

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР
ИНСТИТУТ ВОДНЫХ ПРОБЛЕМ СЕВЕРА

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES
KARELIAN RESEARCH CENTER
NORTHERN WATER PROBLEMS INSTITUTE



*Посвящается
Международному полярному году*

Russian Academy of Sciences
Karelian Research Center
Northern Water Problems Institute



**THE WHITE [BELOE] SEA AND THEIR
WATERSHED UNDER INFLUENCES OF
CLIMATE AND ANTROPOGENIC
IMPACT**

Eds. N. Filatov and A. Terzhevik

Petrozavodsk
2007

Российская академия наук
Карельский научный центр
Институт водных проблем Севера



**БЕЛОЕ МОРЕ И ЕГО ВОДОСБОР
ПОД ВЛИЯНИЕМ
КЛИМАТИЧЕСКИХ
И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ**

Под редакцией Н.Н. Филатова, А.Ю. Тержевика

Петрозаводск
2007

УДК 551.46(268.46)+551.465

Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю. БЕЛОЕ МОРЕ И ЕГО ВОДОСБОР ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2007. 349 с.: рис. 138, табл. 46, источн. 207.

Проанализированы географические особенности водосбора, выявлены основные закономерности термогидродинамических процессов и явлений, оценено современное состояние и тенденции антропогенных воздействий на водосборе и изучено поступление биогенов. Для водосбора рассмотрено современное состояние социально-экономического развития региона при новых условиях развития страны после 1991 г. вплоть до 2005 г. и предложены сценарии возможных антропогенных воздействий на водосбор и экосистему моря. Комплекс термогидродинамических и экосистемных моделей был использован для оценки функционирования экосистемы моря и прогноза возможных изменений. Получены оценки возможных изменений в экосистеме Белого моря при антропогенных и климатических изменениях. Расчеты на моделях показали, что как климатические изменения, в том числе и при потеплении климата, так и антропогенные воздействия при оптимистическом сценарии развития региона (увеличение регионального валового продукта) при интенсификации производств и соответствующем возрастании биогенной нагрузки не должны привести к заметным изменениям в экосистеме моря.

Под редакцией Н.Н. Филатова, А.Ю. Тержевика

Рецензенты: д.б.н., проф. Е.П. Иешко, к.т.н. В.Х.Лифшиц

ISBN 978-5-9274-0276-2

© Карельский научный центр РАН, 2007

© Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, 2007

© Карельское отделение Русского географического общества, 2007

Авторы:

Барышев И.А. – к.б.н., ИБ Кар НЦ РАН
Брызгало В.А. – к.х.н., ААНИИ
Дружинин П.В. – к.э.н., Институт экономики КарНЦ РАН
Здоровеннов Р.Э. – к.г.н., ИВПС КарНЦ РАН
Иванов В.В. – к.г.н., ААНИИ
Круглова А.Н. –к.б.н., ИБ Кар НЦ РАН
Комулайнен С.Ф. – д.б.н., ИБ КарНЦ РАН
Литвиненко А.В. – ст.н.с., ИВПС КарНЦ РАН
Максимова М.П. – д.г.н., ВНИРО
Назарова Л.Е. – н.с., ИВПС КарНЦ РАН
Неелов И.А. – к.ф-м.н., ААНИИ
**Савчук О.П. – к.г.н., Стокгольмский и Санкт-Петербургский
Университеты**
Сало Ю.А. – к.г.н., ИВПС КарНЦ РАН
Семенов Е.В. – д.ф-м.н., ИО РАН
Тержевик А.Ю. – к.т.н., ИВПС КарНЦ РАН
Толстикова А.В. – к.г.н., ИВПС КарНЦ РАН
Филатов Н.Н. – д.г.н., проф., ИВПС КарНЦ РАН

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ (Филатов Н.Н., Тержевик А.Ю.)	10
ВВЕДЕНИЕ (Филатов Н.Н.)	13
1. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БЕЛОГО МОРЯ И ВОДОСБОРА (Литвиненко А.В., Толстиков А.В., Филатов Н.Н.)	19
1.1. Основные природные характеристики Белого моря	19
1.2. Водосбор Белого моря	22
2. СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ВОДОСБОРА (Дружинин П.В., Тержевик А.Ю.)	35
2.1. Природные ресурсы	35
2.2. Экономические индикаторы	41
2.3. Уровень жизни населения	50
2.4. Инвестиции	53
2.5. Секторы региональной экономики	54
2.6. Определение и идентификация социально-экологических индексов	67
2.7. Методика прогнозирования социально-экономического развития	78
2.8. Сценарные условия	80
3. КЛИМАТ ВОДОСБОРА И СЦЕНАРИИ ЕГО ИЗМЕНЕНИЙ (Назарова Л.Е., Сало Ю.А., Толстиков А.В., Филатов Н.Н.)	87
3.1. Основные особенности климата	87
3.2. Сценарии изменений климата	105
4. ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДОСБОРА БЕЛОГО МОРЯ (Иванов В.В., Брызгалов В.А.)	119
4.1. Краткая характеристика природных условий и антропогенного воздействия на водосборе Белого моря	119
4.2. Водный баланс и водные ресурсы	126
4.3. Влияние климатических воздействий на гидрологический и гидрохимический режим речных систем	130
4.4. Основные виды загрязнения рек	132
4.5. Антропогенные воздействия на эстуарии	141
5. КАЧЕСТВО ВОД МАЛЫХ РЕК ВОДОСБОРА	146
5.1. Гидрохимия (Максимова М.П.)	146
5.2. Гидробиология (Комулайнен С. Ф., Круглова А.Н., Барышев И.А.)	178
6. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПОЛЕЙ (Филатов Н.Н., Толстиков А. В., Здоровеннов Р. Э.)	189
6.1. Течения, водообмен	189

6.2. Водные массы	197
6.3. Фронты и фронтальные зоны	206
6.4. Изменчивость температуры, солености и уровня моря	218
7. ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ВОД БЕЛОГО МОРЯ ПО РЕ- ЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (Семенов Е.В.)	258
7.1 Физическая и математическая постановки задачи, верификация результатов расчета	258
7.2. Разработка системы оперативного мониторинга гидрологической структуры вод Белого моря	279
7.3. Численные эксперименты по динамике биохимических полей	293
8. МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКОСИСТЕМЫ ПОД ВОЗ- ДЕЙСТВИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТО- РОВ	303
8.1. Термогидродинамическая модель (Неелов И.А.)	303
8.2. Модель экосистемы моря (Савчук О.П., Неелов И.А.)	316
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ	332
ПОСЛЕСЛОВИЕ	335
ЛИТЕРАТУРА	336

CONTENTS

PREFACE (<i>N.N. Filatov, A.Yu. Terzhevik</i>)	10
INTRODUCTION (<i>N.N. Filatov</i>)	13
1. PHISICO-GEOGRAPHICAL FEATURES OF THE WHITE SEA AND ITS WATERSHED (<i>A.V. Litvinenko, A.V. Tostikov, N.N. Filatov</i>)	19
1.1. Main features of the White Sea	19
1.2. The watershed of the White Sea	22
2. SOCIO-ECONOMICAL FEATURES OF THE WATERSHEAD (<i>P.V. Druzhinin, A.Yu. Terzhevik</i>)	35
2.1. Natural resources	35
2.2. Economical indicators	41
2.3. Living standards of population	50
2.4. Investments	53
2.5. Branches of regional economy	54
2.6. Identification of socio-economic indices	67
2.7. Methods of predictions	78
2.8. Possible changes of regional economy and their influence on White Sea ecosystem	80
3. CLIMATE OF THE WHITE SEA WATERSHED AND SCENARIOS OF CLIMATE (<i>L.E. Nazarova, Ju.A. Salo, A.V. Tolstikov, N.N. Filatov</i>)	87
3.1. Main climate features	87
3.2. Climatic scenarios	105
4. HYDROLOGY AND HYDROCHEMISTRY OF WATERSHED (<i>V.V. Ivanov, V.A. Brizgalo</i>)	119
4.1 Hydrological features and anthropogenic impacts on the catchments area	119
4.2. Water balance elements and water resources	126
4.3. Influence of global changes on hydrological and hydrochemical regime of the river systems	130
4.4. Characterization of pollutants in the river runoff	132
4.5. Anthropogenic impacts on estuaries	141
5. WATER QUALITY OF SMALL LIVERY OF WATERS HOY	146
5.1. Hydrochemihy (<i>M.P. Maksimova</i>)	146
5.2. Hydrobiology (<i>S.F. Komulainen, A.N. Kruglova., I.A. Barishev</i>)	178
6. FEATURES OF VARIABILITY OF OCEANOGRAPHICAL PRO-CECCES AND FIELDS (<i>N.N. Filatov, A.V. Tolstikov, R.E. Zdorovenov</i>)	189
6.1. Currents and water exchange	189

6.2. Water masses	197
6.3. Fronts and frontal zones	206
6.4. Variability of water temperature, level and salinity	218
7. MODELING OF DYNAMICAL PROCESSES (Semenov E.V.)	258
7.1 Physical and mathematical basics. Verification of the model	258
7.2. Development of system of operate monitoring of hydrology of the White Sea	279
7.3. Numerical expenments on dynamics of biochemical paramcteis	293
8. MODELING OF THE ECOSYSTEM UNDER ANTROPOGENIC IM- PACTS AND CLIMATE	303
8.1. Thermohydrodynamical model (I.A. Nelov)	303
8.2. Sea ecosystem model (O.P., Savchuk& I.A. Neelov)	316
CONCLUSIONS (N.N. Filatov and A.Ju. Terzhevik)	332
AFTERWORD	335
REFERENCES	336

ПРЕДИСЛОВИЕ

В основу монографии по изучению Белого моря и водосбора положены исследования ИВПС КарНЦ РАН последних десяти лет, выполненные совместно с коллегами из ряда организаций России (ААНИИ, ИО РАН, Санкт-Петербургский университет, ИЭ КарНЦ РАН, ИБ КарНЦ РАН, ВНИРО). В настоящей работе мы ставили перед собой задачу подойти к вопросу изучения моря и его водосбора как эколого-социо-экономической системы. Ряд важных вопросов по гидробиологии и гидрохимии самого моря здесь не рассматривался, так как они подробно изучаются Зоологическим институтом РАН, ММБИ КНЦ РАН, МГУ, ВНИРО, ГОИН, Севгидрометом и другими организациями. При разработке модели экосистемы моря мы воспользовались имеющимися знаниями о химико-биологических особенностях моря (Berger et al., 2001; Гидробиология и гидрохимия..., 1991).

В настоящей монографии рассмотрены закономерности изменчивости климата и океанографического режима моря по данным, собранным ИВПС КарНЦ РАН, а также полученным на сети Росгидромета вплоть до 2005 г.; исследованы социально-экономические проблемы региона. В работе представлены новые разработки математических моделей термогидродинамики и экосистемы моря. В, частности, д.ф.-м.н. Е.В. Семеновым (ИО РАН) предложены новые подходы к разработке системы оперативного мониторинга моря (СОМ), а к.ф.-м.н. И.А. Нееловым (ААНИИ) и к.г.н. О.П. Савчуком (Санкт-Петербургский и Стокгольмский университеты) на математических моделях проведены новые исследования экосистемы моря для изучения реакции экосистемы моря на антропогенные и климатические изменения. В численных экспериментах по моделированию многолетнего хода экосистемы использовалась созданная И.А. Нееловым гидротермодинамическая модель с учетом ледяного покрова (см. Климат Карелии, 2004; Neelov&Savchuk, 2005: см. в кн. Filatov et al., 2005) и более полная по сравнению с ранее использованной в работе (Filatov et al., 2005) версия биогеохимической модели О.П. Савчука (см.: Savchuk, Wulff, 2007). В сценарных расчетах на моделях экосистемы моря используются сведения об изменчивости гидрологического режима и климата водосбора, а также сведения о социально-экономическом развитии региона, которые отражаются на состоянии окружающей среды, влияют на поступле-

ние биогенных и загрязняющих веществ с водосбора в Белое море, т.е. определяют особенности развития процесса эвтрофирования моря. В модельных сценариях используются сведения об изменениях климата на водосборе, которые учитываются при задании атмосферных воздействий и стока рек, впадающих в водоем. Изменения климата на водосборе изучены по данным длительных измерений, а сценарии изменения климата на перспективу получены по данным численных экспериментов на модели глобального климата ЕСНАМ4/ОРУС3. Таким образом, сведения, полученные в первых шести главах, используются в математическом моделировании экосистемы при воздействии антропогенных и климатических факторов.

В книге приведены также некоторые результаты, полученные ИВПС КарНЦ РАН ранее в предыдущих проектах. Исследования Белого моря и водосбора с использованием дистанционных методов, которые также проводились ИВПС, приведено в ранее изданных монографиях. Кроме того, в издательстве Springer-Praxis готовится к печати монография по применению дистанционных методов в рамках проекта ИНТАС «Synergy», и в связи с этим в настоящей работе мы не включаем результаты исследований ИВПС КарНЦ РАН по этому направлению.

Белое море в начале XXI века продолжает вызывать значительный интерес со стороны отечественных и зарубежных исследователей. За последние несколько лет был опубликован ряд книг о нем (Berger et al., 2001; Berger et al., 2003; Климат Карелии., 2004; Filatov et al., 2005; Житний, 2007).

В настоящее время вышел из печати новый том издания по результатам исследований Белого моря, проводимых в рамках проекта ФЦП «Мировой океан» (руководитель – академик Г.Г. Матишов). В Институте океанологии РАН под руководством академика А.П. Лисицына функционирует постоянно действующий семинар «Система Белого моря», готовится обобщающая монография.

Уже много лет проводятся гидробиологические исследования Белого моря (ЗИН РАН под руководством акад. А.Ф. Алимова и проф. В.Я. Бергера); комплексные исследования геологических, гидрофизических и химико-биологических процессов в эстуариях Белого моря (ИВП РАН, ИО РАН и ИПВС КарНЦ РАН в рамках проектов РФФИ 03-05-64079; 03-05-64079а), руководитель – чл.-корр. РАН Ю.С. Долотов, а также в МГУ и ИО РАН в рамках тематики фундаментальных исследований. Закончена работа по проекту ИНКО-Коперникус (ISA2-2000-10014), координатор – проф. О. Иоханнесен, Норвегия. Выполнена работа по-другому

проекту ИНКО под руководством проф. Э. Рахора, Германия. Разнообразные исследования осуществляются также ААНИИ, ВНИРО, ГОИН, ИЭПС УрО РАН, РГГМУ, НИЦЭБ РАН, СПб ГУ и МГУ им. Ломоносова.

При подготовке настоящей книги использовались некоторые данные, полученные по программам ФЦП «Мировой океан» и ИНКО-Коперникус (ИСА2-СТ-2000-10014), РФФИ (проекты 03-05-64079; 03-05-64079а). Гидрометеорологические сведения были приобретены в Мировом центре данных (МЦД, гор. Обнинск). Данные по температуре и солености воды любезно переданы нам Зоологическим институтом РАН. Мы благодарны всем, кто предоставил в наше распоряжение данные, отмечаем важную роль руководителей проекта «Белое море» академик А.Ф. Алимova, проф. В.Я. Бергера, а также координаторов этого проекта А.П. Алексеева и В.Г. Кулачкову, которые привлекли нас – сотрудников ИВПС КарНЦ РАН – к активным исследованиям Белого моря. Отмечаем академика А.П. Лисицына (ИО РАН) и член-корр. РАН Ю.С. Долотова (ИВП РАН), сотрудничество с которыми в последние десять лет было очень продуктивным. Мы благодарны за совместную работу коллегам из ММБИ, ИЭ КарНЦ РАН, ИБ КарНЦ РАН, ААНИИ, Международного центра окружающей среды и дистанционных методов им. Нансена, ИВМ РАН, ИПЭС Уральского отделения РАН, СПбГУ, МГУ им. Ломоносова. Выражаем свою признательность руководителю центра морских экспедиций РАН академику Г.В. Смирнову за постоянную поддержку в обеспечении работы нашего научно-исследовательского судна. Отмечаем отличную работу всей команды НИС «Эколог» и персонально В.Н. Коваленко, который организовал все экспедиции на судне.

Мы благодарны рецензентам книги профессору, д.б.н. Е.П. Иешко и к.т.н. В.Х. Лифшицу за полезные советы, а также М.В. Богдановой и Р.Э. Здорвеннову за помощь при подготовке рукописи.

Настоящая монография написана по результатам исследований по программе фундаментальных исследований ОНЗ РАН «Трансформация экосистемы Белого моря и его водосбора в результате антропогенного воздействия и колебаний климата, частично по проекту ФСП «Мировой океан» и в рамках проекта РФФИ (грант 06-05-64728-а).

