температуры воздуха для Санкт-Петербурга и Петрозаводска, кроме последнего временного отрезка порядка 20 лет, трактуемого как возможное проявление «глобального потепления». Так, в Санкт-Петербурге в начальный период 1880 по 1940 гг. доминировали отрицательные отклонения от нормы. Отметим, что в связи с долгопериодными вариациями за время измерений существенно менялась и сама норма. Например для территории Карелии в целом она постепенно возрастала от  $1.2^{\circ}\text{C}$  – для периода 1850–1880 г., до  $2.1^{\circ}\text{C}$  – для последнего периода 1960–1990 гг. (Климат Карелии, 2004).

Рассмотрим далее изменения температуры воздуха по среднемесячным данным ПТВ. На рис. 4 представлены изменения температуры воздуха для всех исследуемых станций региона за период 1951–2010 гг.

Результаты анализа данных показывают, что во внутригодовом ходе изменение средних месячных значений температуры воздуха происходит неравномерно для разных сезонов года и неоднородно для исследуемого региона. Общим является то, что наиболее интенсивное потепление отмечается в марте ( $+0.45 \dots +0.6^{\circ}\text{C}/10$  лет) на всех станциях исследуе-

мой территории (от Санкт-Петербурга до Мурманска и Канина Носа). В весенние (апрель–май) и осенние (сентябрь–октябрь) месяцы потепление происходит равномерно по всему исследуемому региону. В течение летнего сезона отмечены разнонаправленные тенденции изменения температуры воздуха. Существенное влияние на температуру воздуха рассматриваемой территории оказывают водные объекты. В весенние и летние месяцы на побережьях и,

особенно, в открытых частях крупных водоемов (Белое море, Ладожское и Онежское озера), температура воздуха несколько понижена, а в осеннее и зимнее время – повышена по сравнению с остальной территорией (Дроздов, Смирнов, 2011).

Оценки, касающиеся изменений количества осадков в регионе, существенно менее надежны, чем аналогичные оценки для температуры воздуха. Это вызвано как трудностями непосредственно инструментальных измерений (в особенности, твердых осадков в зимний период), так и неоднородностью рядов наблюдений на метеорологических станциях, связанных с изменениями наблюдательной практики. Для регионов России, как и для суши земного шара в целом, в основном характерен максимум на рубеже 1950–60-х годов, который означает убывание осадков после начала 1960-х гг., на европейской территории сменившееся ростом с начала 1970-х. В работе Э.Г. Богдановой и др. (2010) показано, что к 2000 году на всей европейской части России выделялась область увеличения осадков с максимальными значениями на севере Кольского полуострова, достигающими более 40% среднего многолетнего количества осадков, или 240 мм за 65 лет. Годовое количество осадков в регионе возрастает в направлении с севера на юг. Однако на распределение осадков большое влияние оказывают орографические особенности местности и характер подстилающей поверхности, ведущие к нарушению плавного хода изменения количества осадков. Довольно заметно уменьшаются годовые суммы осадков вблизи крупных водоемов, таких, как Белое море, озера Ладожское, Онежское, Топозеро, Пяозеро и др. Оценивая отклонения от нормы годовых сумм атмосферных осадков по данным изме-

рений, проводившихся на метеостанциях, можно сделать следующие выводы. До 1960 г. годовые суммы измеренных осадков были значительно ниже нормы, что объясняется недоучетом осадков в этот период времени. После 1960 г. число лет, когда осадков было больше нормы, примерно соответствует количеству лет с осадками ниже нормы (рис. 5). В последние 10 лет преобладают положительные аномалии годовых сумм атмосферных осадков.

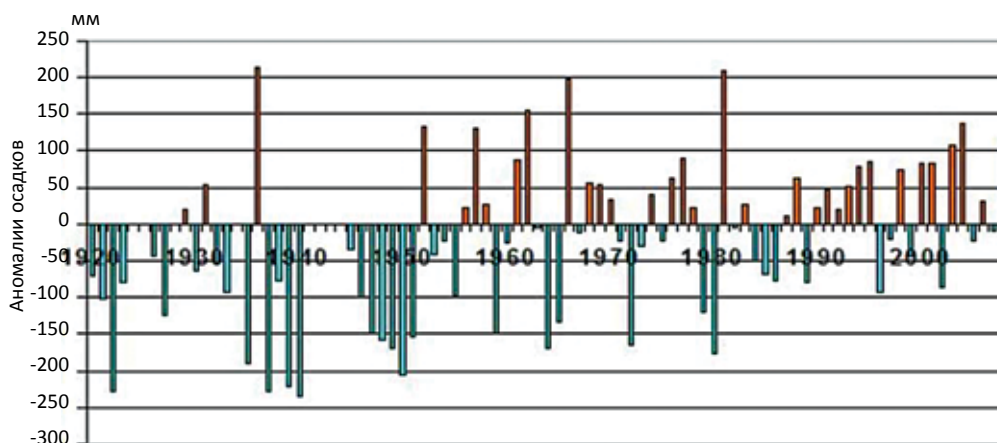


Рис. 5

Отклонения от нормы (1961–1990 гг.) годовых сумм атмосферных осадков по данным МС Петрозаводск за 1920–2010 гг.

