

*На правах рукописи*

**ТОЛСТИКОВ АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ**

**ИЗМЕНЧИВОСТЬ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА  
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВОДЫ БЕЛОГО МОРЯ**

Специальность 25.00.28 – Океанология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Мурманск  
2006

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

**Научный руководитель:** доктор географических наук  
**Филатов Николай Николаевич**

**Официальные оппоненты:** доктор географических наук, профессор  
**Денисов Владимир Васильевич**

кандидат географических наук  
**Ионов Виктор Владимирович**

Ведущая организация: Полярный научно-исследовательский институт  
морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича

Защита состоится 7 сентября 2006 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 002.140.01 при Мурманском морском биологическом институте КНЦ РАН, по адресу: 344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Чехова, 41, Азовский филиал ММБИ КНЦ РАН

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Мурманского морского биологического института КНЦ РАН по адресу: 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17.

Автореферат разослан 31 июля 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат географических наук



Е.Э. Кириллова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Температура воды принадлежит к числу наиболее важных, фундаментальных характеристик океана. Ее изменение в пространстве и во времени является одним из важнейших показателей биологической продуктивности вод океана, на которую оказывает как прямое, так и косвенное воздействие. Изменчивость температурного режима поверхностного слоя воды Белого моря в интервале от мезомасштабной до межгодовой изучена в настоящее время недостаточно, в противоположность тому, насколько подробно исследован, например, уровень Белого моря для этих же масштабов (Инжебейкин, 2004). Важность изучения закономерностей изменчивости температуры воды – параметра, наиболее оперативно по сравнению с другими параметрами отражающего изменения экосистемы моря, очевидна. Тем более, температура поверхностного слоя постоянно фиксируется на сети ГМС Росгидромета и определяется по данным спутниковых измерений уже около 30 лет. Таким образом, задача выявления закономерностей изменчивости температуры воды при разном комплексе условий, является весьма актуальной в связи с оперативным мониторингом состояния экосистемы моря.

Исследования последних лет, выполненные по разным программам (ФЦП «Мировой океан», РФФИ, ИНТАС) были посвящены изучению отдельных звеньев экосистемы моря, абиотическим факторам. Большое внимание уделялось проведению полевых исследований разными организациями (ИО РАН, ЗИН РАН, ММБИ КНЦ РАН, ГОИН, ИВПС КарНЦ РАН, ИЭПС УрО РАН, МГУ, ВНИРО, Севгидромет), внедрению современных средств дистанционных измерений (Нансеновский международный центр дистанционных методов и окружающей среды, ИВПС КарНЦ РАН, ИО РАН), разработке моделей термогидродинамики (ИО РАН, ААНИИ, ИВПС КарНЦ РАН, ИЭПС УрО РАН, РГГМУ).

Ранее выполненный анализ длительных наблюдений гидрометеорологических характеристик Белого моря (температура воды, соленость, уровень моря) до 1990 г. позволил установить закономерности изменчивости этих параметров. Было показано (Смирнова и др., 2001), что линейные тренды для температуры и солености всех гидрометеостанций, расположенных на островных и береговых пунктах, характеризуют тенденцию к понижению температуры воды и повышению солености за период 1960-1990 гг. В Белом море в исследуемом диапазоне преобладают квазидвухлетние и квазиодинадцатилетние колебания этих элементов. В настоящее время особый интерес представляют изменения последних 10-15 лет, то есть за время, когда отмечалось потепление климата (Global changes..., 1999; Груза, Ранькова,

2003). На современном этапе исследований требуется разработка методов оперативного контроля состояния, экспертной системы оценки ресурсов Белого моря с изучением сценариев развития его экосистемы в будущем. При этом температура поверхностного слоя является ключевым абиотическим фактором, оперативно отражающим изменения климата.

Объектом данного исследования является поверхностный слой воды Белого моря (горизонт от 0 до 1 м), а предметом – многолетние колебания температурного режима поверхностного слоя воды Белого моря.

**Цель работы:** выявление закономерностей изменчивости температуры поверхностного слоя (ТПС) воды Белого моря и факторов их определяющих, на основе данных наиболее длительных наблюдений в масштабах от межгодовых до синоптических колебаний.

Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- Определить закономерности изменчивости ТПС Белого моря, выявить квазипериодические флуктуации и тренды.
- Определить связи изменчивости ТПС Белого моря с другими гидрометеорологическими параметрами.
- Оценить изменения гидрометеорологических параметров на водосборе Белого моря в зависимости от изменчивости климата.
- Оценить вклад в общую дисперсию различных видов изменчивости ТПС Белого моря.
- Рассмотреть некоторые механизмы воздействия на абиотическую часть экосистемы моря и связи таких крупномасштабных факторов, как Северо-Атлантическое колебание и Эль-Ниньо, с температурным режимом поверхностного слоя воды Белого моря.

**Основные научные результаты, выносимые на защиту:**

- выявленные закономерности изменчивости ТПС Белого моря, такие как повышение температуры поверхностного слоя со скоростью  $0,5^{\circ}\text{C}/20$  лет; квазипериодические колебания с масштабами 2-4 и 5-7 лет;
- оценка вклада выявленных закономерностей изменчивости ТПС Белого моря в масштабах от межгодового до синоптического;
- установленные закономерности изменчивости ТПС Белого моря с крупномасштабными климатическими процессами, такими как Северо-Атлантическое колебание.

**Научная новизна.**

- Впервые для Белого моря определены закономерности изменчивости ТПС в интервалах от межгодового до синоптического.
- Выявлены причины изменчивости ТПС при наблюдающемся последние десятилетия потеплении климата в районе водосбора Белого моря.

- Установлена связь межгодовой изменчивости ТПС Белого моря и крупномасштабных процессов.
- Разработана методика выделения «теплых», «холодных» и «средних» (нормы) лет из генеральной совокупности временного ряда для выявления закономерностей межгодовой изменчивости ТПС Белого моря.
- Оценены региональные и крупномасштабные особенности изменения климата и изучена реакция океанографических параметров Белого моря на эти климатические изменения.