ВВЕДЕНИЕ

В наступившем тысячелетии Белое море привлекает все большее внимание как исследователей, так и пользователей. Это связано с новым этапом освоения ресурсов самого моря и его водосбора (транспортировка природного газа со Штокманского месторождения Баренцева моря в Западную Европу, добыча золота, рыбы, алмазов, выращивание марикультур, и, следовательно, возможно существенное изменение всей инфраструктуры, развитие новых производств). При этом отмечаем современный спад в рыбной отрасли Беломорья, в определенной степени связанный не с природными процессами в Белом море, а с изменившимися социально-экономическими условиями в стране, введением системы квот на вылов морепродуктов, не выгодной местным рыбакам (Житний, 2007). Необходимо также отметить большой интерес к этому региону Швеции, Норвегии и Финляндии, вместе с российскими регионами образовавшими Евро-Баренц Регион, центром которого становится Белое море. В соответствии с современными декларациями Правительства РФ, вероятно, в ближайшие годы возрастет роль Беломорско-Балтийского канала, связывающего Балтийское, Каспийское и Черное моря с Арктикой. При этом увеличится значение самого Белого моря как транспортной артерии. Все указанные выше мероприятия вместе с традиционными, такими как использование биоресурсов моря, вырубка лесов на водосборе, воздействие предприятий целлюлозно-бумажной промышленности, сбросы сточных вод городов, расположенных на берегах и водосборе, потребуют разработки на новой основе научных рекомендаций рационального использования, управления и охраны ресурсов моря.

Беломорье в историческом плане – уникальный регион России, в котором на протяжении веков удачно сочетались различные направления хозяйствования, опиравшиеся на использование разнообразных природных ресурсов (в том числе запасов рыбы и морских млекопитающих, пушного зверя, древесины и других природных ресурсов, сельскохозяйственное производство и животноводство), торговлю ими внутри региона, вывоз в другие районы страны и за рубеж (Алексеев и др., 2001). Белое море долгие годы совместно эксплуатировалось русскими поморами и норвежцами, оно соединялось торговыми путями с зарубежными странами. Все это

создавало хорошие предпосылки для достаточно обеспеченного, по сравнению с другими регионами России, существования населения. Однако в последние 10–15 лет для населения Беломорья возникли определенные проблемы, связанные с традиционным занятием населения – выловом рыбы. Из региона в Мурманск была переведена Беломорская база лова, заметны тенденции падения промышленного и сельскохозяйственного производства. Последнее должно благоприятно сказываться на экосистеме моря. Однако в регионе не достаточно проводится мероприятий по совершенствованию системы очистки сточных вод, поступающих на водосборе и в море, модернизации технологии производства, что сказывается на экосистеме.

В 1970–1980 гг. изучению Белого моря в связи с интенсивным освоением его ресурсов уделялось достаточно много внимания в рамках таких программ, как «Мировой океан», «Изучение океанов и морей Арктики и Антарктики», «Моря СССР» и др. В результате фундаментальных исследований были подготовлены обобщающие монографии и атласы (Бабков, 1998; Белое..., 1995; Гидрометеорология..., Вып.1, 1991; Гидрометеорология..., Вып.2, 1991; Комплексные..., 1994; Океанографические..., 1991). Исследования Белого моря за счет государственных программ РФ, например по ФЦП «Мировой океан», за последние десять лет несколько сократились, но вместе с тем заметно расширились исследования моря за счет международных проектов ИНТАС, ИНКО-Коперникус, а также ряда других программ, например, РФФИ.

В результате комплексных исследований, проводившихся с 1981 г. в рамках государственного проекта "Белое море" (координатор – Зоологический институт РАН), были разработаны научные основы повышения промысловой биопродуктивности Белого моря и выполнена на практике проверка полученных научных рекомендаций. Было показано, что, несмотря на полуарктический характер, Белое море обладает целым рядом специфических особенностей, включая и достаточно чистую воду, благоприятствующих развитию марикультуры (рыбы, мидии, водоросли). Совершенно очевидно, что в настоящее время наряду с добычей биоресурсов, развитием транспорта, освоением алмазных и газоконденсатных месторождений, определенное место должны занять проблемы использования уникального рекреационного потенциала моря для привлечения туристов, рыбаков из России и зарубежных стран.

Основной объем проводимых исследований Белого моря посвящен экспериментальным, экспедиционным исследованиям. Несмотря на принятые ранее многими организациями усилия, только в последние

5–7 лет удалось внедрить модели для описания функционирования экосистемы Белого моря и ее изменений в зависимости от внешних факторов, был разработан необходимый комплекс термогидродинамических (Семенов, 2004; Семенов и др., 1999; Неелов, 2003) и экосистемных моделей (Михайловский и др., см. гл. 7 наст. книги; Леонов и др., 2004, Неелов, Савчук и др., 2004, Filatov et al., 2005). До сих пор недостаточно изучены процессы переноса и трансформации вещества в море, водообмен в особенности через Горло, между Белым и Баренцевым морями, влияние изменений климата и антропогенных факторов на экосистему моря.

Отметим огромный вклад в исследование моря, который внесли многие научные коллективы по программам «Моря СССР» (ГОИН) и «Мировой океан» (Зоологический институт, руководители – академики Э.А. Скарлато, А.Ф. Алимов, профессор В.Я. Бергер). До сих пор многие данные, в том числе полученные на сети Росгидромета, не полностью доступны широкому кругу пользователей или передаются подразделениями Росгидромета на коммерческой основе. При выполнении проектов и подготовке этой книги ИВПС КарНЦ РАН были приобретены необходимые данные, которые сведены в единую базу данных.

В качестве важного фактора, способствующего развитию Беломорья, следует рассматривать большую концентрацию на берегах моря научных сил, способных оказать необходимую помощь как при разработке планов развития региона, так и при их реализации.

Особое внимание исследователей должно уделяться изучению факторов, определяющих основные особенности режима моря, в особенности приливов, корректной оценке водообмена, адвекции тепла и солей за счет Баренцевоморского течения, мезомасштабным явлениям, когерентным структурам, апвеллингам, захваченным волнам, нелинейным эффектам, оценке экологического состояния прибрежной зоны, эстуариев.

Важным является изучение так называемых маргинальных фильтров или «биогидрохимических барьерных зон» эстуариев Белого моря (Лисицын, 1994, 2003; Скибинский, 2000). Более подробно этот вопрос будет обсуждаться нами в рамках программы ФЦП «Мировой океан» (рук. академик Г.Г. Матишов). Считается, что образующаяся зона конвергенции частично изолирует глубокую центральную часть моря от влияния прибрежья, эстуариев, сохраняя более чистыми воды Бассейна. Поэтому наряду с целостным системным подходом к исследованию всей экосистемы моря, необходимо всестороннее изучение экосистем многочисленных губ, эстуариев, которые играют важнейшую роль в формировании и функционировании его экосистемы. Экосистемный подход к исследованию губ, заливов,

эстуариев чрезвычайно важен как в научных, так и в практических целях (например, при разведении марикультур, которые успешно здесь выращивались в начале 1990-х годов). Следует подчеркнуть, что только полноценные комплексные исследования, включающие изучение формирования пула органического вещества, продукционно-деструкционных процессов, всех форм биогенных элементов, фитопланктона и т.д., могут быть достаточно результативными.

Необходимо изучение изменчивости функционирования экосистемы Белого моря под влиянием антропогенных воздействий. Для того, чтобы оценить возможное воздействие антропогенных факторов, необходимо правильно выбрать т.н. контрольный период, когда море было мало подвержено сильному воздействию человека. Отправной точкой могут быть материалы, характеризующие состояние экосистемы Белого моря в 1950–1960-е годы, когда техногенный пресс еще не был масштабным, способным внести значимые изменения. Этот период можно условно отнести к «фоновому» (Максимова, 1991). Комплексные исследования Белого моря, выполненные в 1956 и 1982 гг., показали увеличение содержания органического вещества в его водах за 25-летний период интенсивного антропогенного воздействия: средневзвешенное содержание $C_{орг}$ его возросло от 3.0 до 4.7 мг·л⁻¹ (Максимова, 2001). Были отмечены негативные изменения при загрязнении нефтепродуктами и промышленными стоками устьев крупнейших, в том числе нерестовых, рек, при поступлении биогенных веществ, способствующих эвтрофированию. В биоте моря также замечено уменьшение доли моллюсков и увеличение многощетинковых червей, изменение соотношения мидий и морской звезды, неблагоприятные изменения в структуре стад семги (Алимов, 2001; Белое море. Биологические ресурсы и проблемы, 1995; Комплексные исследования экосистемы, 1996). Но нельзя рассматривать любые случаи массовой гибели различных беломорских растений и животных как результат антропогенного воздействия (Житний, 2007). В данной работе упомянуты известные случаи гибели zostеры в 1960 году, массовый выброс морских звезд в 1990 году на Летнем берегу Двинского залива, которые не связаны с антропогенным фактором, а обусловлены комплексом термогидродинамических условий. Собственно антропогенную природу имели факты подрыва запасов основных промысловых объектов из-за «перелова» и др. причин.

Исследование Белого моря имеет также важное научное значение в рамках программы изучения Арктических морей, поскольку оно представляет собой относительно небольшой, полузамкнутый водоем, для

которого достаточно просто, по сравнению с другими морями Арктики, можно:

- оценить баланс вещества и энергии;
- изучить потоки энергии и вещества на основных границах моря;
- разработать комплекс моделей для диагностирования и прогноза развития экосистемы;
- оценить изменения в экосистеме, обусловленные естественными и антропогенными факторами.

Кроме того, представляется важным:

- исследовать изменчивость жидкого и твердого стока в море;
- уточнить тепло- и массообмен Белого и Баренцева морей по данным новых спутниковых и контактных наблюдений;
- определить продуктивность моря по данным синхронных спутниковых и контактных измерений;
- оценить в перспективе влияние намечаемого строительства предприятий на водосборе на экосистему прибрежной зоны и моря в целом.

В настоящую книгу включены исследования, которые проводил Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН с другими организациями России и зарубежных стран в рамках программ фундаментальных исследований ОНЗ РАН, Федеральной целевой программы «Мировой океан» (2003–2006 гг.), грантов РФФИ, а также по ряду международных проектов. В результате выполненных исследований были созданы базы данных для оценки современного состояния и прогноза будущих изменений экосистемы Белого моря при антропогенных и климатических изменениях, которые доступны в настоящее время для широкого круга исследователей и практиков, в том числе и для лиц, принимающих решения. Ряд данных представлен на сайте ИВПС КарНЦ РАН (<http://nwpi.krc.karelia.ru>). Продолжается разработка комплекса термогидродинамических и экосистемных моделей для оценки функционирования экосистемы моря и прогноза возможных ее изменений с учетом такого важного фактора, как интенсивные приливы.

Для оценки изменения экосистемы моря при антропогенных и климатических воздействиях был выполнен:

- сбор и анализ многолетних гидрометеорологических данных, полученных на сети Росгидромета в районе Белого моря и в ходе работ академических институтов;
- вероятностный анализ длительных наблюдений для оценки изменчивости климата региона;
- сравнение данных расчетов на модели и наблюдений на опорной сети;

- анализ полученных на модели результатов для разных сценариев изменений климата;
- оценка изменений экосистемы моря при определенных социально-экономических сценариях.

В ходе исследований были сформулированы сценарии социально-экономического развития бассейна Белого моря, дана оценка возможных изменений в его экосистеме как отклик на колебания внешних воздействий, выработаны рекомендации по рациональному использованию ресурсов Белого моря и его водосбора. Разработка рекомендаций по оптимизации управления природными ресурсами региона позволит повысить эффективность мероприятий по улучшению качества водной среды, возрождению региона, а также по снижению последствий чрезвычайных антропогенных экологических ситуаций.

Глава 1

ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БЕЛОГО МОРЯ И ЕГО ВОДОСБОРА

1.1. Основные характеристики Белого моря

Морфометрические особенности Белого моря и его донный рельеф определяют важнейшие черты океанографического режима – внутренний водо-, соле- и теплообмен и течения, водообмен с Баренцевым морем, формирование водных масс и фронтальных зон, ледовый режим, функционирование экосистемы.

Границей Белого моря принято считать линию: м. Святой Нос ($68^{\circ}09'$ с.ш.) – м. Канин Нос ($68^{\circ}40'$ с.ш.) (Добровольский и др., 1982), хотя ранее Воронку по своему гидрологическому режиму относили к заливу Баренцева моря (Дерюгин, 1923). Площадь Белого моря равна 91 тыс. км² (Лочия Белого моря, 1983). На долю островов приходится 0.8 тыс. км². Средняя глубина – 67 м, максимальная – 340 м в районе мыса Турьего (Кандалакшский залив). Объем воды, заполняющей котловину Белого моря, составляет 5400 км³, длина береговой линии равна 5.1 тыс. км. Наибольшая протяженность моря от мыса Канин Нос до устья р. Кеми – 600 км, максимальная ширина (между г. Архангельск и г. Кандалакша) – 450 км. Белое море имеет довольно сложную конфигурацию с многочисленными заливами и островами. Выделяют четыре крупных залива (рис. 1.1): Двинский, Онежский, Кандалакшский, Мезенский, которые, по сложившейся на Севере традиции, называют губами. Сильнее всего изрезаны берега Кандалакшского залива.

Воронка является самым крупным районом Белого моря. Она открывается в Баренцево море и ее северная граница совпадает с границей самого моря: линия м. Канин Нос – м. Святой Нос. На юге Воронку ограничивают с одной стороны устье р. Поной и м. Воронов, а с другой – м. Воронов и м. Конушин. Северная граница Мезенской губы проходит по о. Моржовец, а пределы самой губы ограничиваются Абрамовским и Конушинским берегами.

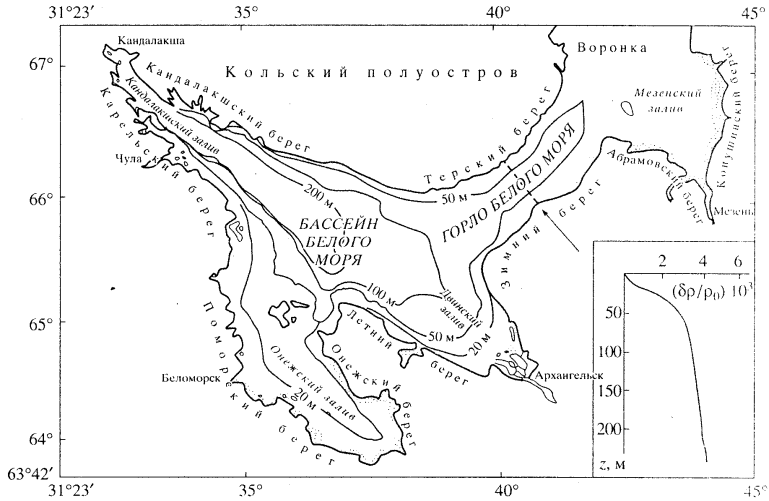


Рис. 1.1. Районирование Белого моря. На врезке показано распределение плотности воды в Бассейне

Морфометрические характеристики районов представлены в табл. 1.1 (Бабков, 1998).

Таблица 1.1

Морфометрические характеристики Белого моря

Районы	F, тыс. км ²	W, км ³	h _{ср.} , м
Воронка	24.6	855	34
Горло	10.2	380	37
Бассейн	21.8	2725	125
Мезенский залив	5.6	75	13
Кандалакшский залив	6.5	710	109
Онежский залив	12.3	235	19
Двинский залив	9.6	420	49

Горло – относительно узкий пролив с максимальной шириной 45–55 км. На северо-востоке он примыкает к Воронке, а с другой стороны (на юго-западе) ограничивается линией пос. Тетрино (относительно близко от м. Никодимский) на Терском берегу – м. Зимнегорский на Зимнем берегу. Берега Горла ровные, островов мало, самые крупные – Сосновец и Данилов. Бассейн ограничивается линиями, отделяющими заливы

Двинский, Онежский и Кандалакшский. Берега Бассейна изрезаны слабо, островов мало.

Кандалакшская губа – самый глубокий залив. Берега ее сильно изрезаны, острова многочисленны и объединены в архипелаги: Северный, Керетский, Лувеньгские шхеры, Средние Луды и другие. Самым большим является остров Великий, прикрывающий вход в крупнейшую лагуну моря – Бабье Море. Вершина Кандалакшской губы относительно мелководна, глубины не превышают 50 м. Эта часть губы носит собственное название Кандалуха.

Южная часть Белого моря – Двинская и Онежская губы. Двинская губа заключена между Летним и Зимним берегом. В его кут впадает крупнейшая река бассейна Белого моря – Северная Двина. Островов много, самый крупный – Мудьюгский. Он закрывает собой обширную лагуну – Сухое Море.

Онежская губа самая мелководная (средняя глубина – около 20 м), отделяется на севере линией, проходящей через Соловецкий архипелаг. Островов здесь много – Онежские, Сумские и Кемские шхеры, самые крупные – Большой и Малый Жужмуй.

Восточное побережье моря является частью Русской платформы и имеет небольшие высотные отметки. Южная часть побережья сформирована четвертичными отложениями. Западный берег и острова сложены метаморфическими породами, в основном гранито-гнейсами. На северо-западе, в районе Кандалакшской губы, рельеф имеет тектоническое происхождение.

На Белом море много островов, которые расположены, в основном, в Онежском и Кандалакшском заливах. Самые крупные из них – Соловецкие, находящиеся между Онежским заливом и Бассейном. Также много островов имеется в Двинском заливе, большинство из которых находится в дельте р. Северная Двина.