на 50–70 мм. При этом общее число дней с осадками в основном было ниже нормы или соответствовало ей. В работе (Оценочный доклад, 2008) отмечается аналогичная тенденция для значительной территории Европейской части России – «При практически повсеместном увеличении годовой суммы осадков доля суток с суммой осадков, превышающих 0.1 мм, на обширных территориях уменьшилась». Возрастание общего количества осадков произошло из-за увеличения частоты выпадения дождей с осадками 10 и более мм. Следовательно, в течение 1995–2010 гг. в исследуемом регионе дожди были более интенсивны, чем в среднем за многолетний период, число дней с сильными дождями превышало норму по всему району исследований.

Особый интерес вызывают возможные изменения в режиме снежного покрова при повышении температуры воздуха. Рассматривались данные о числе дней в году со снежным покровом и высоте снежного покрова (осредненные за декаду). В среднем снежный покров на территории Карелии наблюдается в течение 150–180 дней. При сравнении данных наблюдений в течение 1995–2008 гг. с климатической нормой можно сделать вывод, что в указанный период число дней со снежным покровом

Общее число дней с осадками более 0.1 мм в Карелии составляет 193–212 за год. Таким образом, на данной территории осадки выпадают более чем в половину всех дней года. При сравнении с полученными средними многолетними значениями данных о числе дней с осадками за 1995–2010 гг. можно сделать следующие выводы. В течение данного периода времени количество выпавших атмосферных осадков соответствовало норме или было выше

было несколько ниже или соответствовало средним многолетним значениям. Однако анализ данных о средней декадной высоте снежного покрова, измеренных по постоянным снегомерным рейкам, позволяет говорить о том, что в 1995–2008 гг. значения данной характеристики превышали климатическую норму.

Для анализа изменения годовых сумм осадков на Кольском полуострове были построены временные ряды годовых аномалий сумм осадков, осредненных по территории полуострова за периоды наблюдений с 1936 по 2009 гг., 1961 по 2009 гг. и с 1976 по 2009 гг. (рис. 6).

Положительные коэффициенты линейного тренда аномалий сезонных сумм осадков за период наблюдений с 1936 года отмечаются во все сезоны, наибольшее значение – зимой. Такая же тенденция отмечается на временном отрезке с 1976 по 2009 гг., но сильно отличается для периода наблюдений с 1961 года. За период наблюдений с 1936 года по настоящее время в целом за год, а также отдельно в каждом сезоне заметно увеличение суммы осадков. Таким образом, проанализировав многолетние данные по режиму осадков на территории (Карелия – Кольский полуостров), можно сделать следующие



выводы. В целом в течение второй половины XX и в начале XXI веков наблюдается рост годовых сумм для всей территории. Увеличение общего количества осадков произошло из-за роста интенсивности выпадения атмосферных осадков.

По данным длительных измерений температуры воздуха и атмосферных осадков, а также по результатам моделирования на модели ECHAM4/OPYC3 с учетом сценариев IPCC (IPCC, 2008) нами

были построены карты-схемы распределения климатических характеристик. Показано, что в новых климатических условиях (по двум сценариям IPCC) возможно смещение годовых изотерм и изогиев в северном направлении. Для Кольского полуострова по обоим сценариям IPCC климатическая норма годовой температуры воздуха может увеличиться от  $-0.7$  до  $0.2^{\circ}\text{C}$ , годовые суммы осадков в средних многолетних значениях возрастут от 461 до 482–486 мм.

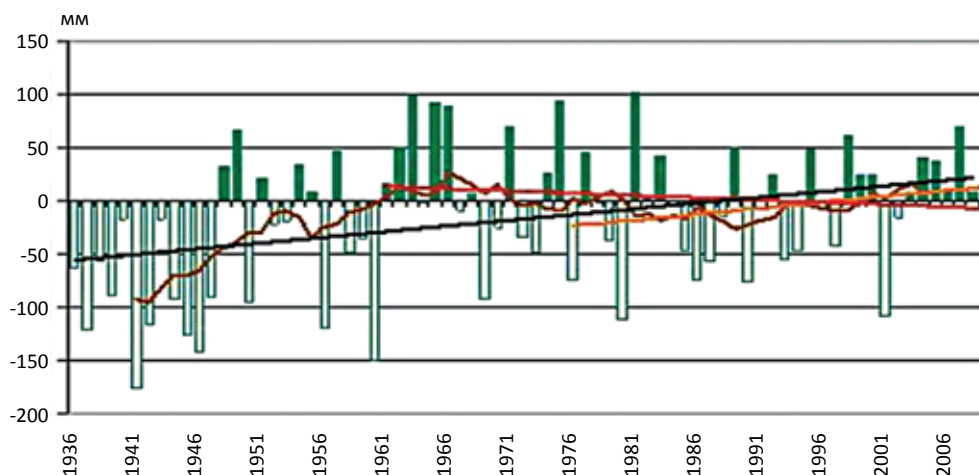


Рис. 6

Отклонение от нормы осадков (январь–декабрь) на территории Кольского полуострова за 1936–2009 гг. Кривая линия – 11-летняя скользящая средняя. Прямыми линиями показаны линейные тренды за 1936–2009 гг., 1961–2009 гг. и 1976–2009 гг.

Рассмотрим далее влияние изменений и изменчивости климата в регионе на гидрологический режим и биоту водоемов.