**Практическая значимость.** Выполненные исследования позволяют существенно уточнить параметры крупномасштабной изменчивости температурного режима поверхностного слоя воды Белого моря при современных изменениях климата. В работе применена математическая модель внутригодового хода ТПС Белого моря, позволяющая уточнять расчеты времени замерзания и освобождения портов Белого моря ото льда, более корректно обосновывать выбор районов рыбозаповедения и развития марикультуры, оценивать с точки зрения интенсивности периоды весеннего нагревания и осеннего охлаждения воды для различных районов моря, использовать полученные закономерности для прогнозирования состояния экосистемы моря.

**Достоверность** результатов обоснована использованием современных методов анализа и обобщения исходной репрезентативной информации, полученной на сети Росгидромета, длительных наблюдений ряда научных организаций (ЗИН РАН, Севгидромет, ИВПС КарНЦ РАН), а также данных спутниковых наблюдений, калиброванных по результатам подспутниковых измерений.

**Личный вклад автора:**

- Создание базы данных по ТПС и ряду других гидрометеорологических параметров Белого моря (по уровню поверхности Белого моря, стоку рек, а также данные более чем двадцатилетних регулярных спутниковых измерений ТПС).
- Расчет характеристик изменчивости температуры поверхностного слоя воды Белого моря и выявление закономерностей этой изменчивости.
- Расчет по математической модели внутригодового хода ТПС Белого моря.
- Участие в сборе натурных данных в полевых исследованиях на Белом море за период 1999-2005 гг. в различные сезоны и их обработке. Изучение по этим данным мезомасштабной изменчивости ТПС Белого моря.
- Участие в подспутниковых измерениях.

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 13 работ. Из них 2 статьи в реферируемых журналах и 6 статей в коллективных монографиях. В основном все статьи опубликованы в соавторстве с д.г.н., проф. Н.Н. Филатовым и ст.н.с. ИВПС КарНЦ РАН М.П. Петровым.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на семи международных конференциях в следующих городах: Архангельск, Москва, Апатиты, Калининград, Петрозаводск за период 2002-2005 гг.

Основные результаты диссертационной работы использованы в рамках научно-исследовательских тем (ФЦП Мировой океан, ОНЗ РАН), выполняемых в ИВПС КарНЦ РАН, а также при выполнении исследований в проектах РФФИ и по грантам ИНТАС.

**Объем и структура.**

Диссертация изложена на 149 страницах и состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы, включающего 165 наименований, и приложений.

**Благодарности.**

Автор благодарен за помощь и содействие научному руководителю профессору, д.г.н. Н.Н. Филатову; доценту Карельского государственного педагогического университета В.Н. Семенову и к.г.н. С.П. Гриппа, д.г.н. Ю.И. Инжебейкину, к.ф.-м.н. **А.Н. Зуеву** (Мурманский морской биологический институт), д.г.н. В.Б. Коробову (Центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, г. Архангельск) и А.Н. Лебедеву, д.б.н. В.Я. Бергеру и к.б.н. И.М. Примакову, чл.-корр. РАН Ю.С. Долотову. Особое слово благодарности выражаю ст.н.с. ИВПС КарНЦ РАН М.П. Петрову.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, показана научная новизна и практическая значимость, кратко изложено содержание работы.

**Первая глава «ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БЕЛОГО МОРЯ И ЕГО ВОДОСБОРА»** включает в себя оценку современного состояния Белого моря и его водосбора. Она содержит обобщенные знания о физико-географических закономерностях Белого моря и его водосбора по литературным сведениям и анализ новых данных, собранных за последние 15 лет. Показаны основные особенности физико-географического положения изучаемого объекта: морфометрия, тектоника, климат водосбора моря. Наибольшее внимание здесь уделяется изменчивости

приповерхностной температуры воздуха, стоку рек водосборного бассейна Белого моря, индексам циркуляции атмосферы.

Данные длительных наблюдений за температурой воздуха в рассматриваемом районе свидетельствуют о том, что отмечается увеличение среднегодовой температуры воздуха за последние 30 лет. Расчеты изменений климата в исследуемом регионе по модели ЕСНАМ4/ОРУС3 (Филатов и др., 2003), выполненные в лаборатории географии и гидрологии ИВПС КарНЦ РАН по двум сценариям, отражающим увеличение содержания углекислого газа в атмосфере, показали, что при современных тенденциях изменения климата района водосбора Белого моря норма годовой температуры воздуха в первой половине XXI века возрастет в 1,3-1,5 раза, количество осадков практически не изменится (рост 1-2%), суммарное испарение увеличится на 10-13% (Климат Карелии..., 2004). Все эти процессы, несомненно, должны повлиять на водный и тепловой баланс моря и отразятся на температуре поверхностного слоя воды Белого моря.

Сделан вывод о значительном влиянии на температурный режим Белого моря крупномасштабных процессов. Одним из них является Северо-Атлантическое колебание (САК), воздействующие на Белое море по предполагаемой схеме закономерностей:

САК → циклогенез → усиление Северо-Атлантического течения, увеличение поступления теплых водных масс в Баренцево море → повышение температуры воды Белого моря → понижение ледовитости Белого моря.

Период одного САК составляет около пяти-семи лет (Смирнов, Воробьев, Качанов, 1998). Квазипятилетний ритм выражен также в 40-летнем и 23-летних рядах температуры поверхностного слоя воды Белого моря. Коэффициент взаимной корреляции между ходом индексов САК и ТПС Белого моря довольно высокий ( $r=0,55$ ). Кроме того, есть основания полагать, что Белое море опосредованно подвержено воздействию явления Эль-Ниньо, так как Баренцево море откликается на события Эль-Ниньо понижением теплосодержания вод на  $0,5^{\circ}\text{C}$  (Бышев, 2003) и увеличением ледовитости в один год с имевшим место событием. Наиболее интенсивные явления Эль-Ниньо последних 30 лет отмечены в 1982-1983 и в 1997-1998 гг. По нашим данным, для температуры поверхностного слоя воды Белого моря 1982 и 1997 годы приходится на периоды минимума.

***Вторая глава «МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ»*** содержит сведения об особенностях созданной базы данных, методах анализа собранных нами данных по Белому морю (рис. 1).



Рис. 1. Станции многолетних непрерывных и судовых наблюдений за ТПС Белого моря (● - станции многолетних наблюдений; ● - станции судовых наблюдений; — — — - вековые разрезы).