Рельеф дна Белого моря имеет сложный характер (рис.1.1). Самые глубокие части – Бассейн и Кандалакшский залив. Главная впадина Бассейна в виде широкого желоба тянется с северо-запада на юго-восток и составляет главную ось моря. Его глубина более 100 м. Юго-восточная оконечность желоба образует Двинский залив. В районе мыса Турьего, относящегося к Кандалакшскому заливу, глубина желоба достигает максимальной величины – 340 м. На дне Онежского залива протягивается неглубокий желоб, параллельный главной оси. Несмотря на впадину, дно Онежского залива несколько приподнято над соседними участками. Северная часть моря наиболее мелководна. Мелководность Горла оказывает значительное влияние на весь гидрологический режим моря. Глубины

Воронки и Мезенского залива также незначительны (до 40–50 м). Для большей части дна характерны цокольные и донные равнины. Донной равниной является Кандалакшская впадина. Она лежит значительно ниже уровня шельфа и отделена бортами крупных разломов от остальной части, являясь, таким образом, суббатиальной. Дно и борта Кандалакшской впадины изобилуют выходами докембрийских пород и разломами. Бассейн, как и заливы, представляет собой аккумулятивную равнину, а Соловецкий архипелаг – денудационную возвышенность. В морфоскульптуре преобладают шхеры, ваараки, бенчи. Восточная и западная части существенно отличаются в геологии, геоморфологии и седиментации, что оказывает существенное влияние на гидрологический режим всего водоема.

Таким образом, котловина Белого моря имеет сложное строение, а наличие нескольких губ, заливов определяет особенности океанологического режима и формирования экосистемы.

1.2. Водосбор Белого моря

Общая площадь водосбора Белого моря составляет 720 тыс. км², из них более 714 находится на территории Российской Федерации (рис. 1.2). Его протяженность – свыше 1000 км с севера на юг и около 900 км с запада на восток. На территории бассейна находится несколько географических зон – от тундры до южной тайги. Как следствие этого, на водосборе моря наблюдается значительное разнообразие природных, в том числе климатических условий.

В геологическом аспекте бассейн Белого моря занимает северо-восточную часть Балтийского щита и северную окраину Русской равнины. Разнородное геологическое строение и тектонический режим привели к формированию различных морфоструктур. В пределах границы водосбора встречаются цокольные и пластовые равнины, глыбовые горы. Котловина моря образована сбросами. Восточная часть Балтийского щита сформировалась в архее, нижнем и среднем протерозое. В раннем протерозое архейский фундамент дробился на блоки: Карельский, Кольский, Беломорский, Мурманский. Северо-западный кристаллический горст ограничен сбросами, которые имеют продольное и поперечное распространение. Все блоки отличаются значительной подвижностью. Их движение связано с изогляциостатической разгрузкой после таяния ледника. К погружающимся районам относится вся восточная часть бассейна: берег от мыса Канин Нос до устья р. Сев. Двины, берега Онежского залива и

восток Кольского п-ова. Максимум опускания наблюдается в Двинском заливе и Горле (13 м за послеледниковое время). Поднятие характерно для северной части (р. Ковда поднимается на 4.5 мм за год). Из-за глубокого строения коры Балтийского щита скорость его поднятия уменьшается от центра к периферии, причем скачкообразно. С движением блоков также связана и сейсмическая активность, проявляющаяся в пределах Кандалакшского залива (Гидрометеорология..., Вып. 1, 1991).

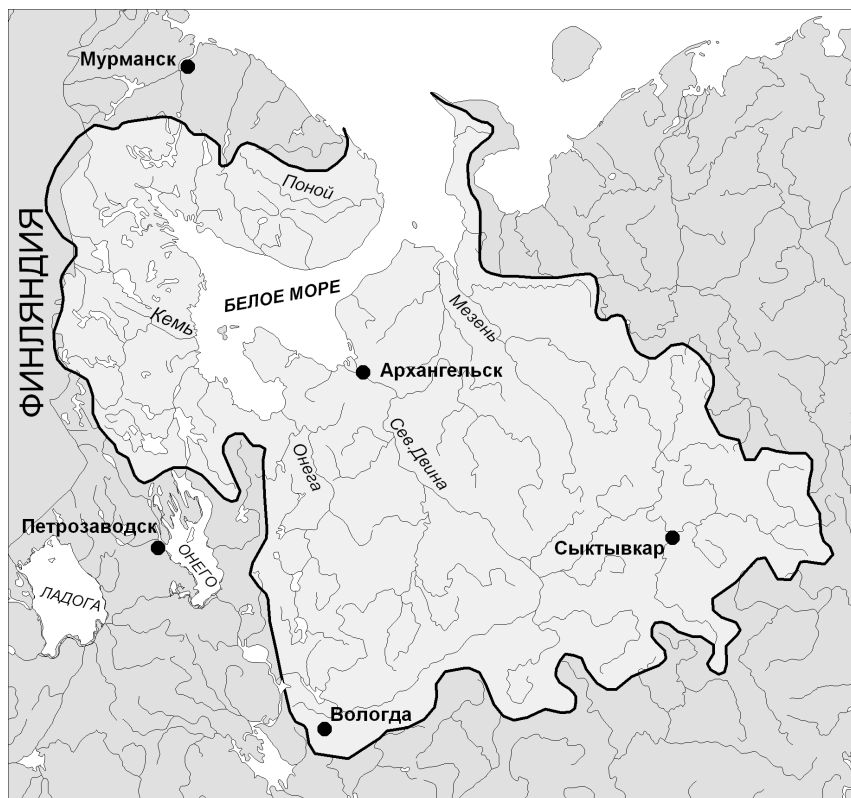


Рис. 1.2. Физико-географическая карта-схема водосбора Белого моря

Водосбор Белого моря включает в себя значительную часть площади пяти субъектов Российской Федерации (Архангельской, Мурманской и Вологодской областей, Республик Карелия и Коми). Кроме того, в его

значительном удалении от моря небольшие по площади территории, не оказывающие практически никакого влияния на морскую экосистему (все остальные административные единицы).

Т а б л и ц а 1.2

Территориальные единицы, находящиеся в пределах бассейна Белого моря

Регион	Общая площадь, 10 ³ км ²	Площадь в пределах бассейна Белого моря		Доля от общей площади бассейна, %	Население, тыс. чел., 2002 г.
		10 ³ км ²	% от территории региона		
Архангельская область	410.7	302.1	73.6	41.9	1294.2
Ненецкий авт. округ	176.7	9.1	5.1	1.3	41.5
Мурманская область	144.9	78.4	54.1	10.9	893.3
Республика Карелия	172.4	89.3	51.8	12.4	716.7
Республика Коми	415.9	142.7	34.3	19.8	1019.0
Вологодская область	145.7	78.3	53.7	10.9	1270.0
Кировская область	120.8	12.9	10.7	1.8	1503.6
Пермский край	193.5	1.3	0.8	0.2	2824.4
Костромская область	60.1	0.2	0.3	0.0	737.5
Финляндия	337.0	5.7	1.7	0.8	
Всего		720.0		100.0	
Российская Федерация	17075.0				145167.0
Доля от территории РФ		4.2			

В данной монографии основное внимание будет уделяться административным единицам первой группы, по которым будут даваться отдельные разделы. Для второй группы будет даваться некоторая характеристика только в общих разделах. Третья группа не рассматривается.

Ниже приводится краткая физико-географическая характеристика основных административных единиц, находящихся на территории водосбора Белого моря.

1.2.1. Республика Карелия¹

Территория расположена на Северо-Западе Европейской части России, между 61° и 67° с.ш. (протяженность с севера на юг около 650 км) и между 30° и 38° в.д. (наибольшая протяженность с запада на восток около 400 км). Занимаемая площадь с учетом карельских частей акваторий Ладожского и Онежского озер составляет 172.4 тыс. км², без них – 155.9. На северо-востоке омывается Белым морем, на юге и юго-востоке –

¹ Раздел подготовлен с использованием материалов: Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 2. Карелия и Северо-Запад. Ч. 1. Л., 1972. 528 с.

Ладожским и Онежским озерами. На севере граничит с Мурманской областью, на востоке – с Архангельской, на юге – с Вологодской и Ленинградской областями.

В геологическом отношении Карелия является восточной окраиной Балтийского (Фенноскандинавского) кристаллического щита – области распространения преимущественно древнейших кристаллических пород архейско-протерозойского комплекса. Они перекрыты тонким слоем четвертичных отложений, представленных сложным комплексом ледниковых (в основном), межледниковых и послеледниковых отложений. Их мощность колеблется от 0 до 110–130 м (максимальные значения отмечаются в крайней южной части).

Главные элементы рельефа обусловлены сочетанием древних тектонических процессов с денудацией и аккумуляцией четвертичного периода, важнейшим событием которого были мощные материковые оледенения. Основное влияние на формирование современного рельефа оказало последнее из них – Валдайское, закончившееся только 10-11 тыс. лет назад. Двигавшийся со Скандинавии ледник принес и отложил большие объемы несортированных обломков горных пород (морены). В результате сформировался очень специфический чрезвычайно расчлененный грядово-холмистый рельеф с абсолютными отметками, не превышающими 200 м. Только на крайнем северо-западе они достигают почти 600 м (г. Нуорунен – 577 м). Деятельность ледника и ледниковых вод придавала особый облик доледниковому рельефу, не меняя его главных черт. В частности, сохранились результаты вертикальных тектонических движений, сопровождавшихся поднятиями и опусканиями земной коры. В то время образовались котловины Ладожского, Онежского и других озер, Белого моря, в трещинах и разломах возникли речные долины.

Климат Карелии – умеренно континентальный с чертами морского. Он характеризуется продолжительной мягкой зимой и коротким прохладным летом, значительной облачностью и неустойчивой погодой в течение всего года. Среднегодовая температура воздуха изменяется от нуля на севере до +3°C на юге. Самый холодный месяц – январь (–12–13°C в северной части, –9–10°C – в южной). Понижение температуры до –50°C наблюдается один раз в 80–100 лет. Самым теплым является июль (14–15°C на севере республики и 16–17°C – на остальной территории). Абсолютный максимум температуры воздуха составил +36°C.

Территория республики относится к зоне избыточного увлажнения, что определяется сравнительно небольшим приходом тепла и хорошо развитой циклонической деятельностью во все сезоны. Количество осадков составляет 550–750 мм в год, возрастая с севера на юг. В то же время,

вследствие невысоких летних температур, большой облачности, повышенной влажности воздуха, Карелия является зоной относительно малого испарения, составляющего от 310 на севере до 420 мм на юге.

В результате совместного воздействия перечисленных факторов сформировалась очень развитая гидрографическая сеть, относящаяся к бассейнам Белого и Балтийского морей. На беломорскую часть приходится 57% территории республики, на балтийскую – 43 (без учета акваторий Ладожского и Онежского озер). Она представлена, большей частью, либо небольшими реками, либо короткими протоками, которые соединяют многочисленные озера, образуя озерно-речные системы.

По современным данным общее число рек (включая Карельский перешеек) составляет 26.7 тыс. Суммарная их протяженность – 83 тыс.км. Преобладают водотоки длиной менее 10 км. Их количество 25.3 тыс. (95%), общая протяженность – 52.3 тыс.км (63%). Только 30 рек имеют длину более 100 км и относятся к классу средних. Густота речной сети составляет 0.53 км·км⁻². Площадь водосбора у подавляющего числа рек также мала. Только 366 водных систем имеют бассейны площадью более 100 км², в том числе 51 система с водосбором, превышающим 1000 и 5 – 10000 км² (реки Кемь, Выг, Ковда, Водла, Шуя).

Молодостью карельских рек и особенностями кристаллического фундамента объясняются небольшие их глубины, неразвитость речных долин, ступенчатый характер продольного профиля, представляющего собой ряд порожистых участков, чередующихся с плесами, большие падения. Характерной особенностью карельской гидрографии являются также узкие, невысокие водоразделы и близость соседних водотоков, что создает условия для переброски стока в другие бассейны (р. Суна – оз. Палье, р. Поньгома – оз. Топозеро). А сложный изрезанный рельеф в условиях водораздельного расположения озер часто определяет сток из них по нескольким направлениям одновременно: оз. Энгозеро – реки Калга и Воньга, оз. Сариярви – реки Лоймоланйоки (Тулемайоки) и Пенсанйоки (Уксунйоки), оз. Сегежское – реки Обжанка и Сегежа (приток р. Свирь).

Основными структурными элементами гидрографической сети Карелии являются водоемы (озера и водохранилища), во многом определяющие специфику водных систем республики. На территории республики насчитывается 61.1 тыс. озер суммарной площадью около 18 тыс. км². Кроме того, в пределах республики находится около 50% акватории Ладожского и 80% Онежского озер, являющихся крупнейшими пресноводными водоемами Европы. Озерность территории составляет 12%, а с учетом карельских частей Онего и Ладоги достигает 21%, являясь одной из самых высоких в мире.

Основное число составляют озера с площадью менее 1 км². Более значительные размеры имеют только 1389 водоемов (чуть более 2% от общего числа), из них лишь 20 превышают 100 км². В группе малых водоемов преобладают озера, не имеющие видимого стока ("бессточные"), которые представлены, в основном, лесными и болотными озерами (лаббами).

В Карелии выделяются два основных типа озерных котловин по происхождению: тектонические и ледниковые (моренные). Почти все крупные и средние водоемы имеют тектонический генезис. Их котловины развиты в трещинах и сбросах с ярко выраженными следами эрозионной деятельности ледников. Они имеют, как правило, сложные очертания берегов и пересеченный рельеф дна, большие глубины. Озера ледникового типа расположены в понижениях между моренными грядами и холмами или в речных долинах. Они – небольших размеров, имеют менее изрезанную, часто округлую форму, плоское дно без резких перепадов глубин, которые не превышают, как правило, 5–10 м. Также встречаются узкие, длинные озера, через которые протекают реки. Кроме того, существует много мелких озер болотного происхождения.

Одной из форм хозяйственного использования водных ресурсов является регулирование речного стока путем создания водохранилищ. Основным типом водохранилищ являются котловинные (озерные), созданные почти на всех крупных озерах. Преобладание котловинных водохранилищ над долинными является региональной особенностью республики.

Объем воды, аккумулированный в водохранилищах, равен 80.2 км³. Из них общая полезная емкость составляет 18.6 км³, что позволяет регулировать 47% годового объема речного стока. Еще 65.0 км³ воды сосредоточено в озерах, остающихся в естественном состоянии. Кроме того, к этим цифрам следует добавить большие части объемов Онежского (Верхне-Свирское водохранилище) и Ладожского озер. Основная часть вод, содержащихся во внутренних водоемах (78%), находится в бассейне Белого моря, где они представлены, главным образом, водами водохранилищ. Здесь расположено около 90% общей полезной емкости водохранилищ, регулируется 63% объема речного стока. В балтийском бассейне воды сосредоточены, в основном, в озерах, сток менее зарегулирован и реки менее водоносны.

Сток рек Карелии в средний по водности год составляет 57 км³. Непосредственно на ее территории формируется 49.7 км³ (так называемый «местный сток»). Остальные воды (13%) поступают из сопредельных регионов (в основном из Финляндии и Архангельской области). Около 55% речного стока с территории республики поступает в Белое море, 25 – в

Онежское и 20% – в Ладожское озеро. В год 95%-ной обеспеченности (повторяемость в среднем один раз в 20 лет) местный сток составляет 63% от среднееголетнего или 31.8 км³.

Карелия расположена в пределах северной (две трети территории Республики) и средней подзон таежной зоны. Леса занимают более 50% площади региона, болота – более 20, а вместе с заболоченными лесами – около 30%. В Карелии выявлено около 400 видов древесных и кустарниковых растений. Основные древесные породы, образующие карельские леса – сосна обыкновенная, ели европейская и сибирская, некоторые виды берез, осина, ольха серая. Хвойные леса занимают около 90% от лесной площади. В северной подзоне преобладают сосновые леса, в средней – еловые. Свыше 90% лиственных лесов составляют березняки.

1.2.2. Архангельская область²

Архангельская область расположена на крайнем севере Европейской части России. На севере она омывается морями Северного Ледовитого океана – Баренцевым, Печорским и Карским, на западе – Белым. Длина морской береговой линии составляет примерно 3000 км. Из административных единиц она граничит на Востоке с Республикой Коми, на западе – с Республикой Карелия, на юге – с Вологодской и Кировской областями. К территории области относятся острова Новая Земля, Вайгач, Колгуев, Соловецкие и ряд других более мелких. В состав области входит также Ненецкий автономный округ (площадь 176.7 тыс. км², население 46 тыс. человек).

Площадь Архангельской области составляет 410.7 тыс. км², население – 1432 тыс. человек (без Ненецкого автономного округа). Она расположена между 60°38' и 81°52' северной широты и 35°52' и 65°40' восточной долготы. Максимальная протяженность с юго-запада на северо-восток составляет 1545 км. Почти вся территория области относится к бассейну Белого моря, где она занимает почти половину его площади. Ненецкий автономный округ в основном принадлежит к бассейнам других арктических морей.

Область находится в северной части Восточно-Европейской равнины. Геологическое строение характеризуется преобладанием платформенных структур и глубоким залеганием кристаллического фундамента архейского и протерозойского возраста, перекрытого мощным (десятки и даже сотни метров) слоем осадочных отложений (в отличие от геологии

² Раздел подготовлен по материалам: Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 3. Северный край. Л., 1972. 664.