Сток рек на российской части водосбора Балтийского моря за период 1921–2002 гг. ранее был исследован в работах ГИ под руководством И. А. Шикломанова (Водные ресурсы, 2008), и В.С. Вуглинского (ВАСС 1 report, p.2., 2008). На рис. 7а показаны изменения годового стока рек Нева и Волхов за период 1950–2010 гг., а на Рис. 7б – изменения годового стока рек Кольского полуострова (Поной, Кола, Умба, Лотта) за период с 1960 по 2010 гг.

Эти рисунки показывают значительную изменчивость межгодовых колебаний стока рек. Даже за последнюю декаду сток реки Невы менялся от  $2861 \text{ м}^3/\text{с}$  в 2000 г. до  $1649 \text{ м}^3/\text{с}$  в 2003 г. Статистически значимых трендов в колебаниях стока нет, но имеются квазипериодические флуктуации с доминированием крупномасштабных порядка 30 лет флуктуаций. Последние 10 лет отмечаются повышенными значениями стока рек и температуры воздуха. Сток рек в маловодный и многоводный

годы может различаться почти в два раза. В последнюю декаду 2000–2010 гг. в апреле – мае сток Невы увеличивается на 6–13%, а в декабре – феврале уменьшается на 4–10%, а сезонные колебания стока Невы и рек региона мало меняются со временем (Водные ресурсы, 2008).

Сток рек Карелии сильно изменился от естественного из-за регулирования водного режима многочисленными гидроэлектростанциями и проведенной ранее мелиорацией. Максимум стока рек Суна, Шуя, Водла в последнее десятилетие отмечался в 2004 г., а минимум в 2002 г.

По данным, полученным в результате оценки линейного тренда дат начала и пика половодья рек Кольского полуострова, можно сделать вывод, что повышение за период с 1961 по 2008 год температуры воздуха на  $+0.2...+0.3^{\circ}$  в среднем за 10 лет оказало влияние на сроки начала и пиков половодья, «сдвинув» сроки к более ранним. Начало половодья на реках за последние 48 лет стало наблюдаться раньше на 1.8–1.9 дня в среднем за 10 лет, даты пика половодья – на 1.0–2.5 дней. Скорость смещения дат начала половодья на реках по территории существенно



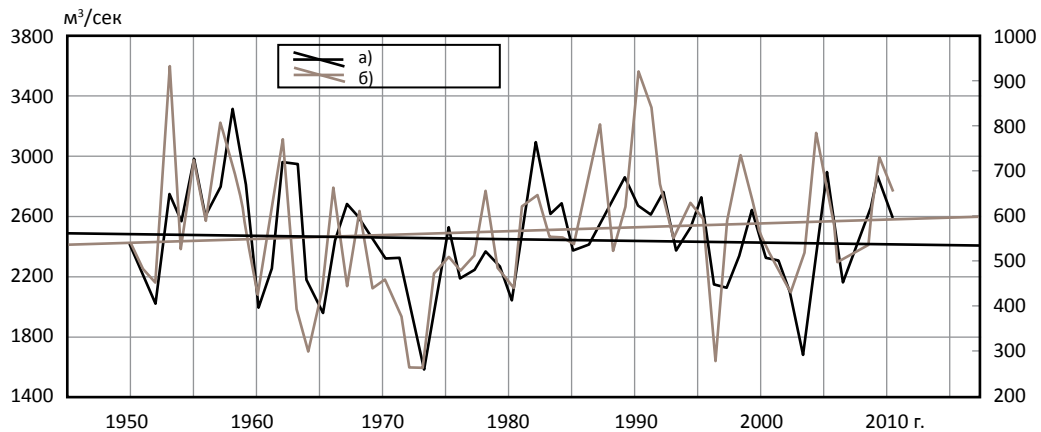


Рис. 7а

Изменения годового стока рек а) Нева и б) Волхов за период 1950–2010 гг.

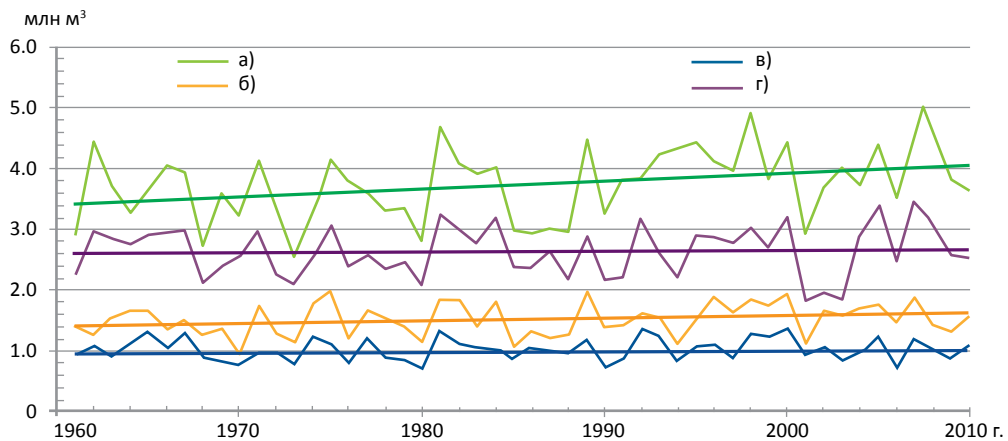


Рис. 7б

Изменения годового стока рек а) Поной, б) Кола, в) Умба, г) Лотта за период с 1960 по 2010 гг.