Многолетние ряды данных *9-ти* прибрежных и островных станций с дискретностью 6 ч. за период 1977-1999 гг. получены от ВНИИГМИ-МЦД, г. Обнинск; данные по декадной станции *Д-1* (период 1961-2003 гг.) в ЗИН РАН; данные многолетних судовых измерений ТПС в различные годы за период 1891-2002 гг. в ММБИ (*обработано 13185 станций*); данные вековых разрезов за период 1992-2004 гг. в ЦГМС-Р, г. Архангельск (*обработано 2366 станций*). Данные ТПС со спутников серии NOAA за последние 30 лет. Новые данные по ТПС получены в ходе экспедиций с участием автора в течение 1999-2005 гг. (*обработано 216 станций*).

К измерениям ТПС Белого моря применялись стандартные методики вероятностного статистического анализа (Рожков, Трапезников, 1990). Часть данных содержала пропуски, которые мы заполнили методом полиномиального скользящего среднего (Кендалл, Стьюарт, 1976). Для генеральной совокупности каждого ряда были рассчитаны основные стати-

стические характеристики, оценены линейные тренды океанографических параметров, проведено нелинейное оценивание с применением математической модели и осуществлен спектральный анализ. Для расчета изменений ТПС в будущем при анализе данных по модели линейного тренда мы использовали экстраполяцию вперед значений 23-летних рядов ТПС Белого моря. В нелинейном оценивании применялась стохастическая модель внутригодового хода ТПС, разработанная в ИВПС КарНЦ РАН (Ефремова, Петров, 1992). При использовании спектрального анализа ряды среднесуточных температурных данных по 9-ти гидрометеостанциям за 23 года (1977-1999 гг.) были приведены к стационарному виду.

Для изучения особенностей изменчивости ТПС Белого моря впервые, помимо традиционно используемых корреляционного и спектрального анализов, применены современные методы исследования изменчивости гидрометеорологических наблюдений. Использовался вейвлетный анализ, что особенно важно для разделения близко расположенных квазипериодических составляющих. В анализе рядов температурных данных выбран бесконечный регулярный вейвлет Мейера с дискретной аппроксимацией, поскольку данный вейвлет лучше всего подходит для анализа временных рядов (Дьяконов, 2002).

Для интерпретации полученных результатов, а также оценки их связи с климатическими изменениями, использовались данные береговых и островных гидрометеорологических станций и постов по температуре приземного слоя воздуха, осадкам и испарению, индексам глобальной циркуляции атмосферы, продолжительности солнечного сияния. Кроме того, применялись данные по уровню поверхности Белого моря, стоку рек, а также данные регулярных спутниковых измерений ТПС, начиная с 1983 г.

***В третьей главе «ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ БЕЛОГО МОРЯ И ЕГО ИЗМЕНЧИВОСТЬ»*** раскрываются закономерности распределения температурных полей Белого моря, полученные по данным анализа имеющихся наблюдений. Показаны особенности водного и теплового баланса моря. Поверхностный слой Белого моря может считаться представительным для всего верхнего квазиоднородного слоя, а в перемешанных районах – для всей толщи воды (Белое море, 1991).

Изменчивость ТПС Белого моря с расчетом вклада в общую дисперсию мы изучали по схеме, предлагаемой в (Белое море, 1991), для интервалов: межгодовая, сезонная, внутригодовая, синоптическая. Мезомасштабная изменчивость изучалась по данным экспедиционных исследований за период 2003-2005 гг.

В межгодовой изменчивости Белого моря ярко проявляются квазидвухлетние и квазипятилетние периоды, характерные для изменчивости ТПС

Северной Атлантики (Серяков, 1979; Belkin et al., 1998). За исследуемый период времени (1977-1999 гг.) наиболее низкие температуры поверхностного слоя воды Белого моря наблюдались в конце 70-х и начале 90-х гг., а в 1989 г. – наиболее высокие (рис. 2), что хорошо согласуется с закономерностями изменчивости давления в исландском и азорском центрах действия атмосферы, полностью определяющих тенденции Северо-Атлантического колебания.

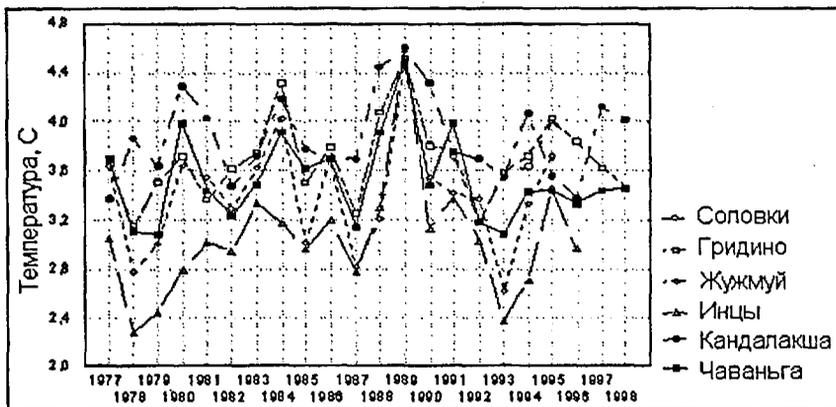
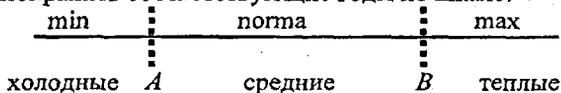


Рис. 2. Изменчивость ТПС Белого моря по среднегодовым данным шести гидрометеостанций.