Карелии и Кольского полуострова). Несмотря на глубокое залегание фундамента, его глыбовая структура и разломы определяют характер чередования низменностей и плато, а также направление долин основных рек. Фундамент сложен гнейсами, гранитами, сильно метаморфизированными сланцами, кварцитами и др. Коренные породы перекрыты слоем ледниковых и послеледниковых отложений (главным образом валунными суглинками ледниковой морены), а на равнинах, кроме того, песчано-глинистыми осадками морских трансгрессий или древнеозерными и флювиогляциальными отложениями. В состав осадочных отложений часто входят легкоразмываемые породы: известняки, гипс, доломиты, мергель, расположенные вблизи дневной поверхности. С этим связано явление карста, широко распространенное на территории области. Оно выражается в образовании специфических микроформ рельефа (в основном воронок) и заметно влияет на режим поверхностных и подземных вод.

Архангельская область имеет в основном равнинный рельеф с общим наклоном к северу, который изредка нарушается невысокими хребтами: сильноразрушенные Ветреный Пояс, Тиманский кряж, Канин Камень, Пай-Хой, с максимальными высотами 250–470 м.

Наиболее характерные формы рельефа – моренные холмы и гряды, карстовые и озерные понижения. Центральная часть области занята Онего-Двинско-Мезеньской равниной, рассеченной сетью понижений, занятых речными долинами. Приморские пространства представляют собой сильнозаболоченные низменности, сложенные отложениями различного генезиса. Территория Ненецкого автономного округа занята Печорской равниной.

Основные особенности климата области определяются преобладанием западного переноса воздуха с частыми вторжениями холодных арктических масс и интенсивным влиянием близлежащих северных морей. Приход циклонов с Атлантического океана сопровождается частой сменой воздушных масс и обуславливает пасмурную, прохладную погоду летом и относительно теплую, часто с оттепелями, погоду зимой. Вторжение холодных арктических и сибирских воздушных масс сопровождается холодными и сухими ветрами и резким похолоданием. Влияние морей обуславливает нарастание континентальности климата с севера на юг и с запада на восток. В целом климат области характеризуется коротким прохладным летом, длинной зимой с устойчивым снежным покровом и частыми метелями, неустойчивой погодой в течение всего года. На побережье морей лето более прохладное, а зима менее суровая.

Годовой радиационный баланс составляет от 18 (на севере) до 28 ккал·см⁻². Продолжительность зимы составляет пять-шесть месяцев

на юго-западе и шесть-семь – на северо-востоке, лета – три-четыре и один-два месяца соответственно. Среднегодовая температура воздуха изменяется в том же направлении от 3 до -8°C . Самый холодный месяц, как правило, январь (на побережье – февраль) со средними месячными температурами от -11 до -20°C . Самый теплый – июль с температурами от 17 до 4°C .

Архангельская область находится в зоне избыточного увлажнения. Среднее годовое количество осадков возрастает с северо-востока на юго-запад с 550 до 800 мм. Основная их часть приходится на теплый период (65–70%). Средняя годовая влажность воздуха возрастает в северо-восточном направлении от 77–80% до 82–86%.

Зимой в области преобладают южные и юго-западные ветры, летом – северные и северо-восточные. Средняя годовая скорость составляет $7-8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ на побережье и $2.5-3.5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ – у южных границ.

На территории области находятся три геоботанические зоны: тундра, северная и средняя тайга. Растительный покров на большей части территории представлен хвойными лесами, преимущественно еловыми с примесью березы, сосны и осины. Также имеются сосновые леса, приуроченные, в основном, к речным террасам. За полярным кругом растительность представлена лесотундровым мелколесьем, мхами и лишайниками в сочетании с кустарниковыми зарослями. Залесенность водосборов в таежной зоне в основном более 80% (иногда до 95–99%), заболоченность – 5–10%, а на севере и выше.

Речная сеть хорошо развита и сравнительно равномерно распределена по площади. Густота речной сети в основном составляет 0.5–0.6 км на км², в карстовых районах снижается до 0.1–0.2 км на км² и ниже. В составе сети преобладают малые реки и ручьи длиной менее 25 км, их около 50 тысяч суммарной длиной почти 100 тыс. км. Главными реками области являются Печора (длина 1809 км, объем среднего годового стока 139 км³), Северная Двина (744 км, 110 км³), Мезень (966 км, 29,0 км³) и Онега (416 км, 16,8 км³). Три последние реки являются основными притоками Белого моря, принося в него основной объем речного стока. Печора и Северная Двина – крупнейшие судоходные реки Европейской части России и по водности занимают второе и четвертое место.

Реки Печора и Северная Двина выносят в море большие объемы наносов и формируют в устьях обширные многорукавные дельты. Онега и Мезень имеют широкие мелководные эстуарии.

Озера на территории области в основном мелкие (менее 0.5 км²). Только девять озер имеют площадь более 50 км²: Лача (334 км²), Лекшмозеро

(54.4 км²), Кенозеро (68.6 км²), Кожозеро (97.4 км²), Песчанка-То (122 км²), Урджокское (71.8 км²), Голодная губа (186 км²), Пильня (51.6 км²), Гольцовое (55.8 км²). В районах сосредоточения озер образуются озерно-речные системы. Большинство озер имеют ледниковое происхождение. Крупные водоемы расположены в тектонических впадинах, сильно преобразованных процессами эрозии и аккумуляции. В тундре (зоне многолетней мерзлоты) многие озера имеют термокарстовое происхождение.

Около 6% территории области занимают болота, но они распределены очень неравномерно. Наибольшей заболоченностью отличаются низменные побережья Белого и Баренцева морей.

1.2.3. Мурманская область³

Мурманская область расположена на одном из крупнейших полуостровов России – Кольском. С севера, востока и юга она омывается Баренцевым и Белым морями, на западе граничит с Норвегией и Финляндией, на юге – с Республикой Карелия. Протяженность области с севера на юг около 400 км (от 70 до 66° северной широты), с запада на восток – свыше 500 км (от 28 до 41° восточной долготы). Практически вся область, за исключением крайней южной части, находится за Северным полярным кругом. Ее площадь составляет 144.9 км², население – 1018 тыс. человек. В гидрографическом отношении область относится к бассейнам двух морей – Белого (53% территории) и Баренцева (47%).

Территория Кольского полуострова расположена в восточной части Балтийского (Феноскандинавского) щита, сложенного древнейшими кристаллическими породами архейского и протерозойского возраста, перекрытых тонким слоем четвертичных отложений. Кристаллические породы представлены метаморфическими и эффузивными комплексами, прорезанными на больших площадях интрузиями, в основном гранитов. Наибольшее распространение имеют архейские гранито-гнейсовые породы.

Четвертичные отложения представлены комплексом ледниковых образований верхнечетвертичного возраста (морена, песчаные водно-ледниковые отложения и др.) и послеледниковыми образованиями (торфяники, песчано-глинистые морские и озерные отложения и др.).

Кольский полуостров имеет сложный расчлененный рельеф. Его основные формы образовались в доледниковый период (крупные возвышенности, котловины больших озер). Однако материковые оледенения и,

³ Раздел подготовлен по материалам: Ресурсы поверхностных вод СССР. Том 1. Кольский полуостров. Л., 1970. 316 с.

частично, послеледниковые процессы в значительной степени сгладили резко выступающие формы. Таким образом, основными рельефообразующими факторами для Кольского полуострова были тектонические процессы, денудация и эрозионно-аккумулятивная деятельность ледника и ледниковых вод.

По орографическому признаку территория Кольского полуострова делится на три провинции:

1. Западная провинция (до меридиана рек Воронья – Умба) характеризуется горным рельефом с амплитудами относительных высот более 1000 м. Здесь сосредоточены все основные горные системы с абсолютными высотами до 1000 – 1200 м: Хибинский и Ловозерский массивы, Сальные, Волчьи, Монче, Чуна и другие тундры. Они чередуются с глубокими впадинами, занятыми озерами и болотами.

2. Северо-восточная провинция ограничивается на юге грядой Большие Кейвы. Характеризуется пересеченным рельефом с амплитудами относительных высот до 150–250 м и обилием озер.

3. Юго-восточная провинция (к югу от гряды Большие Кейвы) характеризуется равнинным рельефом с абсолютными высотами в основном меньше 200 м и амплитудами относительных высот в пределах 20–50 м. Только некоторые вершины достигают 300 м и немного более. Провинция имеет незначительный общий уклон в сторону Белого моря. Приморские части обычно имеют террасы. Юго-восток провинции характеризуется обилием ледниковых форм рельефа.

Климат Кольского полуострова находится под смягчающим влиянием окружающих его морей и, особенно, северной ветви Гольфстрима. Характерной особенностью климата является прохладное дождливое лето и относительно теплая зима, неустойчивость и резкая изменчивость погоды, вызываемая частой сменой воздушных масс, перемещением циклонов и фронтов.

Годовой приход солнечной радиации составляет от 55–60 ккал·см⁻² в северной части до 70 ккал·см⁻² в южной. Средняя годовая температура воздуха составляет +1°С на морских побережьях, –1 – –2°С в удаленных равнинных районах и до –3 – –4°С в горных районах. Самые холодные месяцы – январь и февраль (средняя месячная температура –7, –9°С на побережье Баренцева моря и –10 – –15°С на остальной территории). Самые теплые месяцы – июль и август (средняя месячная температура изменяется по территории области от 9 до 14°С).

Кольский полуостров относится к зоне избыточного увлажнения и умеренного испарения. Годовая сумма осадков для большинства территории составляет 550–600 мм, примерно 60% приходится на теплый период. По

территории осадки распределяются очень неравномерно, особенно в горных массивах. Средняя годовая относительная влажность составляет примерно 80%.

В зимний период на полуострове наступает полярная ночь (в Мурманске – с 1 декабря по 13 января), в летний – полярный день (с 23 мая по 21 июля).

Следует иметь в виду, что в горных районах области наблюдается вертикальная климатическая зональность, которая выражается в понижении температуры воздуха, увеличении осадков, силы ветра и продолжительности залегания снежного покрова с возрастанием высоты местности.

На территории Кольского полуострова выделяется две геоботанические зоны: тундровая (примерно 20% территории полуострова) и таежная (60%), а также небольшая переходная зона – лесотундра (20%). Возвышенности в пределах таежной зоны заняты горной тундрой. Леса состоят в основном из ели, сосны и березы. Площади сосновых и еловых лесов примерно одинаковы, но ель произрастает главным образом на востоке, а сосна – на западе и юге. В лесотундре преобладают березовые редколесья.

Болотами занято примерно 20% территории полуострова, луговая растительность занимает очень небольшую территорию.

Гидрографическая сеть Кольского полуострова хорошо развита и принадлежит примерно в равном соотношении бассейнам Баренцева и Белого морей. Реки характеризуются слабо развитыми долинами и руслами, наличием большого количества порогов и водопадов, небольшой длиной площадью водосбора. Все реки можно разделить на три типа: горные, полуравнинные и озерные (озерно-речные системы). Всего здесь насчитывается 20,6 тыс. рек общей длиной 37 тыс. км, но 95% из них относится к классу очень малых (длиной менее 10 км). На них приходится 61% суммарной длины. Рек длиной более 100 км всего 15. Основными притоками Белого моря являются реки Поной (длина 426 км – самая длинная на полуострове), Варзуга, Умба. В бассейне Баренцева моря – реки Тулома, Печенга, Воронья.

Озера Кольского полуострова по своему происхождению делятся на ледниковые и тектонические, первых – большинство, и это, как правило, небольшие мелкие водоемы. Всего в районе насчитывается 107 тыс. озер общей площадью зеркала 8,2 тыс. км², но из них 99,2% имеют площадь менее 1 км². На их долю приходится 36,6% суммарной площади зеркала. Только 835 озер имеют площадь более 1 км², из них 4 – более 100 км². Основные водоемы полуострова – Имандра, Нотозеро, Умбозеро, Ловозеро, имеющие тектоническое происхождение и, как следствие этого, большую глубину, вытянутую форму, сложную конфигурацию береговой линии.

Глава 2

СОЦИАЛЬНО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ БАССЕЙНА БЕЛОГО МОРЯ

2.1. Природные ресурсы

Минеральные ресурсы

Особенности геологического строения региона определяют специфику его минеральной базы: 80% площади (Республика Коми, Вологодская и Архангельская области) занято палеозойскими отложениями Русской плиты и 20% (Республика Карелия и Мурманская область) – архейскими и протерозойскими кристаллическими породами Балтийского (Фенноскандинавского) щита.

Наиболее богатым минеральными ресурсами является Кольский полуостров (Рис. 2.1).

По запасам минеральных ресурсов Мурманская область играет ведущую роль не только на Северо-западе России, но и, возможно, во всей Российской Федерации. В области разведано свыше 200 месторождений, где представлены 40 типов минералов. Наиболее важны апатит-нефелиновые руды, а также руды, содержащие титан, железо, медь, никель, цирконий, редкие металлы, алюминий и фосфор. Всего на территории области найдено около 700 минералов и элементов, включая слюду, керамическое сырье, облицовочный камень, полудрагоценные и поделочные камни. На их базе работает несколько крупных предприятий – ОАО «Апатит», ОАО «Кольская горнометаллургическая компания», Ковдорский ГОК и Оленегорский ГОК, входящие в число крупнейших предприятий Северо-запада России.

На территории Республики Карелия разведано 248 месторождений 26 видов минералов. Наиболее значительным месторождением из разрабатываемых на сегодняшний день является Костомукшское железорудное, на базе которого действует ОАО «Карельский окатыш». Также хорошие перспективы имеют Корпангское и Межозерское железорудные месторождения. В южной Карелии выявлен ряд скарновых месторождений олова (Китля, Люпикко, Уукса, Питкяранта). В Карелии разведаны месторождения таких ценных полезных ископаемых, как платина, серебро, золото, алмазы, полиметаллы, никель, хром, кобальт, титан, вольфрам и ванадий.

На территории Карелии имеются большие запасы слюды-мусковита (не разрабатываются из-за отсутствия спроса) и пегматита, которые сосредоточены в прибрежных районах Белого моря (Лоухский, Кемский). Известны также рудопроявления тальк-хлоритового камня и карбонатно-тальковых руд (месторождение Светлоозерское в Сегежском районе). Во многих районах республики разведаны и разрабатываются месторождения высококачественных строительных и облицовочных камней, таких как граниты, диабазы, габбро, кварциты и мрамор. Также активно добываются песок и щебень, который поставляется в различные регионы России. Одним из наиболее ценных материалов, добываемых в Карелии, является шунгит, обладающий различными полезными свойствами.

Основными минерально-сырьевыми ресурсами Архангельской области являются бокситы (рудник в Плесецком районе), флюориты и алмазы. Всего на территории области выявлено около 270 месторождений. Освоение месторождения алмазов находится в 90 км от Архангельска, его опытно-промышленная эксплуатация и развитие ОАО «Севералмаз» будут значительно влиять на экономику области. Кроме того, следует назвать крупные месторождения различных строительных материалов, таких как глина, гипс, известняк, выявлены месторождения железных, полиметаллических, свинцово-цинковых руд, хромитов, руд редких металлов и рассеянных элементов. Восточная часть Вологодской области и юго-западная Республики Коми, входящие в бассейн Белого моря (ББМ), также не очень богаты минерально-сырьевыми ресурсами.

Лесные ресурсы

Одним из основных природных ресурсов ББМ является лес, который служит базой для развития деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) региона ББМ и других районов Европейской территории России. Лесная продукция в больших объемах идет на экспорт. Площадь покрытых лесом земель на Северо-западе России составляет 88.2 млн. га (около 11% лесного фонда Российской Федерации и свыше 40% – Европейской части России). В Архангельской области сосредоточено 22.5 млн. га лесной площади и 2.5 млрд. м³ запаса древесины, в Республике Карелия – 9.5 млн. га и 0.95 млрд. м³, в Мурманской области – 5.4 млн. га и 0.23 млрд. м³, соответственно. Значительная доля лесной площади и запасов древесины приходится на Республику Коми (30.2 млн. га и 3 млрд. м³, соответственно), юго-западная часть которой входит в ББМ. Несколько меньшими лесными ресурсами обладает Вологодская область (10.1 млн. га и 1.6 млрд. м³, соответственно), восточная часть которой входит в ББМ.

Как уже отмечалось, по территории ББМ проходят четыре вегетационные зоны, различающиеся условиями развития флоры: тундра, лесотундра, северная и средняя тайга. В регионе доминируют хвойные леса. Доля спелых и перестойных лесов в регионе близка к средним по России и составляет свыше 55%, но она значительно изменяется по республикам и областям. Республика Коми обладает наибольшей долей спелых и перестойных лесов (75% от общего запаса).

Наиболее активно лесовосстановление ведется в Архангельской области (42.6 тыс. га в 2005 г.), хотя и составляет менее трети к уровню 1990 г. В Архангельской области 11 предприятий получили сертификат на соответствие системы лесопользования требованиям Лесного попечительского совета (FSC). Всего по России выдано 33 подобных сертификата. Сертифицированная площадь по Архангельской области по данным на декабрь 2006 г. составляет 4.5 млн. га или 36% от общей площади сертифицированных лесов в России (12,5 млн. га).