не отличается, дат пика половодья – неоднородна: наибольшая – 2.5 дня в среднем за 10 лет, у р. Колы (север Кольского полуострова), наименьшая – 1.0 день за 10 лет, у реки Поной (восток Кольского полуострова). Коэффициенты линейного тренда годового стока рек незначительны и изменяются от 0.01 (р. Лотта) до 0.15 (р. Поной) км<sup>3</sup> за 10 лет. По имеющимся данным можно сделать вывод, что водность рек Кольского полуострова за последние 48 лет существенно не изменилась.

Для оценки происходящих климатических изменений представляет интерес изучение гидрологических характеристик крупнейших озер Европы, и в частности колебания уровня воды. График многолетних колебаний уровня воды отражает уровневый режим озера в естественных условиях (1881–2009 гг. для Ладожского и 1881–1953 гг. для Онежского озер) и после преобразования в 1953 г. Онежского озера в Верхнее-Свирское водохранилище (Сало,

Назарова, 2011). Средний многолетний уровень воды в Онежском озере после зарегулирования возрос с 98 см до 130 см над нулем поста, принятом для озера равным 31.80 м. в Балтийской системе высот. С 1953 года можно отметить разнонаправленные тенденции изменения уровней воды: общая тенденция к понижению для Ладожского озера и повышение уровня воды Онежского озера (Климат Карелии, 2004). По абсолютному значению изменения средних многолетних величин уровней воды составляют 10–20 см за 60 лет. В спектрах колебаний уровня Онежского и Ладожского озер отмечаются составляющие с временными масштабами порядка 20–30 и 5–7 лет (соответствуют частотам 0.032 и 0.164 год<sup>-1</sup>).

Для озер региона, в том числе и для Ладожского и Онежского озер, были изучены характеристики ледового режима: начало и конец ледостава, время продолжительности безледоставного периода (Сало, Назарова, 2011). Изменения, происходящие в темпе-

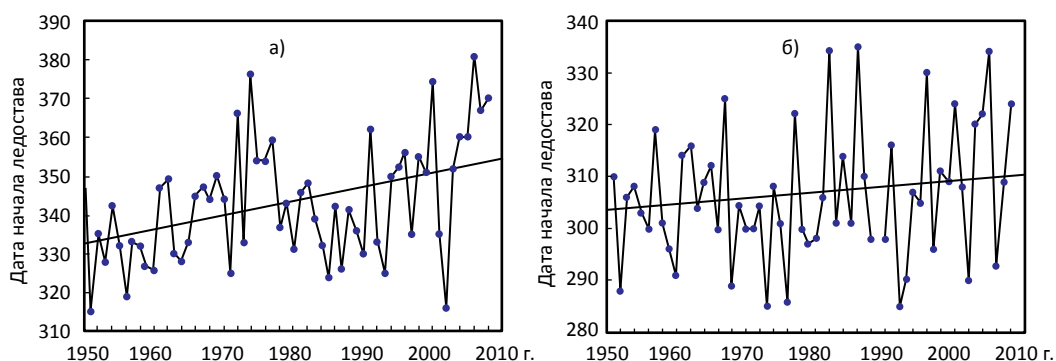


Рис. 8а

Изменение даты начала ледостава (от 1 января) в крупном глубоководном оз. Сегозеро (а) и малом оз. Ругозеро (б) за 1950–2009 г. Сплошная линия – линейный тренд. (По работе Ефремова, Пальшин, 2011)

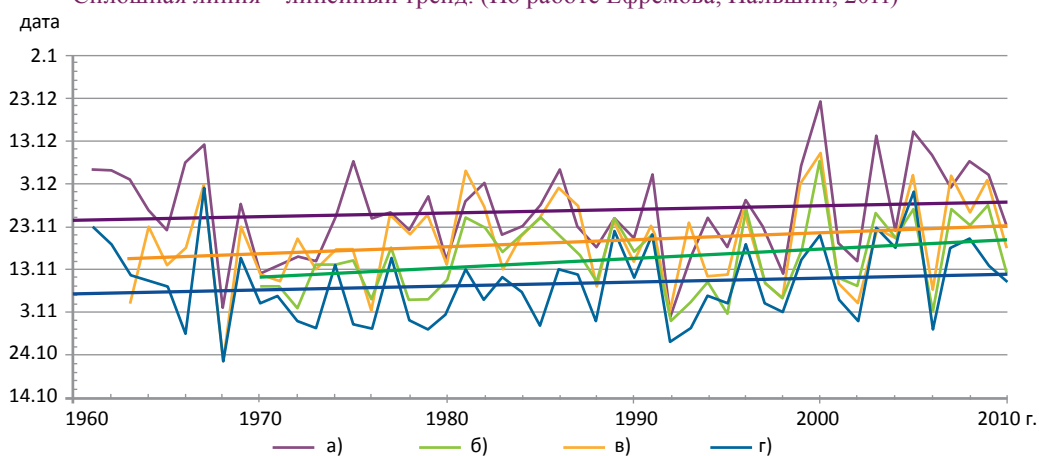


Рис. 8б

Даты начала ледостава по озерам и водохранилищам Кольского полуострова за 1961–2010 гг. а) Ковдозеро, б) в-ще Серебрянское, в) в-ще Верхнее-Тулумское, г) оз. Имандра