Для выявления закономерностей межгодовой изменчивости ТПС Белого моря, основываясь на данных по отклонениям от средней многолетней температуры, была предложена и применена методика выделения «средних», «холодных» и «теплых» лет из генеральной совокупности временного ряда. Для этого по каждому ряду ТПС находилось среднее арифметическое значение, которое считалось нормой ( $N$ ). Определялось максимальное ( $\max$ ) и минимальное значение ( $\min$ ) за весь период наблюдения. Устанавливали границы ( $A$  и  $B$ ) разных лет на шкале по эмпирически выведенным формулам:

$$A = \frac{(N - \min)}{2} + \min; \quad B = \frac{(\max - N)}{2} + N$$

Выбирались соответствующие годы по шкале:

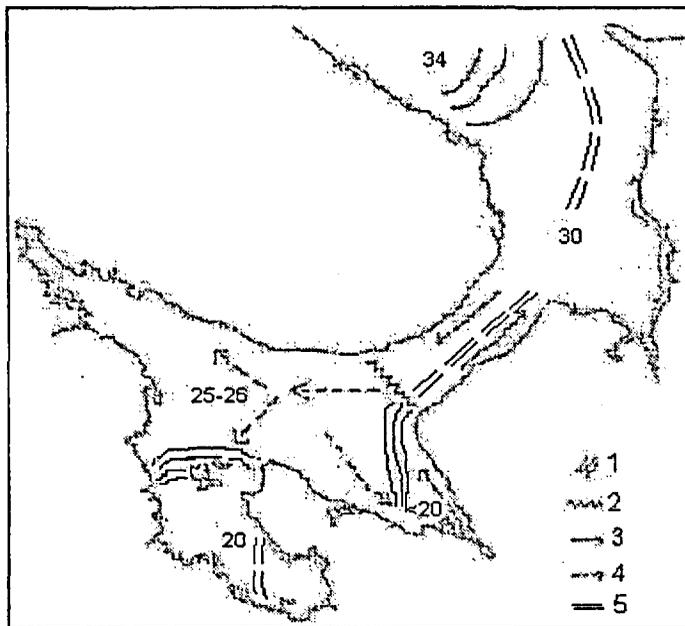


Если значение находилось непосредственно на границе *A* или *B*, оно включалось в область *N*. Так были выбраны свои «холодные», «теплые» и «средние» годы для каждой из 9-ти гидрометеостанций. Предложенная методика помогла не разбивать ряд на равные части «теплых», «холодных» и «средних» лет, а учесть все встречающиеся в выборке значения. «Средних» лет во временном ряду больше, что дает возможность акцентировать внимание на экстремальных значениях, то есть на максимумах и минимумах. Такая сортировка данных позволила сопоставить друг с другом многолетний ход ТПС Белого моря различных станций и выявить экстремальные годы для каждого временного ряда. Результаты анализа показали, что ход интегрального значения температуры поверхностного слоя всего Белого моря сходен с ходом ТПС каждой отдельной станции. Практически нигде разница хода ТПС станции и хода интегральной температуры не превышает по абсолютной величине 0,4°C. Следовательно, «теплые», «холодные» и «средние» годы всех станций совпадают друг с другом по экстремумам, отличаясь лишь по амплитуде, что обусловлено сходными особенностями океанологического режима разных районов Белого моря.

В сезонном аспекте наиболее важное значение имеет положение фронтальных зон. По результатам спутниковых измерений определено положение этих фронтальных зон (Filatov et al., 2005), которые мы уточнили по данным длительных наблюдений. За основу мы взяли известную схему фронтальных зон (Европейский Север..., 1999): *стоковые* или *шлейфовые* – граница между распространившимися пресными водами рек и морской водой; *пограничные* – между двух морей; *приливные* – связаны с распространением приливных течений по акватории моря (Елисов, 1997; Семенов, 2004). Основываясь на многолетних судовых наблюдениях и данных вековых разрезов, мы выделили некоторые дополнительные фронтальные зоны: субмеридиональный температурный фронт в Воронке, расположенный в полосе 42°10' – 42°30' в.д. (см. рис. 3 пункт 5). Этот фронт наиболее ярко выражен в зимний период и связан с действием течений в Горле и Воронке. Разница ТПС на Терском и Канинском берегах в январе может составлять 3°C. Также мы выделили еще один стоковый фронт в Горле (он прижимается к Зимнему берегу) и стоковый фронт в Онежском заливе. Все фронты хорошо прослеживаются по температурным данным MODIS (Filatov et al., 2005).

Для характеристики внутрigoдовой изменчивости проведено исследование сезонных тенденций ТПС Белого моря. Наблюдается общее повышение ТПС Белого моря (в среднем 0,5°C за 20 лет). Согласно оценке по линейной модели тренда, оно проявляется в летние месяцы и весной,

а осенью, наоборот, отмечается небольшое понижение температуры в многолетнем ходе. Зимой практически по всем станциям тренда нет, кроме ст. Унский маяк, для ТПС которой ярко выражен положительный тренд во все сезоны, так как южные районы моря получают суммарно большее количество солнечной радиации и, кроме того, еще дополнительно «подогреваются» весной и летом от крупных рек.



**Рис. 3.** Положение фронтальных зон Белого моря (1-соленостная градиентная зона, 2-граница Горла и Бассейна, 3-поверхностные течения, 4-глубинные течения; 5-дополнительные температурные фронты). Цифрами показана соленость, в %.

**Синоптическая изменчивость** Белого моря связана с влиянием прямого атмосферного воздействия, а также с фронтальными и фрикционными синоптическими вихревыми образованиями. По всем гидрометеостанциям Белого моря за весь рассматриваемый период (1977-1999 гг.), с теми или иными региональными отличиями, встречается внутrigодовое распределение ТПС Белого моря с двумя максимумами,

связанное с прямым атмосферным воздействием. Пик температуры во второй половине осени связан с откликом синоптических процессов, воздействующих на поверхностный слой Белого моря, о чем свидетельствует высокий коэффициент взаимной корреляции между ходом ТПС в безледный период (ст. Соловки) и температурой приземного слоя воздуха (ст. Кемь) – 0,81. На частотах, соответствующих периодам 25-33 сут., колебания температуры воздуха и температуры воды имеют высокую когерентность.

Помимо прямого атмосферного воздействия, на поля ТПС Белого моря оказывают влияние синоптические вихревые образования: антициклональные и циклональные круговороты, которые К.М. Дерюгин (1928 г.) назвал, соответственно, «полюса тепла» и «полюса холода». Эти вихри наблюдаются, как правило, в осенний период и связаны, как считают (Солянкин и др., 1994), со сдвигами скоростей на перифериях стоковых течений. Наиболее выражено в Белом море стоковое течение р. Северная Двина, поэтому естественно ожидать проявления вихрей в восточной части Двинского залива. Положение синоптических вихревых образований в Белом море изменяется в зависимости от сезонной интенсивности стока рек и времени прохождения над акваторией моря циклонов (Белое море, 1991).