Объемы лесовосстановления в Карелии заметно меньше и оно составляет примерно 50% к уровню 1990 г. Хуже всего положение в Мурманской области, где объемы работ 2005 г. были в шесть раз меньше, чем в 1990 г.

Рыбные и водные ресурсы

Водный фонд региона включает пресноводные водоемы (озера, реки и водохранилища) и морскую акваторию Белого моря. Водоемы рыбохозяйственного фонда, находящиеся в естественном состоянии, за редким исключением, относятся к олиготрофному типу (холодноводные и малокормные). Средняя их рыбопродуктивность равна 6.5 кг/га. Озера-водохранилища имеют своеобразный гидрологический режим, причиняющий постоянный ущерб их биологическим ресурсам, но средняя рыбопродуктивность их выше примерно на 15–20%. Высокой продуктивностью обладает несколько водоемов, в Карелии – Водлозерское водохранилище (21 кг/га).

В 1990-х годах в результате отрицательного воздействия комплекса антропогенных факторов во внутренних водоемах ухудшилось состояние рыбных ресурсов, снизилась рыбопродуктивность озер и водохранилищ. В настоящее время в промысле преобладают мелкочастиковые виды рыб. В то же время, в условиях экономической нестабильности и нарастания инфляционных процессов резко сократилось количество рыбодобывчиков. Одновременно возросли объемы любительского рыболовства, которые ориентируются в первую очередь на изъятие наиболее ценных крупночастиковых видов рыб.

Вылов рыбы во внутренних водоемах относительно невелик, в Карелии с 2005 г. он уступает объемам товарного рыбоводства. Что касается самого Белого моря, то важно упомянуть замечание Б.Г. Житнего (2007), о том, что «... бытующее в литературе мнение о количественной бедности Белого моря, основанное на недостаточно полных и фрагментарных данных, следует считать ошибочным». Но при этом он отмечает «Белое море в настоящее время характеризуется бедностью запасов и низким уровнем добычи основных промысловых рыб и морских млекопитающих. За год в нем добывается 2-3 тыс. т водорослей, около 2-2.5 тыс. т рыбы (0.7-0.8 тыс. т сельди, 0.8 тыс. т наваги, 0.5 тыс. т «второстепенных рыб» и 0.05-0.1 тыс. т семги)». Ранее же добывалось «.. 12 тыс. т. (влажной массы) водорослей, около 40 тыс. т промысловых рыб (сельди, наваги и семги), до 10-12 тыс. т «второстепенных» рыб (сайки, пинагора, трески, корюшки, мойвы и др.) и в общей сложности почти 500 тыс. голов основных промысловых видов морских млекопитающих». Очень серьезной может быть отмечена следующая ситуация (Житний, 2007) «... запасы многих промысловых объектов (морские водоросли, сельдь, ряд «второстепенных рыб» и др.) из года в год остаются недоиспользованными». Обусловлено это тем, что из-за неблагоприятной социально-экономической ситуации отмечается отток населения.

В начале 2000-х годов в Карелии предприятиями в Белом море добывалось 0.2-0.6 тыс. тонн, во внутренних водоемах водосбора – 1.4-1.9 тыс. тонн (в 2006 г. достиг 2.6 тыс. тонн), кроме того, достаточно развито любительское рыболовство и любителями вылавливается до 2 тыс. тонн рыбы. В Архангельской области предприятиями во внутренних водоёмах в 2005 г. было выловлено 0,5 тыс. тонн рыбы, причем в озерах – 0.28 тыс. тонн и в Северной Двине – 0,17 тыс. тонн.

В последние годы увеличиваются объемы товарного рыбоводства, главным образом в результате интенсивного выращивания радужной форели в садках. Значительные потенциальные возможности в размещении форелевых хозяйств имеет побережье Белого моря. С 1996 г. на Белом море начали создаваться садковые форелевые хозяйства. В регионе осуществляется деятельность по охране и воспроизводству ценных видов рыб, выполняются ежегодные работы по сбору икры, выращиванию и расселению молоди ценных видов рыб в водоемы. Помимо воспроизводства лососевых рыб (лосось, семга, горбуша и паляя) осуществляется искусственное разведение ряпушки, пеляди, сига, леща и судака. Основу любительского вылова рыбы на внутренних водоемах составляют судак, лещ, сиг, налим и щука. В Карелии в 2006 г. было выращено товарной форели и молоди 5.8 тыс. тонн, в

Архангельской области – 0.03 тыс. тонн. В Мурманской области также активно развивается выращивание лосося для рыболовного туризма, в этой отрасли занято более 500 человек.

Основными нерыбными ресурсами Белого моря являются морские звери (тюлени, нерпа), водоросли, мидии. Нарастает добыча тюленя, в Архангельской области планируется создать производственную инфраструктуру – фабрику меховых изделий. Ведется промысел на вертолетах и возрождается традиция добычи морского зверя на небольших судах. До недавнего времени квота гренландского тюленя выбиралась не более чем на 15 процентов из-за подорожания топлива, а в Карелии с 1996 г. добыча прекратилась (в 1995 г. было добыто 3332 тюленя). В Архангельской области в 2004 г. зверобойная кампания не проводилась, в 2005 г. добыто гренландского тюленя 7258 голов, в 2006 г. – 5005 голов (освоение квоты – 6%), а кольчатой нерпы в 2004 году – 120 голов, в 2005 г. – 303 головы, в 2006 г. – 217 голов. В Карелии в 2000-х годах добывалось 170-250 голов нерпы. В России возможность добычи морского зверя предоставляется только коллективному хозяйству (рыболовецкому колхозу), причем такому, которое может подтвердить его как исторически традиционное занятие населения.

В Белом море сосредоточены большие запасы водорослей – ламинарии, анфельдии и фукуса. Продукция из водорослей используется в сельском хозяйстве, пищевой и медицинской промышленности, в Архангельской области есть и перерабатывающие предприятия. ОАО «Архангельский опытный водорослевый комбинат» выпускает биологически активные пищевые добавки и медицинские препараты. Запасы ламинарии в основных промысловых районах имеют тенденцию к снижению из-за низких темпов восстановления. В связи с возросшим спросом последнее время наблюдается увеличение добычи этих видов морепродуктов после значительного спада. В начале 1990-х годов в Карелии добывалось 1.5-1.8 тыс. тонн, затем заготовка упала более чем в 10 раз, а в 2000-х годах ее объемы колебались в пределах 0.2-1.2 тыс. тонн. Добыча морских водорослей в Архангельской области в 2005 г. составила 2.2 тыс. тонн, в 2006 г. – 1.7 тыс. тонн (освоение квоты – 11%).

В Белом море занимаются выращиванием мидий, в Карелии имеются плантации площадью 15 га. В 1991-1992 гг. выращивалось более 80 тонн, в 2000 г. – 39 тонн, а в 2003 г. – только 3.1 тонн.

Топливо-энергетические ресурсы

Топливо-энергетические ресурсы Северо-запада Европейской части России представлены нефтью и газом, каменным углем, горючими сланцами и торфом (Арктика, 2002; Север России, 2004). Водосборный ББМ практически не располагает собственными ресурсами нефти и газа, хотя

и испытывает в них большие потребности. Однако в непосредственной близости от него, в районах, примыкающих к ББМ, в Республике Коми и Ненецком автономном округе Архангельской области имеется целый ряд разрабатываемых и перспективных нефтегазовых месторождений с большими запасами. Это Тимано-Печорская провинция, где разведано свыше 70 месторождений нефти, газа и газоконденсата. Общие ресурсы нефти здесь оцениваются в более чем 4.8 млрд. тонн, газа – свыше 600 млрд. м³.

Огромные запасы топливно-энергетических ресурсов сосредоточены также на Российском арктическом шельфе (Баренцево-Карская провинция), относящемся, в основном, к Ненецкому автономному округу, входящему в Архангельскую область, и Мурманской области. Потенциальные ресурсы газа в Баренцевом море оцениваются в 10 000 млрд. м³. Сейчас здесь начата разведка нефтяных месторождений. Однако ресурсы шельфа на сегодняшний день практически не используются и могут рассматриваться как ближайший резерв (Арктика, 2002).

Наиболее разведанным является Штокманское газовое и газоконденсатное месторождение, к которому проявляют большой интерес крупные российские и зарубежные компании. Штокманское газоконденсатное месторождение (ШГКМ) является одним из крупнейших месторождений в мире, что служит гарантией обеспеченности газом производственных мощностей завода по производству сжиженного природного газа. ШГКМ расположено в центральной части шельфа российского сектора Баренцева моря в 290 км к западу от побережья островов архипелага Новая Земля и в 650 км от порта г. Мурманска. Объем запасов месторождения составляет 3.66 трлн. м³ газа и 30 млн. тонн конденсата, ежегодная добыча может составлять до 94.6 млрд. м³/год.

Для подачи газа в единую систему магистральных газопроводов в районе г. Волхов планируется строительство сухопутного магистрального газопровода протяженностью около 1335 км, компрессорных станций, а также соответствующей инфраструктуры. Трасса газопровода намечена вдоль автодороги Санкт-Петербург–Мурманск и лишь севернее г. Петрозаводска выходит в самостоятельный коридор и идет до границы с Ленинградской областью. Трасса пройдет по административным территориям Мурманской области, а также Лоухского, Кемского, Беломорского, Сегежского, Медвежьегорского, Кондопожского и Пряжинского районов Республики Карелия. Основная трасса проектируемого газопровода пересекает на территории Кандалакшского района и Республики Карелия свыше 200 водотоков и водоемов, большое количество болот, лесов, что должно повлиять на состояние водосбора Белого моря. Воздействие, которое может оказать строительство и дальнейшая эксплуатация магист-

рального газопровода на окружающую среду, будет заключаться в выбросах и сбросах загрязняющих веществ в атмосферный воздух и водную среду, шумовом влиянии, образовании строительных отходов, вероятном уничтожении отдельных представителей растительности и животного мира, усилении антропогенного присутствия на территориях, ранее не подверженных техногенному воздействию. Нормативная санитарно-защитная зона для линейной части газопровода составляет 300 м, а для компрессорных станций и прочих площадных объектов системы сухопутного трубопроводного транспорта газа – 700 м.

Значительные топливно-энергетические ресурсы имеет Республика Коми: 200 млрд. м³ природного газа, 30 млн. тонн газового конденсата, 520 млн. тонн нефти. На территории Республики Коми и Ненецкого автономного округа, расположенной восточнее ББМ, разведаны и разрабатываются месторождения каменного угля, общие запасы которого оцениваются более чем в 10 млрд. тонн. Около половины из них представлены высококачественными коксующимися углями. Ресурсы горючих сланцев находятся в пределах Республики Коми. Наилучшие их сорта добываются в месторождениях Сысольского, Ярегского и Ижемского районов. Запасы торфа имеются во всех республиках и областях региона, только в Карелии 378 месторождений. Несколько десятков месторождений осваиваются, и большие объемы торфа используются в качестве топлива.

Земельные ресурсы

Регион Белого моря располагает некоторыми, хотя и небольшими, площадями сельскохозяйственных угодий. От всей земельной площади сельскохозяйственные угодья в Архангельской области и Карелии составляют примерно 1.5%, а в более северной Мурманской области – 0.2% (для сравнения, в более южной Вологодской области – 10%, а в Псковской – 27%). Объем сельскохозяйственной продукции соответственно невелик. Это определяется, во-первых, неблагоприятными климатическими условиями, во-вторых, слабо развитой инфраструктурой (редкая дорожная сеть, неудовлетворительное развитие механизации и автоматизации, недостаточное снабжение электроэнергией, химикатами, проблемы с водоснабжением и канализацией и т.п.).

2.2. Экономические индикаторы

Экономика ББМ прошла те же этапы, что российская – спад до середины 1990-х годов, временная стабилизация в 1995–1998 гг. и рост после девальвации рубля, причем рост в силу ориентированности на внешний

рынок и большую долю сырья был больше, чем в РФ. Произошли значительные структурные сдвиги, особенно в первой половине 1990-х годов. Экономический спад сопровождался и снижением доходов населения, причем на севере большим, чем в центральных районах, что привело к отрицательной миграции населения (Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006).

Основу экономики областей и республик, расположенных полностью или частично на территории ББМ, составляет добыча и переработка минеральных и лесных природных ресурсов. Главными отраслями экономики являются: для Мурманской области – добыча и переработка минерально-сырьевых ресурсов (апатито-нефелиновых, медно-никелевых руд и др.); для Архангельской – лесопромышленный комплекс (ЛПК), топливно-энергетический комплекс и машиностроение; для Республики Карелия – ЛПК и металлургия. Во входящих в ББМ районах Вологодской области и Республики Коми хорошо развит ЛПК.

Ведущей отраслью экономики всего региона является промышленность, составляющая почти половину валового регионального продукта (ВРП). Надо отметить, что занятость в промышленности за годы реформ сильно упала, но еще более сильным был спад в строительстве. Сельское хозяйство развито слабо и существует только в самых южных районах ББМ. В течение последних 15 лет устойчиво развивалось лишь несколько отраслей – торговля, финансы, связь и операции с недвижимостью. Торговля по количеству занятых в ней вышла на второе место, опередив транспорт.

Количество предприятий в областях и республиках примерно пропорционально численности населения, лишь в Архангельской области оно немного меньше. В структуре большинство предприятий – торговые (27–37%), примерно по 10% – обрабатывающей промышленности, операций с недвижимостью, предоставления прочих коммунальных, социальных и персональных услуг. Количество организаций с участием иностранного капитала в регионе ББМ растет, хотя и не так быстро, как в России в целом.

Приватизация не привела к росту эффективности экономики региона, в то же время она способствовала развитию малого бизнеса. Количество малых предприятий на Севере меньше, чем в центральных или южных регионах РФ. Лишь в Карелии количество малых предприятий на 1000 жителей соответствует уровню России. Большинство малых фирм занимается торговлей, и в этой отрасли более половины занятых работников в малом бизнесе.

Долю экономики региона ББМ в российской характеризует удельный вес поступающих в бюджетную систему РФ налогов. В целом он составляет немного более 1.6%, причем доля Архангельской области – 0.9%, Мурманской – 0.5%, Карелии – 0.2%. Поступления из входящих в ББМ территорий Вологодской области и Республики Коми относительно невелики, поскольку основные плательщики (предприятия ТЭК и ОАО «Северсталь») находятся за пределами ББМ.

Как и в России, инфляция была существенной в начале 1990-х годов, достигая сотен процентов за год. Ее уровень значительно снизился к 1997 г. (до 8%), но дефолт 1998 г. и последовавшая за ним девальвация рубля вызвали рост цен, доведя его до 75% в 1998 г. Это вызвало резкое снижение реальных доходов населения, которые вышли на додефолтный уровень лишь в 2002 г. В настоящее время рост уровня инфляции замедлился, но все равно составляет около 9% в год, как и в целом по РФ. Сырьевая ориентация региона ведет к тому, что динамика промышленных цен подвержена значительным колебаниям и существенно отличается от общероссийской.

Валовой региональный продукт

Динамика ВРП региона в целом близка к динамике валового внутреннего продукта РФ. В начале 1990-х гг. отмечалось его устойчивое снижение. После девальвации рубля в 1998 г. начался быстрый экономический рост в регионе ББМ, который с 2001 г. стал замедляться (рис. 2.2). Наиболее медленно развивается в последние годы Мурманская область, а в Карелии и Архангельской области в отдельные годы отмечались высокие темпы роста ВРП. Сейчас доля ВРП ББМ от ВВП РФ составляет примерно 2.3%. Вологодская область приближается к уровню 1990 г., но успешность развития в последние годы связана с деятельностью ОАО «Северсталь», находящегося за пределами ББМ (Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006).

ВРП на душу населения наиболее высокий в Мурманской области – примерно на треть выше, чем в России. В целом по региону ББМ он также существенно превышает уровень России, лишь в Карелии он на 20% ниже (табл. 2.1).

Структура ВРП Мурманской и Архангельской областей близка – около 50% составляет доля промышленности, примерно по 10% – доля торговли и нерыночных услуг и по 9% – транспорта. В Карелии же структура экономики ближе к структуре развитых стран Северной Европы, удельный вес промышленности – всего треть, доля торговли и нерыночных услуг существенно выше, чем в других областях – более 15%, а транспорта – почти 12%.

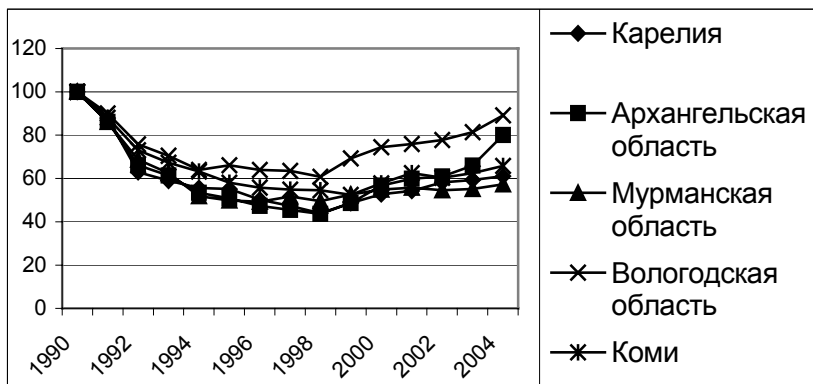


Рис. 2.2. Динамика ВРП регионов, полностью или частично входящих в ББМ (1990 г. принят за 100%)

Таблица 2.1

Динамика ВРП регионов, полностью или частично входящих в ББМ, млрд. руб.