ратурном режиме региона, отразились на характеристиках ледового режима озер. В работе (Karetnikov, Naumenko, 2011) для Ладожского озера показано, что по данным за 1956–2003 гг. ледяной покров в последние годы устанавливается несколько позже, имеется небольшой, но заметный тренд 1–6 дней за 100 лет, а время вскрытия озера ото льда — 14 дней за 100 лет. Для Онежского озера отмечается такая же тенденция (Сало, Назарова, 2011). Продолжительность безледоставного периода на Онежском озере возросла в среднем от 215 дней за год в конце XIX века до 227 дней в среднем за год в настоящее время. Основное влияние на увеличение продолжительности безледоставного периода оказало повышение температуры воздуха в марте, в результате чего озеро стало очищаться ото льда на 8–10 дней раньше. Как следует из результатов анализа данных, основные характеристики ледового режима Онежского озера существенно зависят от внутри- и межгодовой изменчивости климатических

параметров. Ведущим фактором, определяющим как сроки начала характерных ледовых явлений, так и их продолжительность, является среднемесячная (для сроков начала и окончания ледостава) и годовая температура воздуха (для продолжительности безледоставного периода) в районе, прилегающем к акватории озера.

На рис. 8 приведен пример сроков установления ледяного покрова для крупного оз. Сегозеро (63° с.ш., площадь – 815 км<sup>2</sup>, средняя глубина – 29 м) и малого оз. Ругозеро (64° с.ш., площадь – 10,7 км<sup>2</sup>, средняя глубина – 2,5 м). Линейный тренд за многолетний период (1950–2009 гг.) при  $p=0,05$  для оз. Сегозеро оказался значимым, а для оз. Ругозеро – незначимым. Это различие может быть связано с разными геометрическими размерами озер, а также с тем, что установление ледостава на озерах происходит в разное время. На оз. Ругозеро он наблюдается в конце октября – начале ноября, а на оз. Сегозеро

на ~40 суток позже (в декабре). По срокам ледовых явлений из многолетнего периода особенно выделяются последние 10 лет. Замерзание озер в среднем за это десятилетие наблюдалось на 3–8 суток позже по сравнению со среднемноголетними данными, а очищение ото льда — на 5–7 суток раньше. В результате продолжительность безледоставного периода увеличилась на 8–15 суток.

На рис. 8б даны даты начала и конца ледостава по озерам и водохранилищам Кольского полуострова.

Приведенные данные свидетельствуют о наличии тренда в характеристиках ледового режима: более позднее начало ледостава и более раннее вскрытие озер ото льда. Причем важно отметить, что наибольшие изменения проявляются не на озерах Арктики и Субарктики, а в умеренных широтах. Таким образом, изменчивость климатических параметров, гидрологического режима рек и озер на Кольском полуострове несколько меньше, чем в умеренных широтах, что не совпадает с гипотезой о «полярном усилении» в изменчивости характеристик климата с широтой, а подтверждает выводы, полученные исследованиями ААНИИ (Алексеев и др. 2010, Большианов и др., 2009). Для ледовых условий на Балтике, в Финском заливе и Белом море отмечается разность фаз при изменениях климата (Лебедев и др., 2008).

Были также проанализированы наиболее длительные репрезентативные среднедекадные данные температуры поверхности воды за период с 1950 по 2009 гг. по разнообразным озерам, расположенным на Кольском полуострове и в Карелии. В выборку входили 8 озер: второе по величине озеро Европы – Онежское (9720 км<sup>2</sup>); большие по площади озера > 500 км<sup>2</sup> (Сегозеро, Топозеро, Выгозеро); средние озера от 25 до 500 км<sup>2</sup> (Сямозеро, Водлозеро) и малые озера < 25 км<sup>2</sup> (Ругозеро, Тулмозеро). По вертикальной термической структуре глубоководные озера (Онежское, Сегозеро, Топозеро) относятся к гипотермическому типу, средние по глубине (Выгозеро, Сямозеро) – к метатермическому типу и мелководные озера (Водлозеро, Ругозеро, Тулмозеро) – к эпитептермическому типу (Ефремова, Пальшин, 2011). Изучены статистические связи среднемесячной температуры воздуха и среднемесячной температуры поверхности воды в открытый период у берега для рассматриваемых озер. Коэффициенты корреляции среднемесячной температуры воздуха и температуры поверхности воды за июнь–октябрь для всех озер составляют 0.92–0.97, а для оз. Выгозеро равен 0.84. Наиболее тесная связь температуры воздуха и температуры воды наблюдается в малом по площади мелководном оз. Ругозеро, т.к. из-за малой тепловой