Путем осреднения данных (см. гл. 2) по каждому району Белого моря была построена карта интегральных показателей ТПС для каждого месяца в году.

С мезомасштабной изменчивостью температуры воды Белого моря связано влияние приливообразующих сил. Исследование мезомасштабной изменчивости ТПС Белого моря проводилось автором в течение трех лет с 2003 по 2005 г. в заливах моря (Двинский, Онежский, Чупинская губа), в устьях рек: Сев. Двина, Онега, Кемь, Кереть. Для мезомасштабной изменчивости характерна следующая закономерность: в зависимости от фазы приливного цикла изменяется суточный ход ТПС. Амплитуда колебаний температуры воды за один приливной цикл может достигать 0,4°C.

Обнаруженная интрузия относительно теплой воды (Голстикова, 2006) является примером мезомасштабной изменчивости ТПС. В период наших измерений (с 27 марта по 9-ое апреля 2004 г.) распределение температуры воды Чупинской губы не полностью соответствовало классическому, характерному для данного сезона (Бабков, 1998). На глубине 4-8 м в период развития приливной волны отмечался относительно теплый слой воды с температурой на 0,2-0,8°C более высокой по сравнению с верхними и нижними слоями (рис. 4).

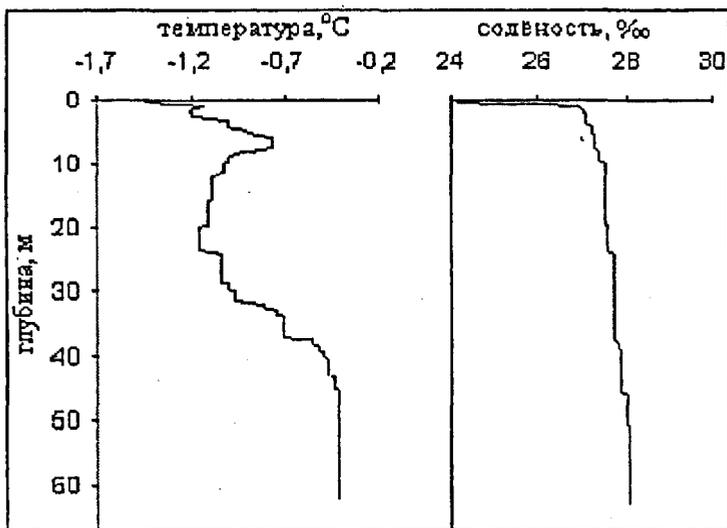


Рис. 4. Пример распределения температуры и солености в период развития приливной волны (губа Чупа, декадная ст. Д-1, 27.03.2004., 15:55).

Наблюдаемые изменения в слое 4-8 метров проявлялись только по температурному показателю и совсем не регистрировались по солености. Объяснением данного явления может служить предположение об имевшей место адвекции тепла от нагретой солнцем воды полыни, замеченной 8-го апреля в устье Чупинской губы с мыса Каргеш и удаленной от станции Д-1 приблизительно на 3 км. Эта относительно теплая вода с приливной волной распространяется подо льдом от полыни в сторону вершины губы. При развитии максимальной скорости приливного течения «теплый» слой постепенно начинает заглубляться; затем, полностью перемешиваясь с соседними нижележащими слоями, он размывается.

Рассмотрев указанные интервалы изменчивости можно сделать вывод, что в целом, изменчивость ТПС северной части Белого моря тесно связана с процессами, происходящими в Баренцевом море, и проявляется здесь практически в одно и то же время или с незначительным сдвигом по фазе. Формирование изменчивости синоптического масштаба формируется под влиянием комплекса термогидродинамических процессов и явлений, которые зависят от особенно-

стей морфометрии моря. Основное влияние оказывает индуцированный прилив, проходящий через Горло в море и формирующий широкий спектр волн Кельвина и Пуанкаре (Семенов, 2004), генерирующих разнообразные фронты и апвеллинги разного генезиса. В южной части Белого моря сильнее сказывается «влияние материка», так как гидрологический режим Онежского и Двинского залива во многом определяется стоком крупных рек: Онега и Северная Двина.

**В четвертой главе «ОЦЕНКА ИЗМЕНЧИВОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВОДЫ БЕЛОГО МОРЯ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КЛИМАТА»** показаны возможные оценки изменчивости температурного режима Белого моря на ближайшие 10-20 лет, описаны особенности этой изменчивости с использованием модели линейного тренда; дана нелинейная оценка внутригодового хода температуры поверхностного слоя воды Белого моря с применением модели; проведен спектральный и вейвлетный анализы. Результаты оценки в рамках линейной регрессионной модели показывают, что средняя многолетняя ТПС Белого моря на ближайшие 15 лет практически останется без изменений.

В целом, согласно оценке по линейной модели тренда, при сохранении современных тенденций изменения климата в исследуемом районе будет наблюдаться повышение ТПС Белого моря, в среднем  $0,4^{\circ}\text{C}/10$  лет.

**Нелинейное оценивание** заключается в применении стохастической модели (Ефремова, Петров, 1992) внутригодового хода ТПС Белого моря; в отличие от предыдущих работ, впервые модель была использована для морского объекта:

$$T = b_6 + b_1 \times \left( 1 - \frac{1 - \exp((t - b_2) \times b_3)}{1 + \exp((t - b_2) \times b_3)} \right) \times \left( 1 + \frac{1 - \exp((t - b_4) \times b_5)}{1 + \exp((t - b_4) \times b_5)} \right),$$

где  $T$  – температура поверхностного слоя воды;  $t$  – время в сутках от начала года;  $b_1$ - $b_6$  – эмпирические параметры, имеющие размерность времени в сутках.

Параметры для каждой станции подбирались отдельно с использованием итерационного квазиньютоновского метода при критерии сходимости равном 0,0001.

Были получены и проанализированы модельные кривые внутригодового хода ТПС Белого моря по 9-ти гидрометеостанциям (рис. 5).