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Архангельская область	14.3	18.3	20.9	22.9	36.8	62.6	68.2	84.6	105.6	153.9
Мурманская область	14.4	16.4	18.2	23.7	42.0	57.4	57.3	69.3	81.3	118.2
Карелия	8.1	9.0	9.9	11.4	20.2	28.3	33.8	41.8	47.3	55.9
Вологодская область	17.3	19.1	19.7	23.9	46.5	70.2	67.6	83.3	112.1	164.0
Республика Коми	19.4	20.6	25.4	29.4	46.9	64.8	85.7	93.2	116.6	141.2

Промышленная продукция

Как уже отмечалось выше, основу экономики ББМ составляет промышленность, значительно превосходящая по всем показателям другие отрасли и обладающая большим экспортным потенциалом.

Изначально промышленность ББМ была ориентирована на производство сырья и полуфабрикатов для других регионов СССР и зарубежных стран. В советский период выделялись инвестиции на развитие промышленных предприятий, но они зачастую использовались нерационально. Недостаточно средств выделялось на охрану окружающей среды, что во многих районах ББМ уже привело к возникновению сложных экологических ситуаций.

Доля промышленной продукции, производимой в ББМ, составляет примерно 2.2% общероссийской, из-за невысокой доли обрабатывающей промышленности. Наиболее сильно промышленность развита в Мурманской области (Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006).

В структуре промышленности отдельных административных единиц ББМ доминируют различные отрасли: черная и цветная металлургия в Мурманской области и Карелии, ЛПК – в Архангельской области, Республике Карелия, юго-западе Республики Коми и востоке Вологодской области, рыбопромышленный комплекс – в Архангельской и Мурманской областях, топливно-энергетический комплекс – в Архангельской области. Значительное влияние на развитие экономики региона оказывает не находящееся на территории ББМ ОАО «Северсталь», которое в 2000 г. формировало 80% бюджета Вологодской области.

В целом динамика развития экономики ББМ, как и всей РФ, характеризуется резким спадом промышленного производства в течение 1990-х годов. Рост промышленности начался в 1999 г., но уже с 2001 г. в отдельные годы промышленное производство уменьшалось. Тем не менее, с 2000 г. в Архангельской области промышленное производство удвоилось. В других регионах рост был небольшим (рис. 2.3).

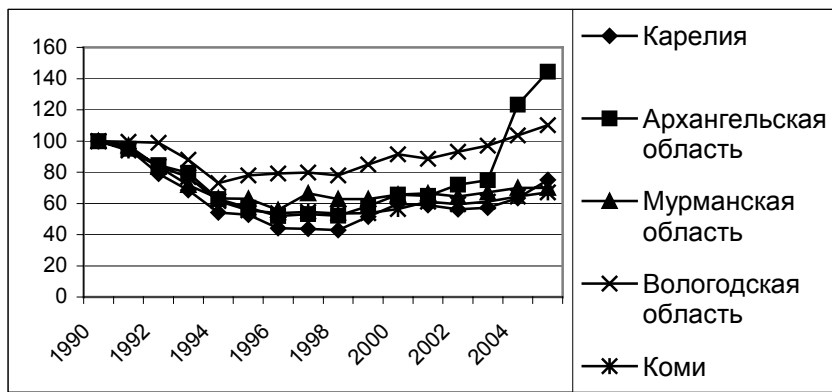


Рис. 2.3. Динамика промышленного производства регионов, полностью или частично входящих в ББМ (1990 г. принят за 100%)

В последние десять лет в Архангельской области и Республике Коми росла добыча нефти. Крупнейшие предприятия ТЭК («Лукойл-Коми»,

«Севергазпром», «Северная нефть» и другие) находятся восточнее ББМ, но по территории ББМ проходят нефтепроводы и газопроводы.

Значительно увеличилась добыча железной руды и ее первичная переработка (производство окатышей и концентрата). Рост добычи железной руды начался еще в 1997 г. (рис. 2.4). Metallургия представлена в основном крупными предприятиями. Кольская горно-металлургическая компания, добывающая никель и другие металлы, была восьмой в округе с объемом производства 24 млрд.руб., ОАО «Карельский окатыш», производящий железорудные окатыши – на 18-м месте (19.7 млрд. руб), Оленегорский ГОК, производящий железорудный концентрат – на 85-м месте (4.5 млрд. руб). Оказывает некоторое влияние на природу ББМ и находящееся рядом крупнейшее предприятие округа – ОАО «Северсталь» (143 млрд. руб).

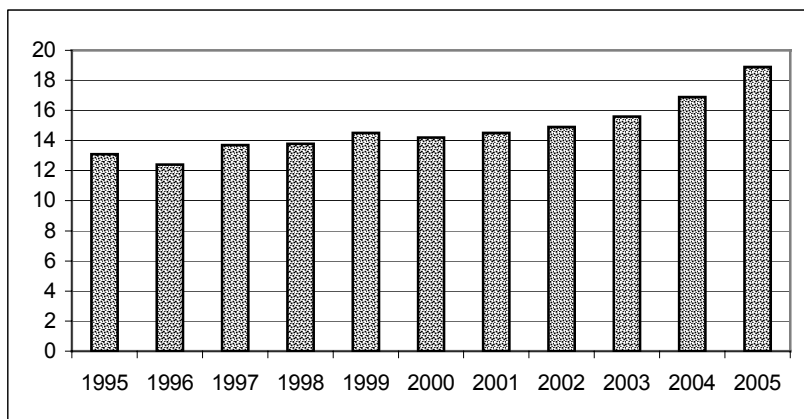


Рис. 2.4. Добыча железной руды в регионах, полностью или частично входящих в ББМ, млн. т.

В Архангельской области в XXI веке добывающие производства переживали спад, в Мурманской – рост практически отсутствовал, лишь в Карелии в 2005 г. был значительный рост, прежде всего из-за увеличения производства железорудных окатышей ОАО «Карельский окатыш».

За последние пять лет обрабатывающие производства развивались. Примерно на 10% выросло производство в Мурманской области, почти на треть – в Карелии, и более чем в два раза – в Архангельской области.

Существенное влияние на окружающую среду оказывают химические производства. ОАО «Апатит», добывающее сырье для производства удобрений, оказалось на 17-м месте в округе по объемам производства (19.8 млрд. руб), Ковдорский ГОК, добывающий железную руду и сырье для производства удобрений – на 49-м месте (9.1 млрд. руб). Вблизи ББМ в Вологодской области расположено и производство минеральных удобрений, крупнейшее предприятие – ОАО «Аммофос» – находится на 32-м месте в рейтинге (13 млрд. руб).

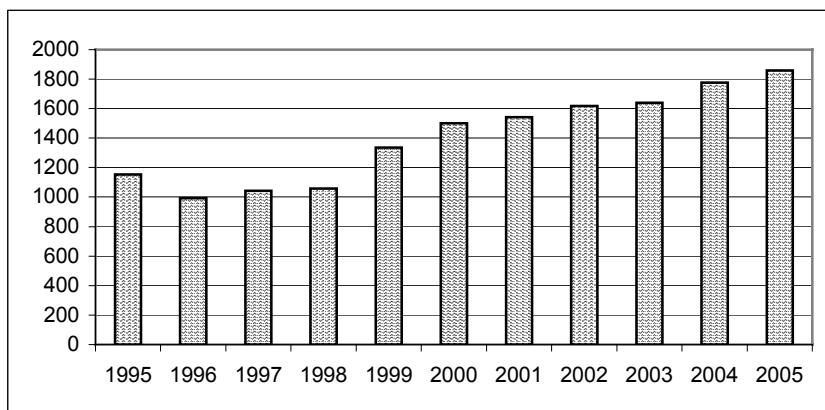


Рис. 2.5. Производство целлюлозы в регионах, полностью или частично входящих в ББМ, тыс. тонн.

После девальвации рубля устойчиво развивался ЛПК. Быстро росло производство целлюлозы, и в 2005 г. оно было в 1.5 раза больше, чем 1995 г., причем рост производства в ЦБП начался с 1999 г. (рис. 2.5). Производство бумаги увеличилось также в 1.5 раза, а картона – в два раза.

Больше всего в числе 250 крупнейших предприятий округа именно лесопромышленных предприятий. На 29-м месте – Сыктывкарский ЛПК (14.2 млрд. руб), на 37-м – Котласский ЦБК (11.1 млрд. руб), на 45-м – Архангельский ЦБК (9.9 млрд. руб), на 80-м – Сегежский ЦБК (5.3 млрд. руб), на 147-м – Сыктывкарский фанерный завод (2.5 млрд. руб), первым в РФ получивший сертификат FSC, гарантирующий законность и экологичность всей цепочки изготовления фанеры, на 168-м – Соломбальский ЦБК (2.2 млрд. руб). Кроме того, у некоторых лесопромышленных

предприятий Вологодской области часть производств находится в бассейне Сухоны.

Рыбопромышленный комплекс развивался не слишком успешно, прежде всего, из-за административных барьеров и налоговой системы. Сложность и затратность поставок свежей и замороженной рыбы в российские порты привела к переориентации рыбаков на норвежский рынок и к существенному спаду рыбопереработки. Значительный рост улова рыбы и добычи морепродуктов сопровождался снижением объемов рыбопереработки. Доля предприятий трех регионов в улове рыбы и добыче морепродуктов России превышает 20% (рис. 2.6). Улов рыбы во внутренних водоемах и Белом море относительно невелик. В то же время рыбоводство быстро развивалось, и выращивание форели и лосося стало играть все более заметную роль в экономике Карелии и Мурманской области.

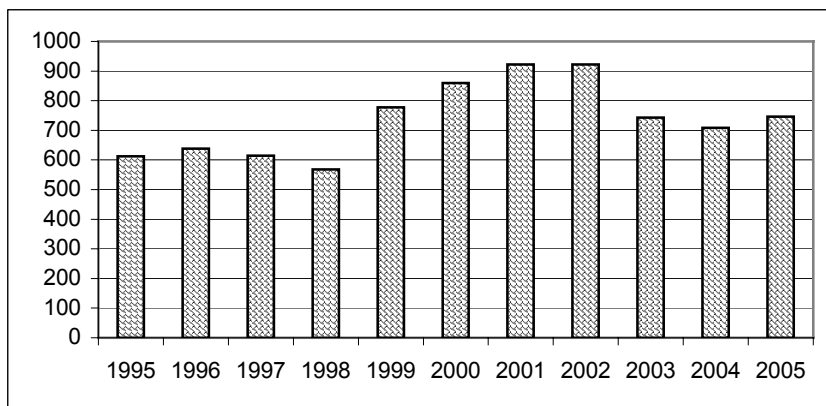


Рис 2.6. Улов рыбы и добыча других морепродуктов в регионах, полностью или частично входящих в БМ, тыс. тонн.

В БМ (в Архангельске и Вологде) находится несколько крупных машиностроительных предприятий, но их воздействие на окружающую среду меньше, чем у перечисленных выше. По объемам производства в округе ПО «Севмашпредприятие» находится на 19-м месте – 19.1 млрд. руб, фирма «Стоик» – на 157-м (2.3 млрд. руб), Вологодский подшипниковый завод – на 217-м (1.6 млрд. руб).

Производство и распределение электроэнергии, газа и воды немного выросло в Карелии и Архангельской области, но этот рост в Карелии был

нестабильным – велика зависимость гидроэлектростанций от водности рек. В Архангельской области данный сектор развивался стабильно. К числу крупнейших в регионе предприятий относятся «Колэнерго», «Архэнерго» и «Карелэнерго».

В 2005 г. крупнейшими среди предприятий СЗФО, находящихся в ББМ, были металлургические, химические, целлюлозно-бумажные, энергетические, транспортные и машиностроительные. Все эти отрасли существенно влияют на окружающую среду, тем более что предприятия строились давно, используются устаревшие технологии. Но данные предприятия обладают значительными финансовыми ресурсами и часть их вкладывают в природоохранные проекты и модернизацию производства.

Сельское хозяйство

Сельское хозяйство (если не рассматривать рыбную отрасль) не играет значительной роли в экономике ББМ. Его вклад в ВРП – меньше 2%, лишь в Карелии доля сельского хозяйства – 2.3%. Общий рост экономики с 1999 г. слабо сказался на сельском хозяйстве: продолжалось снижение посевных площадей, поголовья скота и производства большинства видов продукции, количество фермеров уменьшалось. Сельское хозяйство на севере убыточно и неконкурентоспособно. Лишь в 2006 г. был отмечен рост сельскохозяйственного производства. В качестве положительного явления можно отметить постоянный рост эффективности сельского хозяйства (Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006).

Другие отрасли экономики

После девальвации рубля объем инвестиций в регион ББМ быстро рос, и территория переживала строительный бум. Правда, в Карелии он быстро закончился, но в Архангельской области он продолжается, и за пять лет объем подрядных работ вырос почти в три раза. Рост промышленного производства и строительства способствовал увеличению объема грузовых перевозок. Устойчиво работают порты в Мурманске и Архангельске, возможна модернизация портов в Кандалакше и Беломорске, пока мало загруженных. Крупнейшими предприятиями региона являются Северное морское пароходство и Архангельский траловый флот. Стабильно развивалась и постепенно становилась более цивилизованной торговля (Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006).

Бурно развивалась связь, особенно мобильная, в регионы приходит Интернет, хотя и не так быстро, как хотелось бы. Регион ББМ уступает Санкт-Петербургу, но превосходит средние показатели по России, особенно по доступу к сети Интернет и количеству организаций, имеющих интернет-сайты.

2.3. Уровень жизни населения

Реформы в начале 1990-х годов привели к падению доходов населения. Наибольший спад был в 1992 г., а затем в 1995–1998 гг., когда для борьбы с инфляцией российские власти использовали жесткую финансовую политику, включая задержки зарплаты в бюджетной сфере.

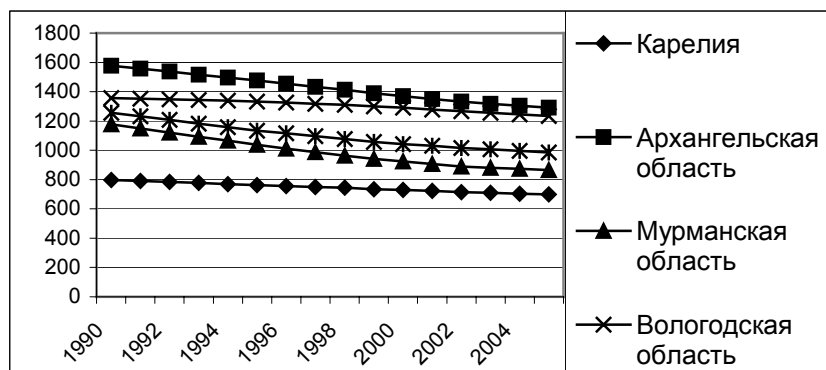


Рис. 2.7. Динамика численности населения регионов, полностью или частично входящих в ББМ, тыс. чел.

Жители районов Севера и территорий, приравненных к ним, к которым относится ББМ, имеют, как правило, более высокую заработную плату, чем жители районов РФ, расположенных южнее. Но относительно 1980-х годов разрыв стал значительно меньше, во многих регионах России зарплата на эффективных предприятиях превышает зарплату на севере с его сложными условиями жизни. В результате с начала 1990-х годов начался отток населения в другие регионы России (Социально-экономические проблемы Карельского Прибеломорья, 1992; Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006).

Численность населения региона за годы реформ значительно сократилась: в Карелии за 10 лет – на 10%, в Архангельской области – на 13% и в Мурманской – на 17% (рис. 2.7 и Рис. 2.8.). В последние годы темпы снижения численности населения замедлились и составляют примерно 1% в год (Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006).