инерции оно быстрее накапливает и отдает тепло по сравнению с крупными озерами. Наименее тесная связь температуры воздуха и температуры воды отмечается в июне, когда в озере наблюдается самый интенсивный прогрев водной толщи и формируется устойчивая прямая термическая стратификация. Для рассматриваемого региона наблюдается тесная корреляция в июле и октябре. Подобные зависимости найдены и для других озер Северного полушария (The impact..., 2009). Оценка изменений температуры воды в различных озерах в отдельные месяцы (июнь – октябрь) теплой половины года показала, что во всех озерах наблюдаются тенденции повышения температуры воды. Значения роста температуры воды для каждого из озер достаточно близки и составляют от + 0.21°C/10 до 0.29°C/10 лет. Эти значения близки к тренду за тот же период, полученному для многих европейских озер. Анализ данных показывает, что в 2000–2010 гг. среднемесячные температуры воды за открытый период по сравнению с данными, принятыми за норму (1961–1990), выросли на всех озерах за каждый из месяцев. В среднем за открытый период температура воды в Водлозере увеличилась на + 0.9°C, в Топозере – на + 1.1°C, в остальных озерах – на + 0.9°C. В июне средний рост температуры воды у берега составил + 0.9°C, в июле – + 1.4°C, в августе – + 1.3°C, сентябре–октябре – + 1.2°C.

По данным измерений температуры воды и воздуха в работах (Филатов, Тержевик, 2007; Дроздов, Смирнов, 2011) в регионе Белого моря было показано, что на большинстве станций с 1977 г. отмечалась тенденция к некоторому похолоданию, а затем наметилась тенденция к значительному повышению температуры с относительным максимумом в 1989–1990-е гг., далее в 2004–2005 гг. — снижение и затем рост температуры воздуха и воды, но не столь выраженные, как в предшествующий период. Эти же тенденции были получены и для динамики ледовитости Белого моря. Таким образом, авторы делают вывод о том, что «глобальное потепление, по-видимому, вызвано комплексом естественных и антропогенных факторов, которые проявляются как в долгопериодных, так и в короткопериодных колебаниях атмосферы и океана».

Температурный и ледовый режим озер региона вместе с антропогенными факторами (регулирование уровня, эвтрофирование, молевой сплав, браконьерский лов и др.) являются определяющими в изменениях ихтиофауны водоемов (Кудерский, 2009). Влияние колебаний климата на биоту озер может быть выражено не через значения среднегодовой температуры, а через продолжительность

«биологического лета» (БЛ – сумма градусо-дней) – как лимитирующий фактор, который определяет сроки развития гидробионтов, их жизненные циклы, границы ареалов распространения различных видов и возможность их существования в том или ином водоеме. Значения скорости роста средней за теплый период температуры воды изменялись от 0.21–0.23°C/10 лет в северных озерах (Топозеро, Ругозеро) до 0.26–0.27°C/10 лет в большом и в метатермических озерах центральной и южной части региона (оз. Выгозеро). Продолжительность «биологического лета» за 60 лет увеличилась в северных озерах на 10–14 суток, а в крупных и средних метатермических озерах центральной и южной части региона на 17–24 суток.

По температурному предпочтению ихтиофауну озер региона можно разделить на три группы рыб: *холодноводные* (сиги, ряпушка, корюшка, хариус, налим), относительно *тепловодные* весенне-нерестующие (синец, густера, лещ, судак) и *фоновые или эвритермные* (щука, плотва, язь, окунь, ерш и др.), которые мало восприимчивы к температурным изменениям окружающей среды. Были изучены продолжительность «биологического лета», изменения удельного веса в уловах холодноводных и тепловодных видов рыб в озерах Ладожское и Онежское, Водлозеро, Сямозеро и ряде других. Наиболее длительные, репрезентативные ряды наблюдений имеются по озеру Водлозеро (Петрова, Кудерский, 2006). На рис. 9 показана динамика продолжительности «биологического лета» (а) и удельного веса (% общего улова) тепловодных (б) и холодноводных видов (в) в оз. Водлозеро (1950–2008 гг.).

С увеличением количества дней «биологического лета» при потеплении климата в регионе роль тепловодных рыб в уловах возрастает, а холодноводных – уменьшается (Рис. 9). За последние 50 лет заметно увеличение доли вылова теплолюбивых видов в относительно крупных озерах на востоке региона: озерах Кенозеро и Лекшмозеро (Архангельская обл.), в крупном оз. Водлозеро, а также в Ладожском и Онежском озерах. По данным наблюдений и расчетов на модели (Ladoga and Onego, 2010) показано, что для Ладожского и Онежского озер при потеплении климата отмечается снижение биомассы фитопланктона, в основном относящееся к осеннему периоду, что объясняется тем, что водоросль *Aulacosira islandica* развивается только при температуре воды, не превышающей 8°C, а эта водоросль дает главный вклад в биомассу фитопланктона весной и осенью. В то же время для зоопланктона при потеплении условия заметно благоприятнее для развития, и его биомасса увеличивается. Показано (Ladoga and Onego, 2010), что современные изменения в экосистемах крупнейших озер Европы в большей степени обусловлены антропогенными воздействиями, чем климатическими вариациями. Если для озер оказалось возможным оценить «климатическую» составляющую изменений в биоте, то для морских условий открытого Баренцева моря сделать это сложнее. Г.Г. Матишов и др. (2010) указывают, что в этом случае «выводы о влиянии климата на морские экосистемы носят характер экспертных оценок». В указанной работе показано, что внутривековые климатические изменения не нарушают устойчивость экосистем, но могут стимулировать определенные перестройки