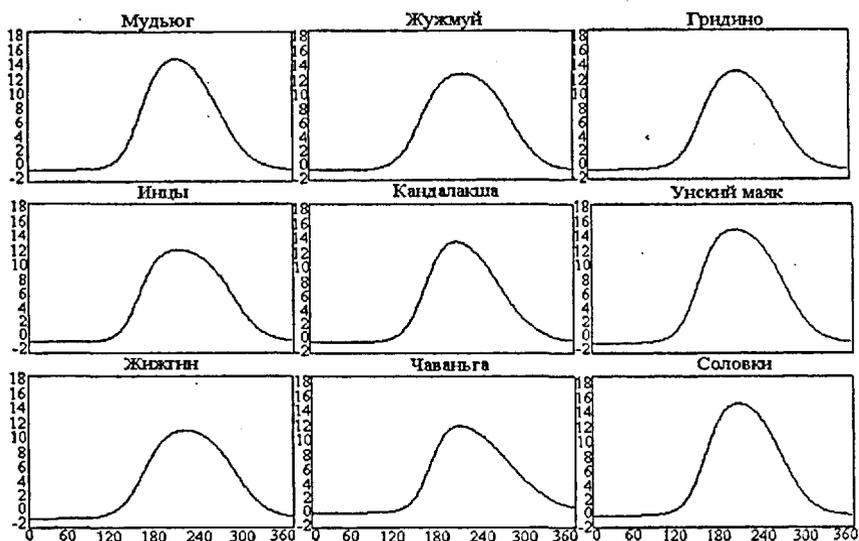


Рис. 5. Модельный ход ТПС Белого моря по девяти станциям (ось абсцисс – сутки от начала года; ось ординат – температура, °С).

Модельная кривая адекватно описывает ход средней многолетней ТПС по данным гидрометеостанций. Таким образом, все значения ТПС, найденные по модельной кривой для каждого момента времени, могут использоваться в качестве средних многолетних оценок, а по модельным кривым годового хода ТПС Белого моря с точностью до заданных интервалов шкалы времени и шкалы температуры можно: находить моменты максимума и продолжительность периода минимума; устанавливать точки перехода через  $0^{\circ}\text{C}$  (или любой другой заданной температуры) весной и осенью; по особым точкам кривой определять момент смены весеннего повышения температуры с возрастанием скорости на повышение с замедлением скорости, а также момент смены осеннего понижения температуры с возрастанием скорости на понижение с замедлением скорости; оценивать продолжительность и характер периодов нагревания и охлаждения воды.

Кроме того, по модельным кривым удобно характеризовать температурный режим «теплых», «холодных» и «средних» лет, используя кривые в качестве «лекала» для графиков внутригодового хода ТПС. Для «теплых» лет модельная кривая относительно годового хода ТПС смещена по оси ординат вниз, и на общем фоне особенно выражено повышение тем-

пературы в весенний и летний сезоны. Время перехода через особые точки кривой отмечается для «теплых» лет раньше по сравнению с другими годами. Для «холодных» лет характерно запаздывание в несколько суток относительно среднего многолетнего хода.

Основываясь на результатах ряда исследований, например работы (Сержаков, 1979), мы осуществили оценку ТПС Белого моря на перспективу, используя характеристику «предзимий». Согласно указанной работе в предзимье (1 октября – 31 декабря) обычно формируются основные черты метеорологических и гидрологических особенностей наступающего года. Методика оценки заключалась в изучении ТПС различных гидрометеорологических станций Белого моря за предзимний период для каждого года. В результате анализа выяснилось, что если в ноябре ярко проявляется сезонное повышение ТПС, то с высокой долей вероятности (табл. 4.1), следующий год будет холодным по предложенной нами методике (см. гл. 3). И наоборот, если осеннее остывание ТПС происходит плавно, без повышенных температуры воды, то наступающий год окажется теплым.

Таблица 4.1. Вероятность события понижения ТПС в следующем году при повышении ТПС в ноябре текущего года.

Станция	Соответствует, %	Не соответствует, %
Гридино	77	23
Жужмуй	62	38
Инцы	81	19
Кандалакша	68	32
Соловки	65	35
Чаваньга	83	17
Мудьюг	74	26
Жижгин	74	26
Унский маяк	70	30

Полученные результаты свидетельствуют о том, что предзимнее состояние ТПС Белого моря может использоваться для расчетов температуры поверхностного слоя воды моря в наступающем году.

Для использования в расчетах изменчивости ТПС Белого моря классических методов Фурье-анализа, все ряды среднесуточных температурных данных по 9-ти станциям за 23 года были приведены к стационарному виду, а полученные ряды нормированы на соответствующие дисперсии. Подобная процедура позволила подсчитать относительный вклад в общую изменчивость в интервалах от межгодовой до синоптической (Белое море, 1991). На основе результатов спектрального анализа мы получили вклад в общую дисперсию составляющих изменчивости ТПС Белого моря (табл. 4.2).

**Таблица 4.2.** Оценка относительного вклада в дисперсию составляющих изменчивости ТПС Белого моря по данным спектрального анализа.

Станция	Изменчивость, %			
	Межгодовая	Сезонная	Внутригодовая	Синоптическая
Гридино	38	38	17	7
Соловки	33	40	20	7
Жужмуй	30	49	16	5
Жижгин	32	54	13	1
Унский маяк	36	36	19	9
Мудьюг	32	42	20	6
Инцы	36	54	9	1
Чаваньга	28	37	25	10
Кандалакша	36	37	23	5

Из табл. 4.2 следует, что большая часть вклада в дисперсию приходится на сезонную и межгодовую изменчивость. Для анализа масштабов синоптической изменчивости мы выделили из имеющихся рядов данных 9-ти гидрометеостанций более высокочастотные составляющие. Применение вычитания модели (Толстиков, Петров, 2004) из среднесуточных значений ТПС Белого моря для этой цели не дало положительных результатов. Наиболее подходящим был признан метод полиномиального скользящего среднего при исключении тренда с третьей степенью полинома. Анализ периодограмм показал, что все спектры синоптической изменчивости имеют сходную форму. Для большинства станций наибольший по энергии пик соответствует периоду 28 суток, что вызвано действием параллактического неравенства приливов. С адвекцией тепла приливной волной, вероятно, связан и период равный 14 суткам.

На основании изученности рассмотренных интервалов изменчивости по результатам спектрального анализа можно сделать вывод, что в формировании температурных полей поверхностного слоя воды Белого моря ведущую роль играют сезонные колебания, вклад которых в общую дисперсию колеблется от 36% до 54%.