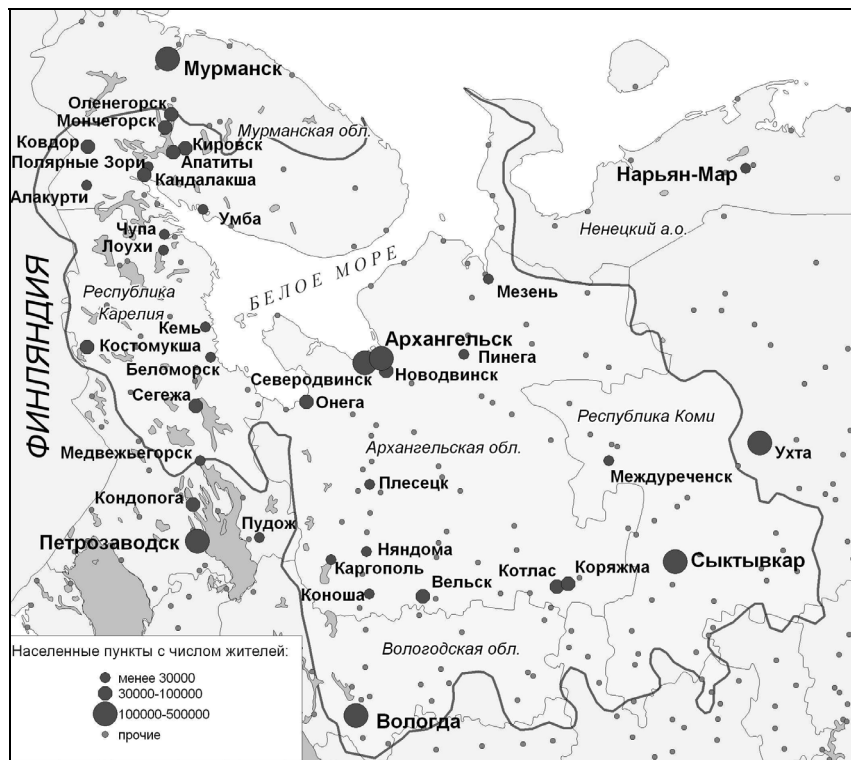


Рис. 2.8. Населенные пункты на водосборе Белого моря

Заработная плата населения наиболее северной и дискомфортной территории – Мурманской области, – как и раньше, превышает показатели других регионов, и примерно на 40% – уровень России. Кроме того, промышленные предприятия, расположенные в ББМ, производят продукцию, востребованную как на внутреннем российском, так и на внешнем

рынках, вследствие чего они способны поддерживать высокий уровень зарплаты. Но высокая зарплата компенсируется высокими ценами. Среднедушевые доходы населения в регионе уже меньше, чем в России, и в 2006 г. рост реальных доходов населения был ниже, чем в России (рис. 2.9).

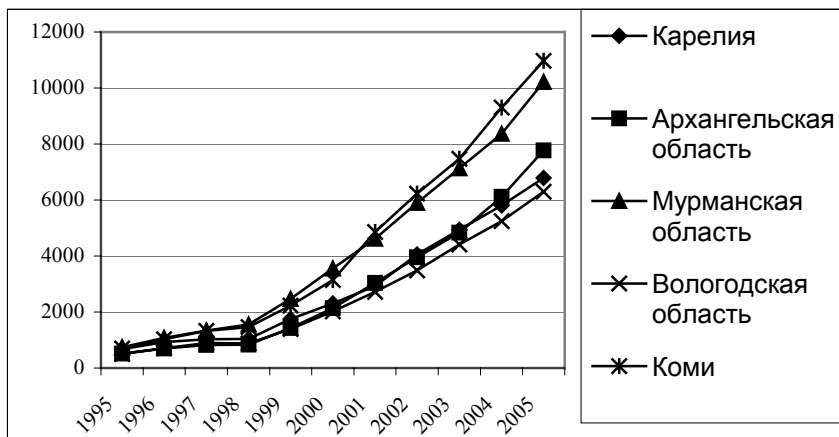


Рис. 2.9. Динамика среднедушевых доходов населения регионов, полностью или частично входящих в ББМ, руб.

В последние годы реальные доходы населения в Архангельской области росли быстрее, чем в РФ, лишь в 2006 г. темпы роста были ниже. В Карелии и, особенно в Мурманской области реальные доходы населения увеличиваются медленнее, чем в РФ. Если еще в 1995 г. среднедушевые доходы населения в Мурманской области превышали уровень России на 43%, то в 2005 г. уже только на 28%. В то же время уровень жизни растет. Среднедушевые доходы примерно в 2.1–2.4 раза превышают прожиточный минимум (в 1995 г. – в 1.6–1.8 раз), что, правда, несколько меньше, чем, например, в Санкт-Петербурге, где коэффициент 3.8 (табл. 2.2). Следует отметить, что, хотя в абсолютном выражении заработная плата растет, реальные доходы населения в отдельные годы снижаются, так как инфляционные процессы развиваются более интенсивно.

Т а б л и ц а 2.2

Основные показатели уровня жизни регионов, полностью или частично входящих в БМ, 2005 г.

Регион	Среднемесячная заработная плата, руб.	Среднедушевые доходы населения, руб.	Соотношение среднедушевых доходов и прожиточного минимума, (разы)
Архангельская область	9874	7769	2,4
Мурманская область	12510	10219	2,3
Карелия	8730	6783	2,1
Вологодская область	8828	6295	2,6
Республика Коми	11612	10977	3,2

В регионе достаточно высокий уровень безработицы, хотя ситуация постепенно улучшается – снижается уровень безработицы, и хотя в среднем он выше, чем в России, но незначительного, а в Архангельской области в последние годы он даже ниже среднероссийского. В 1990-х годах в Мурманской области уровень общей безработицы достигал 21%, а официальной – 6.1%.

В регионе БМ расслоение населения несколько меньше, чем в России. Доля населения с доходами ниже величины прожиточного минимума постепенно уменьшается, причем в Архангельской области за последние пять лет она уменьшилась почти в два раза. Коэффициент Джини, характеризующий разницу доходов 20% наиболее богатых и 20% наиболее бедных, во всех трех субъектах существенно меньше, чем в России, например в Архангельской области он равен 0.364 против 0.404 в РФ. Также коэффициент фондов, характеризующий, во сколько раз доходы 10% наиболее богатых больше доходов 10% наиболее бедных, во всех трех субъектах меньше, чем в РФ. В Мурманской области коэффициент фондов равен 11.6, а в России – 14.7 или на четверть больше.

2.4. Инвестиции

После длительного спада в начале и середине 1990-х годов объем инвестиций в экономику региона БМ после девальвации стал быстро расти (табл. 2.3). Если в Архангельской области он существенно превышал уровень РФ на душу населения, то в Карелии и Мурманской области был примерно на 15% меньше. Почти половина инвестиций в регион БМ приходится на Архангельскую область (Социально-экономические проблемы Карельского Прибеломорья, 1992; Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006).

В структуре инвестиций также существуют заметные различия. В Карелии и Мурманской области около 55–60% всех средств вкладывается в машины и оборудование, что говорит о модернизации экономики территорий. В Архангельской области доля вложений в машины и оборудование в 2005 г. составляла всего 23%, и, значит, происходило расширение производств и новое строительство, соответственно эффект для окружающей среды был меньше (Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006).

Т а б л и ц а 2.3

Динамика инвестиций регионов, полностью или частично входящих в ББМ, млрд. руб.

	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Архангельская область	2160	2476	2690	2353	4018	10471	15114	23809	28629	32657	45234
Мурманская область	2049	1930	2389	1800	4014	7190	10678	9976	13182	14805	18764
Карелия	1261	1208	1165	1307	2875	6396	8362	9191	9984	13741	14746
Вологодская область	2605	3193	3076	3549	6080	8593	10333	13923	18271	43109	61183
Республика Коми	3941	5325	5223	4376	6575	17098	21697	22059	25422	34481	54874

Инвестиционная привлекательность ББМ для зарубежных партнеров невелика. Некоторое исключение составляют восточная часть Архангельской области и север Республики Коми, где развитие топливно-энергетического комплекса привлекательно для иностранных фирм. В основном иностранные финансовые потоки направляются на развитие и модернизацию топливно-энергетического и лесопромышленного комплексов, торговлю и пищевую промышленность. Российские инвестиции в ББМ гораздо больше, они играют существенную роль в развитии промышленности и инфраструктуры региона. К тому же заметную часть иностранных инвестиций составляют кредиты, которые крупные фирмы (такие, как «Северсталь») берут в западных банках для модернизации производства.

2.5. Секторы региональной экономики

Для более детального анализа выделяется три региона (Архангельская и Мурманская области и Республика Карелия), поскольку их экономика, основные ресурсы, крупнейшие предприятия полностью или большей частью входят в ББМ. Эти три региона имеют выход к Белому морю. Лишь

небольшая часть территории Республики Коми и Вологодской области входят в ББМ, и доля этих территорий мала в экономике данных двух регионов, которые к тому же не имеют выхода к Белому морю. Их крупнейшие предприятия находятся за пределами ББМ. Развитие и влияние на окружающую среду предприятий Республики Коми и Вологодской области, находящихся на территории ББМ, было рассмотрено выше.

Как уже отмечалось выше, экономика ББМ основывается на промышленном производстве. Другие отрасли, в том числе строительство, транспорт и сельское хозяйство, имеют меньшее значение. Доля сферы услуг, активно развивающейся в последнее время, в Архангельской и Мурманской областях составляет менее 50% от ВРП, но этого явно недостаточно. Эти показатели уступают аналогичным показателям развитых стран, в том числе и скандинавских.

Архангельская область

Экономика области в последние годы устойчиво развивается. В середине 1990-х годов Архангельская область, значительную часть экономики которой составляет военно-промышленный комплекс, была в наиболее сложном финансовом положении – прекратилось финансирование военных заказов, не запускались ракеты с космодрома, закончились испытания ядерного оружия на Новой Земле. Уровень менеджмента на крупнейших предприятиях был очень низким. В результате в области много специалистов стало безработными, задолженность по выплатам заработной платы достигала полутора лет (Денисенко, 2003).

После девальвации рубля ситуация стала меняться. Оживление внутреннего рынка и рост оборонного заказа способствовали восстановлению машиностроения, часть запусков ракет была перенесена с Байконура в Плесецк. На Новой Земле стали активно заниматься геологоразведкой, были найдены месторождения полезных ископаемых. Резко возрос объем вложенных в Архангельскую область инвестиций, особенно иностранных. В 2002 г. рост ВРП замедлился, но в 2003-2004 гг. темпы роста ВРП снова увеличивались. Доля области в суммарном ВРП региона ББМ – 47%.

Основные источники загрязнения водных объектов – ОАО «Котласский ЦБК», ОАО «Архангельский ЦБК», ОАО «Соломбальский ЦБК», ГУП «ПО «Севмашпредприятие». Основные источники загрязнения атмосферного воздуха – ОАО «Архангельский ЦБК», Северодвинская ТЭЦ-1, Архангельская ТЭЦ, ОАО «Котласский ЦБК», ОАО «Соломбальский ЦБК».

В структуре промышленности наибольшую долю имеет обрабатывающая промышленность – 53% (а без учета Ненецкого округа – 81%), удельный вес добычи полезных ископаемых – 36%, а производства и распределения электроэнергии, газа и воды – 11% (Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006). Промышленное производство растет, но рост нестабилен – в 2004 г. он составил 165% (за счет машиностроения), а в 2006 г. – 102.5% (без учета Ненецкого округа всего 100.4%). Стабильно растет только производство и распределение электроэнергии, газа и воды.

Основу промышленности области составляет ЦБП (44% обрабатывающей промышленности или 46% производства части области, входящей в ББМ), два крупнейших предприятия которой, Архангельский и Котласский ЦБК, включают лесозаготовительные фирмы. Архангельский ЦБК полностью загрузил производственные мощности, при вложении 330 млн. евро возможно увеличить производство целлюлозы еще на 20% и построить завод нейтральной сульфитной полуцеллюлозы. Лесозаготовительные предприятия Котласского ЦБК получают современную технику и увеличивают объем лесозаготовок, их доля в области превышает четверть. За 2003–2006 гг. в области в модернизацию лесозаготовок было вложено около 2 млрд. руб. Оба ЦБК также модернизируются, причем в Котласе значительные средства вкладываются в экологические проекты. В число крупных предприятий ББМ входит также ОАО «Соломбальский ЦБК». Треть российской целлюлозы и примерно 9% бумаги производится в области. Развита деревообрабатывающая промышленность, в частности ОАО «Соломбальский ЛДК», доля области в заготовке древесины и производстве пиломатериалов в России – примерно 11%. Также значительны производства ДВП и фанеры.

Архангельский ЦБК затратил в 2002 г. на природоохранные мероприятия 558 млн. руб., а в 2004 г. – 682 млн. руб. Соответственно, потребление свежей воды уменьшилось на 8%, а выбросы в атмосферу – на 22%. Предприятие по 11 из 17 нормируемых показателей работает в границах предельно допустимого сброса. В 2004 г. предприятие прошло сертификационный аудит на соответствие стандарту ГОСТ Р ИСО 14001-1998. За семь лет при росте производства показатели вредных выбросов в атмосферу и воду снижаются. Взвешенных веществ в выбросах ЦБК в Северную Двину в 2006 г. было в три раза меньше, чем в 2003 г.

На Котласском ЦБК модернизация котлов стоимостью 300 млн. руб. приводит к уменьшению выбросов сернистых соединений примерно вдвое, также уменьшает выбросы строительство выпарной станции стои-

мостью около 900 млн. руб. Строится система экологического менеджмента, которая должна отвечать ISO 14001, вводится добровольная лесная сертификация в соответствии с принципами FSC (Шириков, 2005).

С 1999 г. успешно развивается машиностроение, растет его доля в промышленном производстве, причиной является конверсия и рост заказов предприятий топливно-энергетического комплекса. В результате конверсии было освоено производство траулеров, барж и буровых платформ. Фирмы «Севмашпредприятие» и «Звездочка» начали получать военные заказы, стали заниматься модернизацией построенных ранее судов и утилизацией судов, подлодок и ракет, строится первая в мире плавучая атомная теплоэлектростанция. Фирма «Росшельф» планирует добывать в Баренцевом море 50 млрд. м³ газа и разместила на машиностроительных заводах области заказы на строительство ледостойких буровых платформ. В 2005 г. увеличение финансирования оборонного заказа позволило увеличить объемы производства отрасли в 2,3 раза, и его доля в промышленном производстве части области, входящей в ББМ, достигла 34%.

Увеличивается производство строительных материалов, пищевой продукции, в т.ч. и рыбопродукции. Улов рыбы был максимальным в 2001 г., когда он достигал 5% от российского. Затем наступил длительный спад, и лишь в 2006 г. улов рыбы и производство рыбопродукции увеличились. Основные районы промысла находятся в Атлантике, объем прибрежного промысла в 2005 г. составил 4,3, а в 2006 г. – 7,8 тыс. тонн. Квота на промышленный лов наваги на 2007 г. в Белом море для Архангельской области составляет 345 тонн, сельди беломорской – 690 т., семги – 17 тонн, горбуши – 83 тонны.

Серьезной проблемой является необходимость обновления флота. Рыбаки не заинтересованы сдавать выловленную рыбу в российские порты. Выловленная в 200-мильной зоне рыба считается импортной, поэтому надо платить пошлину до продажи рыбы, что занимает несколько суток (а в Норвегии – менее 1 часа). Проверяют рыбаков в России более десяти госинспекций, причем за отдельную плату. Пошлина в иностранном порту не превышает 10%, в российском только НДС почти в два раза больше. На оформление всех документов в иностранном порту (приход, разгрузка, отход, пополнение запаса топлива) уходит 3-5 часов, в российском порту – 2-3 дня даже для 10-минутной стоянки.

В 2005 г. на водосборе начато промышленное освоение месторождения алмазов «Ломоносовское» (запасы составляют 12 млрд. долларов). В 2006 г. уровень добычи превысил 800 тыс. тонн руды и первая партия алмазов направлена на оценку в Гохран. ОАО «Североалмаз» (дочерняя

фирма «Алрось») обеспечен запасами на 50 лет, но требуется около 350 млн. долларов для выхода на проектный уровень добычи. Одновременно создаются мощности и по огранке алмазов. Кроме того, в Мезенском районе разведано месторождение, запасы которого оцениваются в 5.5 млрд. долларов.

Кроме алмазов на территории области осуществляется добыча бокситов, известняков и глин для цементного производства, известняков для ЦБП, гранитов, песков и песчано-гравийных смесей для строительной индустрии и дорожного строительства. В 2001-2002 гг. добыча полезных ископаемых упала примерно на 65%, в последние годы она растет.

Все нефтяные и газовые месторождения области находятся за пределами ББМ в Ненецком округе, но эти топливно-энергетические ресурсы являются основой дальнейшего развития экономики области. Наличие месторождений углеводородов привлекает в область иностранные инвестиции, их объем в несколько раз превышает вложения в Карелию и Мурманскую область. Значительные вложения осуществила фирма «Сопосо» (разработка Ардалинского месторождения), которая добывает 3.5 млн. тонн нефти в год. «Лукойл» вложил в свою дочернюю фирму в области 3.5 млрд. руб. и планирует добывать 7 млн. тонн нефти в год.

Серьезные вложения в область способствуют развитию строительства, так, за 2004-2005 гг. объем подрядных работ удвоился, а в 2006 г. вырос еще на 10%. После длительного спада в 2006 г. выросло производство сельскохозяйственной продукции. В то же время рост перевозок грузов наоборот приостановился. Грузооборот Архангельского морского порта составляет 6.5 млн. тонн, в основном нефтепродуктов. Ограничения для развития связаны с невозможностью принимать большие суда, необходимостью ледокольной проводки судов с января по апрель, потребностью постоянных землечерпательных работ (подходные каналы быстро заносит песком).

Огромное значение для Архангельской области имеет развитие транспортного проекта «Белкомур» – сети дорог, связывающих Урал и Скандинавию. Часть дорог уже построена, осталось лишь несколько участков, в основном на стыках регионов.