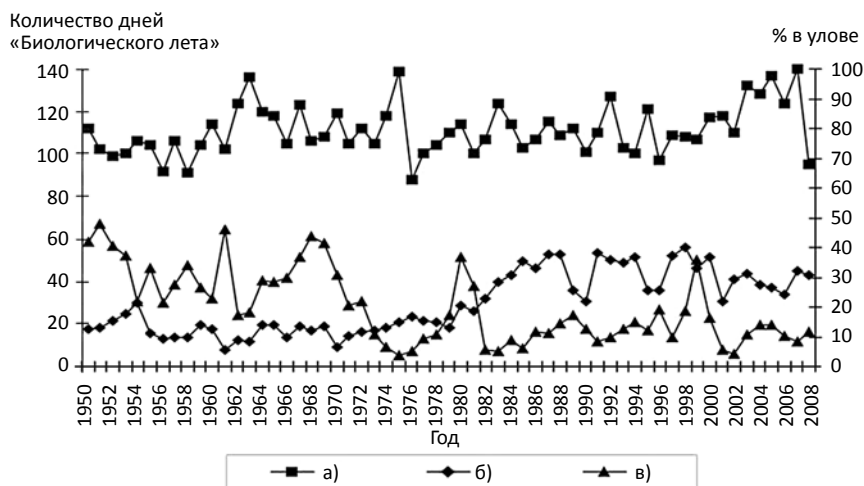


Рис. 9  
Динамика продолжительности «биологического лета» (а)  
и удельного веса (% общего улова) тепловодных (б) и холодноводных видов (в)  
в оз. Водлозеро (1950–2008 гг.)



видового состава и трофических связей. Колебания теплового состояния Баренцева моря непосредственно влияют на продуктивность экосистем и тем самым определяют изменения естественного биоресурсного потенциала. Есть основания полагать, что дальнейшие изменения климатической системы будут носить циклический характер с периодом, близким к 30 годам (Алексеев и др., 2010; Матишов и др., 2010). Отметим совпадение выводов по возможным изменениям водных экосистем Ладожского и Онежского озер (Ladoga and Onego, 2010) с морскими, такими как Баренцево море (Матишов и др., 2010) и Белое море (Филатов, Тержевик, 2007). Экосистемы этих крупных водных объектов адаптированы к многолетней изменчивости условий среды. Их состояние в большей степени зависит от антропогенных нагрузок (промышленного изъятия биоресурсов, преднамеренного и непреднамеренного вселения чужеродных видов, загрязнений). Учитывая сложность наблюдений за биотой водоемов (в частности ихтиофауной), существенное влияние неучтенного, браконьерского лова, изучение влияния изменений климата на биоту водоемов требует дальнейших исследований.

### Выводы

Показано, что интенсивность повышения средней годовой температуры воздуха в регионе Баренцева моря до Финского залива постепенно возрастает по мере продвижения от высоких широт к более низким. Наибольшее потепление характерно для зимних месяцев года, причем оно происходит не равномерно по всему исследуемому региону.

Отклонения от нормы годовых сумм атмосферных осадков до 1960 г. были значительно ниже нормы, а в последние 10 лет преобладают положительные аномалии годовых сумм атмосферных осадков.

Изменения, происходящие в температурном режиме атмосферы и водоемов региона, отразились на характеристиках температурного и ледового режима озер. На всех озерах региона отмечается увеличение безледоставного периода, продолжительность которого в Онежском озере к началу XXI столетия возросла в среднем от 215 дней за год до 227 дней в среднем за год в настоящее время.

Продолжительность «биологического лета» за 60 лет увеличилась в северных озерах на 10–14 суток, а в крупных и средних мета- и гипотермических озерах центральной и южной части региона на 17–24 суток. При потеплении стало заметным увеличение доли вылова теплолюбивых видов рыб. Для Великих озер Европы (Ладожского

и Онежского) в настоящее время более заметной является реакция экосистемы озер на колебания антропогенной нагрузки, чем на изменения климата.

Приведенные выше результаты свидетельствуют о том, что климат и общая увлажненность водосбора подвержены значительным естественным флуктуациям, на которые накладываются колебания, вызванные антропогенными факторами. Проявление 60-летнего цикла в арктических широтах более четкое, чем в умеренных ЕТР.

Изменчивость климатических параметров, гидрологического режима рек и озер на Кольском полуострове несколько меньше, чем в умеренных широтах (Юг Карелии, Ленинградская область), что не совпадает с гипотезой о «полярном усилении» в изменчивости характеристик климата с широтой, а подтверждает выводы, полученные исследованиями ААНИИ.

Работа выполнена благодаря поддержке гранта РФФИ, проект 10-05-00963.