Так как согласно принципу Гейзенберга (Дьяконов, 2002) классический Фурье анализ не позволяет одновременно получить высокое разрешение и в частотной, и во временной области, мы применили к имеющимся у нас рядам данных сравнительно новый в гидрометеорологии, но наиболее наглядный для иллюстрирования изменчивости ТПС – **вейвлетный анализ**. Вейвлетная функция локализована и в частотной, и во временной области, то есть одновременно учитывает периодическую состав-

ляющую, тренд и отдельно встречающиеся особенности процесса в конкретный момент времени. Кроме того, для вейвлетного анализа используется исходный нестационарный ряд, что значительно облегчает задачу исследования.

Для ТПС Белого моря по среднесуточным данным применялось вейвлетное разложение на 12 уровней (рис. 6).

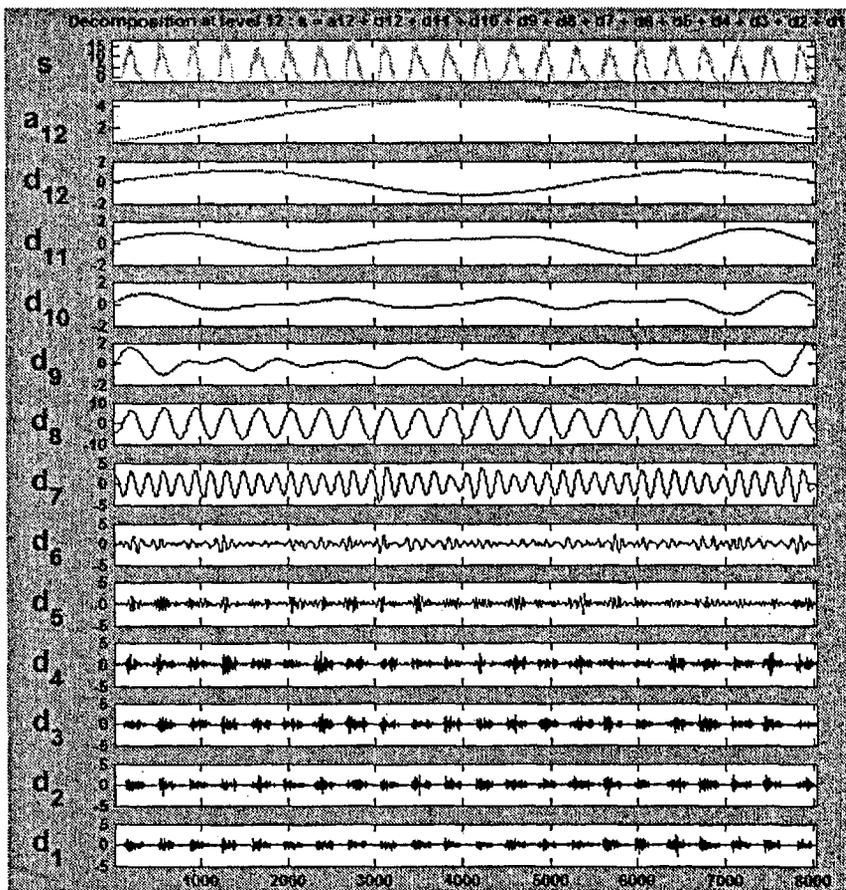


Рис. 6. Графики линейных коэффициентов вейвлет-преобразования для суточных колебаний ТПС Белого моря (ст. Гридино).

По графику линейных коэффициентов вейвлет-преобразования видно, что в ряду ТПС Белого моря по ст. Гридино присутствует положительный тренд (уровень  $a_{12}$ ); на уровне  $d_8$ , соответствующему годовым колебаниям, диапазон изменчивости линейных коэффициентов составляет от -9 до 9, что значительно выше коэффициентов остальных уровней. Это значит, что вклад годовых колебаний в температурную изменчивость поверхностного слоя воды Белого моря максимальный. Вклад внутригодовых колебаний (уровень  $d_7$ ) также значителен, однако он неравноценен на различных участках ряда. Так, наименьшие амплитуды колебаний приходятся на конец 80-х гг. (значение 4000 на оси абсцисс), наибольшие – на середину 80-х (3100) и конец 90-х гг. (7800). Внутригодовые колебания с временными масштабами в несколько месяцев по диапазонам изменчивости линейных коэффициентов сопоставимы с синоптическими колебаниями.

Результаты вейвлетного анализа свидетельствуют о том, что максимальный вклад в общую дисперсию ТПС Белого моря вносит сезонная изменчивость, до 62% (табл. 4.3).

Таблица 4.3. Оценка относительного вклада в дисперсию составляющих изменчивости ТПС Белого моря по данным вейвлетного анализа.

Станция	Изменчивость, %			
	Межгодовая	Сезонная	Внутригодовая	Синоптическая
Гридино	6	56	25	13
Соловки	10	56	22	12
Жужмуй	11	54	24	11
Жижгин	13	55	21	11
Унский маяк	13	45	22	20
Мудьюг	8	44	32	16
Инци	10	62	21	7
Чаваньга	10	46	26	18
Кандалакша	6	53	24	17

Вейвлет-преобразование позволило охарактеризовать вклад в общую дисперсию каждой из составляющих изменчивости ТПС Белого моря.

**В заключении** содержатся основные результаты, полученные в ходе работы, а также выводы. В частности показано, что в ближайшие годы при сохранении современных тенденций изменения климата будет увеличиваться ТПС Белого моря со скоростью  $0,4^{\circ}\text{C}/10$  лет. Построены карты типичных температурных полей Белого моря для каждого месяца года. Установлены характерные колебания ТПС, связанные с приливотливными течениями Белого моря, в отдельных районах губ: Двинской, Онежской, Чупинской.

## Основные выводы, полученные в результате выполненных исследований:

1. Временные ряды среднесуточных данных температуры поверхностного слоя воды Белого моря имеют значимые квазипериодические колебания с временными масштабами 2-4 и 5-7 лет и за рассматриваемый период (1977-1999 гг.) содержат положительные тренды (в среднем  $0,5^{\circ}\text{C}$ ) по всему морю. Рост ТПС Белого моря проявляется в весенний и летний сезоны, а изменений в зимнее время в температуре поверхностного слоя за многолетний период практически не происходит. Для большинства районов Белого моря по многолетним данным осенний тренд отрицательный.