### Литература:

1. Алексеев Г.В., Радионов В. Ф., Александров Е. И., Иванов Н. Е., Харланенкова Н. Е. Климатические изменения в Арктике и Северной Полярной Области. Проблемы Арктики и Антарктики. № 1 (84). 2010.
2. Богданова Э.Г., Гаврилова С.Ю., Ильин Б.М. Временные изменения атмосферных осадков на территории России по данным их скорректированных значений за период 1936–2000 гг. / Метеорология и гидрология, № 10, 2010. С. 78–89.
3. Большианов Д.Ю., Макаров А.С., Морозова Е.А., Павлов М.В., Саватюгин Л.М.. Развитие природной среды полярных областей Земли последнего тысячелетия по данным изучения донных отложений озер. Проблемы Арктики и Антарктики. № 1 (81). 2009.
4. Водные ресурсы России и их использование. Ред. И.А. Шикломанов. Санкт-Петербург. 2008. 598 с.
5. Груза Г.В., Мещерская А.В., Алексеев Г.В., Анисимов О.А. и др. Изменения климата России за период инструментальных наблюдений. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т.1. Изменения климата. Росгидромет. М. 2008. С. 31–87.
6. Гудкович З.М., Карклин В.П., Смоляницкий В.М., Фролов И.Е.. О характере и причинах изменений климата Земли. Проблемы Арктики и Антарктики. № 1 (81). 2009.

7. Дроздов В.В., Смирнов Н.П.. Влияние крупномасштабных циркуляционных процессов в атмосфере на температурный режим Беломорского региона. Проблемы Арктики и Антарктики. № 3 (89). 2011. С. 78–88.
8. Ефремова Т.В., Пальшин Н.И. Особенности ледового покрова на водоемах Северо-Запада России. Метеорология и гидрология. 2011. № 8. С. 89–98.
9. Климат Санкт-Петербурга и его изменения. Гидрометеоздат. СПб. 2010.
10. Климат Карелии: Изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / Отв. Ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 224 с.
11. Кобышева Н.В., Е. М. Акентьева, М. В. Клюева, А. В. Мещерская, Э. Я. Ранькова и др. Основные особенности климата России. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т.1. Изменения климата. Росгидромет. М. 2008. С. 9–18.
12. Кондратьев К.Я. Изменения глобального климата: нерешенные проблемы // Метеорология и гидрология. № 6. 2004. С. 118–127.
13. Корнева И.А., Попов И.О., Семенов С.М. Современные изменения температуры земной поверхности и потока поглощенной радиации в регионе Гренландии. Тр. ГГО. В. 563. 2011. С. 77–92.
14. Котляков В.М. Криосфера и климат. Экология и жизнь. №11, 2010.
15. Кудерский Л.А. Состав и промысловое значение рыбного населения Ладожского озера / Рыбохозяйственное исследование больших озер Северо-Запада европейской части России: Сборник научных трудов. Вып. 334. СПб. 2009. С. 138–214.
16. Лебедев А.А., Миронов Е.У., Драбкин В.В. Особенности изменчивости ледовых условий Балтийского моря, Финского залива и Белого моря в связи с глобальным потеплением. Проблемы Арктики и Антарктики. № 3 (80). 2008.
17. Матишов Г.Г., Дженюк С.Л., Моисеев Д.В., Жичкин А.П.. Климатические изменения морских экосистем Европейской Арктики. Проблемы Арктики и Антарктики № 3 (86). 2010.
18. Монин А.С., Сонечкин Д.М. Колебания климата по данным наблюдений. М.: Наука, 2005. 192 с.
19. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т.1. Изменения климата. Росгидромет. М. 2008.
20. Панин Г.Н. Об изменении климата в полярных зонах Земли // Доклады Академии Наук. Т. 427, № 3, 2010. С. 397–402.
21. Петрова Л.П., Кудерский Л.А. Водлозеро: природа, рыбы, рыбный промысел. –Петрозаводск, 2006. 196 с.
22. Стратегический прогноз изменений климата Российской Федерации на период до 2010–2015 гг. и их влияния на отрасли экономики России. – М.: Росгидромет, 2005. 28 с.
23. Рожков В.А. Теория и методы статистического оценивания вероятностных характеристик случайных величин и функций с гидрометеорологическими примерами. СПб.: Гидрометеоздат, 2001. 304 с.
24. Сало Ю.А., Назарова Л.Е. Многолетняя изменчивость ледового режима Онежского озера под влиянием изменений климата. Известия Русского географического общества. 2011. т. 143. №. 3. С. 50–54.
25. Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю. (ред.). Белое море и водосбор под влиянием климатических и антропогенных воздействий. // Петрозаводск. Изд. РИО КарНЦ РАН. 2007. 335 с.
26. Фролов И.Е., З.М. Гудкович, В.П. Карклин, В.М. Смоляницкий. Изменения климата Арктики и Антарктики – результат действия естественных причин. Проблемы Арктики и Антарктики № 2 (85). 2010.
27. Arctic Environment Variability in context of Global Change. By L. Bobilev et. Al. Springer-Ptraxis. 2003. 471 p.
28. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Editors: H.-J. Bolle, M. Menenti, I. Rasool. V. 2. Springer-Verlag. Berlin –Heidelberg. 2008.
29. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change. 2008.
30. Karetnikov S., Naumenko M. Lake Ladoga ice phenology: Mean condition and extremes during the last 65 years. Hydrol. Process. Published online in Wiley Online Library (wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/hyp.8048. 2011.
31. Ladoga and Onego – Great European Lakes: Modeling and Experiment. Rukhovets L., Filatov N., (Eds.). London. Springer-Praxis. 2010. P. 302.
32. The impact of Climate Change on European Lakes. Ed. by G. George. Springer. 2009. 507 p.
33. Vuglinsky V. The Hydrological Regime. In book: Regional Climate Studies. Editors: H.-J. Bolle, M. Menenti, I. Rasool. V. 2. Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008 P. 72–87.