2. Изменчивость ТПС северной части Белого моря тесно связана с гидрофизическими процессами, происходящими в Баренцевом море, и проявляется здесь практически в одно и то же время или с незначительным сдвигом по фазе. Основное воздействие на Воронку, Горло и северную часть Бассейна оказывает течение, приносящее баренцево-морские воды. В южной части Белого моря вместе с приливными эффектами (в особенности в районе Соловецких островов, где наблюдается квазипостоянный апвеллинг) сильнее сказывается влияние процессов, происходящих на водосборе, так как гидрологический режим Онежского и Двинского залива во многом определяется стоком крупных рек Онега и Северная Двина. Локальные особенности температурного режима более четко по сравнению с Онежским заливом выражены в Двинском заливе в районе устья р. Северная Двина и проявляются в том, что здесь наблюдаются более четкие фронтальные зоны разного генезиса.

3. Изменчивость гидрометеорологических параметров Белого моря в рассматриваемом диапазоне характеризуется высоким вкладом низкочастотных составляющих, что указывает на влияние крупномасштабных климатических процессов в формировании долгопериодной изменчивости элементов режима моря.

4. Наибольший вклад в общую изменчивость ТПС Белого моря вносят ее сезонные колебания: по результатам спектрального анализа до 54%, вейвлетного – до 62%.

5. Северо-Атлантическое колебание (САК) оказывает заметное влияние на изменчивость ТПС Белого моря, что проявляется в квазисинхронности этих двух процессов. Периоды максимума и минимума для индексов САК и ТПС Белого моря совпадают по времени наступления. Достаточно высокий коэффициент взаимной корреляции ( $r=0,55$ ) свидетельствует

вует о связи САК и ТПС Белого моря. Роль крупномасштабных процессов превалирует над региональными особенностями отдельных районов Белого моря.

### Основные публикации по теме диссертации

1. Многолетняя изменчивость температурного режима Белого моря // Материалы международной конференции «Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения».

2. Климатические особенности водосбора Белого моря // Климат Карелии: Изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / Отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2004. – С. 114-129 (соавторы Назарова Л.Е., Филатов Н.Н.).

3. Влияние изменений климата на океанографические характеристики // Климат Карелии: Изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / Отв. ред. Н.Н. Филатов. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН. 2004. – С. 130-134 (соавторы Петров М.П., Филатов Н.Н.).

4. О характере природных процессов в фазы прилива и отлива в эстуариях карельского побережья Белого моря // Океанология. 2004. Т.44, № 5, С.1-9 (соавторы Долотов Ю.С., Филатов Н.Н. Петров М.П., Платонов А.В., Шевченко В.П., Новигатский А.Н. Политова Н.В., Филиппов А.С., Кутчева И.П.).

5. Об относительном наносодвижущем эффекте приливов и отливов в эстуариях Карельского побережья Белого моря // Материалы XXI Междунар. береговой конф. «Прибрежная зона моря: морфолитодинамика и геоэкология». Калининград-Светлогорск: Калининградский гос. университет, 7-10 сентября, 2004. С.134-136 (соавторы Долотов Ю.С., Филатов Н.Н., Шевченко В.П., Петров М.П., Платонов А.В., И.П. Кутчева, Политова Н.В., Новигатский А.Н., Филиппов А.С.).

6. Оценка температурного режима поверхностного слоя воды Белого моря // Материалы междунар. конф. «Экологические проблемы северных регионов и пути их решения». Апатиты: ИППЭС, Ч. 1. 2004. С. 78-80.

7. Комплексные океанологические исследования Онежского залива Белого моря // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна. В. 1. Апатиты. Изд. ММБИ. 2004. С. 111-128 (соавторы Филатов Н.Н., Здоровеннов Р.Э.; Петров М.П., Платонов В.Н., Коваленко В.Н. Коросов А.А, Бутримова Н.А.).

8. Белое море: Опыт математического моделирования процессов трансформации соединений органических элементов // Комплексные исследования процессов, характеристик и ресурсов российских морей Северо-Европейского бассейна. В. 1. Апатиты. Изд. ММБИ. 2004. С. 408-436 (соавторы Леонов А.В., Филатов Н.Н., Здорovenнов Р.Э., Здорovenнова Г.Э.).

9. Параметризация внутригодового хода температуры воды в отдельных регионах Белого моря // Материалы VI междунар. конф. «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». Москва: ИВП, 2004. С. 260-263.

10. Стохастическая модель температурного режима поверхностного слоя воды Белого моря // Мат. IX Международной конференции «Проблемы изучения, охраны и рационального использования ресурсов Белого моря» 11-14 октября 2004 г., Петрозаводск, Карелия, Россия. Петрозаводск, 2005. С. 301-304 (соавтор Петров М.П.).

11. Особенности рельефа, поверхностных донных осадков и строения осадочной толщи в различных зонах эстуария реки Кемь (Белое море) // Океанология. 2005. Т.45, № 6, С.927-935 (соавторы Долотов Ю.С., Римский-Корсаков Н.А., Теликовский А.А., Пронин А.А., Новигатский А.Н., Филиппов А.С., Петров М.П., Дунчевский А.С.).

12. Climate of the White Sea catchment scenarios of climate and river runoff changes // White Sea. Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change. Chichester: Springer-Praxis Publishing, 2005. P. 53-72 (соавторы Filatov N.N., Nazarova L.E., Salo Ju.A.).

13. Oceanographic regime // White Sea. Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change. Chichester: Springer-Praxis Publishing, 2005. P. 73-154 (соавторы Filatov N.N., Pozdnyakov D.V., Ingebeykin Ju.I., Zdorovennov R.E., Melentyev V.V., Pettersson L.H.).



Изд. лиц. № 00041 от 30.08.99. Подписано в печать 20.06.06.  
Формат 60 x 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура «Times». Печать офсетная.  
Уч.-изд. л. 1,1. Усл. печ. л. 1,3. Тираж 100 экз. Изд. № 49. Заказ № 593

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