Объем инвестиций в экономику области растет непрерывно с 1999 г., и в 2005 г. составлял 58% от всех инвестиций в три рассматриваемых субъекта. Около половины инвестиций приходится на Ненецкий округ. Если в Карелии и Мурманской области 50–60% инвестиций приходится на машины и оборудование, то в Архангельской области – 23–33% в

2004-2005 гг. В Ненецком округе подавляющая часть инвестиций идет на добычу полезных ископаемых, а в остальной части области – на развитие транспорта. В 2006 г. объем инвестиций в область значительно вырос (без учета Ненецкого округа – на 30%), основные вложения были сделаны в трубопроводный транспорт (продолжается строительство газопровода Нюксеница-Архангельск). Максимальный объем иностранных инвестиций в экономику области был сделан в 2005 г. – почти 650 млн. долларов.

Экспорт в 2001-2005 гг. постоянно рос и превысил в настоящее время 1 млрд. долларов. На экспорт идет большая часть продукции ЛПК. Растет экспорт лесоматериалов, в том числе и необработанных. В производстве отдельных продуктов доля экспорта превышает две трети. Объем экспорта услуг превышает 240 млн. долларов или 1% от РФ.

Доходы бюджета растут, но велика его зависимость от поступлений из федерального бюджета. В 2003 и 2005 гг. бюджет имел дефицит.

Доходы населения в последние годы растут и показатели близки к аналогичным по России и другим регионам. Темпы роста немного больше, а уровень доходов – ниже, чем в России. Количество безработных стабилизировалось с 2001 г., но в последние два года снижается. Уровень безработицы меньше, чем в России. Продолжается снижение численности населения и за счет миграции, и за счет естественной убыли.

Мурманская область

Темпы роста ВРП области небольшие, а в 2002 г. он даже уменьшился на 2%. Тем не менее, среди рассматриваемых трех субъектов ВРП на душу населения в области максимальный. Доля области в суммарном ВРП трех регионов – 36% (Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006).

В структуре экономики области велика доля промышленности – почти 52%, но поскольку значителен удельный вес добычи полезных ископаемых, то развитие промышленности нестабильно. Спад в промышленности продолжался до 1996 г., когда производство было минимально – 60% к уровню 1991 г., а затем начался постепенный рост. В 2005 г. производство выросло на 0.2%, а в 2006 г. – на 2.2%.

Основные источники загрязнения водных объектов – ОАО «Апатит», ОАО «Кольская ГМК», ОАО «Ковдорский ГОК», ОАО «Ковдорслюда», ОАО «Ловозерская горно-обогатительная компания», ОАО «Олкон». Основные источники загрязнения атмосферного воздуха – ОАО «Кольская

ГМК», ОАО «Апатит», ОАО «Апатитская ТЭЦ», филиал ОАО «СУАЛ» «КАЗ-СУАЛ».

Кольский полуостров является одним из уникальных мест на Земле с точки зрения разнообразия и богатства минеральных ресурсов (рис.2.1.), многие из которых имеют промышленное значение и в настоящее время находятся в разработке (железная руда, никель, марганец, цинк, редкоземельные металлы). Также важны залежи фосфатов и слюды (Мурманская область, 2001; Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России, 2006).

В РФ только в Мурманской области добывается апатитовый и нефелиновый концентрат. Благодаря огромным залежам многокомпонентных апатит-нефелиновых руд, расположенным в Хибинах, область является основным в России поставщиком сырья для производства фосфорных удобрений. Мурманская область занимает второе место в России (после Норильска) по залежам медно-никелевых руд. Руда обрабатывается на заводах «Печенганикель» и «Североникель», принадлежащих холдингу «Норильскникель».

Доля области в добыче железной руды в РФ – почти 9%. ОАО «Олкон» планирует значительно увеличить объемы производства железорудного концентрата и постепенно переходить на подземный способ добычи руды. Имеющиеся запасы руды обеспечат работу предприятия на долгосрочную перспективу с объемом производства концентрата 4.5 – 4.7 млн. тонн в год. В 2005 г. на Оленегорском ГОКе был введен в эксплуатацию опытно-промышленный участок подземного рудника мощностью 2.5 млн. тонн. Значительные средства вкладываются в модернизацию Ковдорского ГОКа, с 1993 г. началась переработка отходов собственного производства.

Обрабатывающие производства составляют всего 47% промышленного производства (2005 г.) и ведущая отрасль – металлургия. В 2005 г. объем металлургического производства вырос на 1.8% за счет роста производства никеля, алюминия и кобальта. Кандалакшский алюминиевый завод (филиал «КАЗ-СУАЛ») стал по культуре производства, решению экологических проблем одним из лучших заводов России. В 2005 г. было завершено строительство крупнейшего в России комплекса сухой газоочистки стоимостью 20 млн. долларов, позволяющего возратить в производственный процесс 99% промышленных выбросов и снизить расход сырья. В результате завод стал в 2 раза безопаснее для окружающей среды.

Кольская ГМК в 2003 г. в восстановление нарушенных экосистем вложила 9 млн.руб, а в 2004 г. – 20 млн.руб и еще столько же в рекультивацию и восстановление лесов. Модернизация на одном из подразделений – комбинате «Печенганикель» – привела к уменьшению сброса диоксида серы за год с 120 до 110 тыс. тонн. На филиале «КАЗ-СУАЛ» введена установка сухой газоочистки – крупнейшая в СНГ данного типа, ведется работа по внедрению интегрированной системы экологического менеджмента (Шириков, 2005).

Кроме минеральных, важное значение для региона имеют биологические ресурсы (в частности, рыба). До 1990 г. комплекс давал стране до 15% всего производимого объема рыбо- и морепродукции, или более 1.2 млн.тонн. В 1990-х годах объем добычи рыбы упал в два раза. Сложное положение сложилось в сфере переработки рыбы и морепродуктов. В начале 1990-х годов выпуск продукции по сравнению с 1990 г. упал в десятки раз. В последующие годы, в основном за счет создания новых предприятий малого бизнеса, производство продукции достигло 20 тыс.тонн, что примерно в 5 раз меньше уровня 1990 г.

В области действуют крупные («Мурманский траловый флот») и множество мелких фирм, которые в основном поставляют рыбу и морепродукты на европейский рынок (в европейских странах существенно меньше налоги и сборы, в несколько раз быстрее работают портовые службы). Примерно 15–20% российской добычи рыбы и морепродуктов обеспечивают предприятия области. В 2005 г. выпуск товарной пищевой рыбной продукции по сравнению с предыдущим годом возрос на 20%. В 2005 г. вылов рыбы и других морепродуктов, по сравнению с предыдущим годом, увеличился на 10% и составил 585.1 тыс. тонн, а максимальным вылов был в 2001 г. – 649 тыс. тонн. Основными проблемами, сдерживающими развитие сектора, являются несовершенная структура флота, неупорядоченность доступа к рыбным ресурсам и запоздалые решения федеральных структур. Имеющиеся рыбопромысловые и транспортные суда в своей массе являются высокочрезвычайными и низкотехнологичными. Свыше 60% судов в соответствии с существующими нормативами имеют предельный срок эксплуатации.

Улов рыбы в Белом море и внутренних водоемах незначителен, но в последние годы развивается рыбоводство. Планируется постепенное увеличение производства форели, лосося и семги к 2015 г. до 15 тыс. тонн.

Для сохранения бездефицитного энергобаланса необходимо в ближайшие годы начать строительство АЭС-2 для замены выходящих из эксплуатации реакторов Кольской АЭС. Длительные перспективы для

развития Мурманской области связаны с разработкой больших нефтяных и газовых месторождений, расположенных на шельфе Баренцева моря (Штокманское месторождение и другие). Кроме того, в дальнейшем возможно строительство нефте- и газопроводов, проходящих по территории ББМ, создание нефтеналивных перегрузочных терминалов.

Строительство развивается нестабильно – после роста объема выполненных работ в 2004-2005 гг. последовал спад на 11% в 2006 г. В области незначительны объемы жилищного строительства, что связано с оттоком населения. С 2002 г. устойчиво развивается транспорт. Наличие незамерзающего порта делает эту отрасль значимой для РФ, и ее доля в два раза выше, чем по численности населения.

Объем инвестиций в экономику Мурманской области больше, чем в Карелию, но примерно в два раза меньше, чем в Архангельскую область. Быстрый рост инвестиций после девальвации рубля закончился падением в 2002 г., но с 2003 г. начался новый период роста. Значительные средства вкладываются в модернизацию производства – объем инвестиций в машины и оборудование примерно в полтора раза превышает российский уровень. Очень мала доля привлеченных средств – почти 62% инвестиций составляют собственные средства. Треть средств идет в добычу полезных ископаемых и немного меньше четверти – в развитие транспорта и связи. Вложения в обрабатывающую промышленность, как и в Архангельской области, составили всего 9%. Объем иностранных инвестиций в последние годы не превышал 30 млн. долларов.

Значительная часть произведенной продукции экспортируется, причем экспорт быстро рос до 1997 г., превысив 1.3 млрд. долларов. В 1999-2000 гг. объем экспорта был ниже 0.9 млрд. долларов, затем снова начался рост, и в 2005 г. экспорт достиг 1.2 млрд. долларов, при том, что поставки в страны СНГ немного превышают 3 млн. долларов. Увеличение стоимости экспорта связано, прежде всего, с повышением мировых цен на важнейшие сырьевые товары. Товарная структура экспорта имеет сырьевую направленность: черные и цветные металлы и изделия из них – 54%, апатитовый концентрат – 13%, рыба и морепродукты – 23%. Объем экспорта услуг превышает 280 млн. долларов или 1.2% от РФ.

До 2005 г. доходы бюджета области быстро росли, опережая рост цен, но в 2005 г. рост доходов составил всего 6%, и образовался незначительный дефицит бюджета. Высокие доходы населения способствовали и тому, что основным источником доходов бюджета является налог на доходы физических лиц.

Реальные доходы населения растут и примерно на 20% превышают среднероссийский уровень, что значительно меньше, чем в 1980-х годах. Количество безработных росло до 1998 г. и с 1999 г. стало уменьшаться. По-прежнему уровень безработицы – максимальный в СЗФО и в полтора раза превышает уровень России. Население области быстро сокращается, причем в основном за счет миграции. Коэффициент естественной убыли в 1.7 раза меньше, чем в РФ.

Республика Карелия (РК)

В промышленности республики выделяются два сектора. В первом – отрасли, сумевшие довольно быстро найти новые рынки сбыта за рубежом (производство лесоматериалов, ЦБП и металлургия) и монополисты, сохранившие отечественный рынок (производство электроэнергии). Во втором – не выдержавшие конкуренции обрабатывающие производства. Спад производства внутри этих групп разительно отличается (14% и 50%, соответственно за 1991-1998 гг.). Доминирующими в РК являются производство лесоматериалов, ЦБП и металлургия, ориентированные на экспорт. Все большую роль начинает играть транспорт, что вызвано необходимостью вывоза готовой продукции из Карелии из-за уменьшения внутреннего потребления и переориентации на экспорт (Дружинин, 2000; Дружинин, 2005).

После девальвации рубля экономика республики быстро росла, затем темпы роста были близки к нулю. Рост цен на металл привел к значительному росту промышленности в 2005 г., но уже в 2006 г. резко снизились темпы роста, вернувшись к уровню предыдущих лет (Республика Карелия, 2006).

Индекс промышленного производства в 2006 г. составил 103%, в то время как в 2005 г. он достиг 118.7%. Наибольший рост был отмечен в добыче полезных ископаемых (107.3%). Производство окатышей было в 2006 г. максимальным за все время работы Костомукшского ГОКа и составило 103% к уровню докризисного 1989 г. В обрабатывающей промышленности рост составил 103%, а производство и распределение электроэнергии, газа и воды снизились на 0.7%.

К числу наиболее крупных загрязнителей окружающей среды промышленными отходами относятся: ОАО «Карельский окатыш», ОАО «Кондопога», ОАО «Сеgezский ЦБК», ОАО «ЦЗ Питкяранта», ОАО «ДФК Бумэкс», ЗАО «Петрозаводскмаш», филиал СУАЛ «НАЗ-СУАЛ». Основные источники загрязнения водных объектов – ОАО «Кондопога»,

ОАО «Сегежский ЦБК», ОАО «ЦЗ Питкяранта». Основные источники загрязнения атмосферного воздуха – ОАО «Карельский окатыш», ОАО «Кондопога», ОАО «Сегежский ЦБК», филиал СУАЛ «НАЗ-СУАЛ», ОАО «ЦЗ Питкяранта».

В структуре добывающих производств большая часть приходится на добычу железной руды, но ее доля снижается из-за падения цен на руду. Соответственно, и в целом доля добывающих производств уменьшается, несмотря на рост производства: добычи железной руды на 7% и щебня на 31.2%. В результате в 2006 г. выросла доля обрабатывающих производств. Рост обрабатывающего производства обеспечили ЦБП и деревообрабатывающая промышленность. Рост отмечен и в производстве машин и оборудования.

Предприятия металлургии стали уменьшать воздействие на окружающую среду. На ОАО «Карельский окатыш» выбросы сернистого ангидрида к уровню 1990 г. сократились в два раза, модернизация обжиговых машин позволила сократить выбросы азота и серы. Начавшаяся на филиале СУАЛ «НАЗ-СУАЛ» в 1994 г. модернизация позволила сократить суммарные выбросы вредных веществ с 9.6 до 7.2 тыс. тонн в 2000 г., особо загрязняющих веществ с 3.3 до 2.6 тыс. тонн, а содержание фтора в воде стало в пределах нормы. Ведется работа по внедрению интегрированной системы экологического менеджмента и менеджмента профессионального здоровья и безопасности в соответствии с ISO 14001.

До половины промышленного производства республики дает ЛПК. Стабильно растет производство бумаги и целлюлозы. В то же время после нескольких лет роста в 2005 г. производство деловой древесины упало на 6.4%, а за 2006 г. еще на 1.8%. Это привело к небольшому снижению экспорта необработанных лесоматериалов и производства пиломатериалов.

ОАО «Кондопога» с 1994 г. вложило 0.9 млрд. руб в мероприятия по уменьшению выбросов в атмосферу и 1.8 млрд. руб на решение проблем очистки воды. Доля повторного и оборотного использования воды выросла на треть и достигла 86%. Выбросы диоксида серы уменьшились и составили 36% к уровню 1990 г. С 1999 г. ведется модернизация биологических очистных сооружений. Модернизация на ОАО «Сегежский ЦБК» позволила уменьшить выбросы в атмосферу и улучшить очистку воды. ОАО «ЦЗ Питкяранта» проводит модернизацию оборудования, которая позволит уменьшить воздействие на окружающую среду (Государственный доклад..., 2005 и 2006.).

После долгих лет спада в 2006 г. выросло сельскохозяйственное производство. Рост урожайности привел к увеличению производства зерна и картофеля. Продолжился рост эффективности животноводства, по надоям на корову Карелия на 42% превышает среднероссийские показатели.

Улов рыбы и морепродуктов составляет 42-72 тыс. тонн, длительное время он снижался, но в 2006 г. вырос на 5%. Основная часть добываемого флота сосредоточена в районах Северо-Восточной Атлантики – в Баренцевом море на промысле донных пород рыб (трески и пикши), а также в Норвежском море (на промысле сельди атлантической и скумбрии). Износ рыбопромыслового флота составляет более 60%.

Общая величина промысловых запасов рыб во внутренних водоемах республики оценивается в 52–55 тыс. тонн. В последние годы наблюдаются относительно небольшие колебания объемов добычи рыбы в пресноводных водоемах Карелии и Белом море (с 2.1 тыс. тонн в 1998 г. до 2.6 тыс. тонн в 2004 г.). Промышленная добыча биоресурсов проводилась на пяти водохранилищах, 12 озерах, одной реке и Белом море. Вылов мидий, выращиваемых на плантациях АО «Карелрыбфлот», с 1993 г. резко снизился по экономическим причинам. Вылов рыбы и добыча морепродуктов предприятиями Карелии в Белом море составлял 1-1.9, а в 2005 г. упал до 0.2 тыс. тонн.

На внутренних водоемах на водосборе Белого моря активно развивается форелеводство (объемы продукции хозяйств на территории Карелии составляют около 70% российского производства). В первую очередь это обусловлено наличием большого количества глубоководных водоемов с чистой, высокого качества водой и оптимальным температурным режимом, при котором осуществляется технологический процесс выращивания. В 1977 г. было выращено 2.5 тонн товарной продукции, а в 2006 г. рыбоводными хозяйствами выращено товарной форели и посадочного материала 6.8 тыс. тонн, что составляет 117% к 2005 г. и продолжает тенденции прошлых лет. Действует 30 хозяйств, в стадии проектирования находится еще более 20. Самая крупная в РФ форелевая фирма – ООО «Кивач» – выращивает 0.8 тыс. тонн форели. Готовые для размещения форелеводческих хозяйств водные объекты на водосборе позволяют выращивать до 17.5 тыс. т. форели в год, но для этого требуется создать производство качественных кормов.

В 2005-2006 гг. перевозки грузов были стабильны и превышали уровень прошлых лет. Железнодорожный транспорт в 2006 г. увеличил перевозки на 1.2% за счет роста перевозок окатышей и бумаги при снижении перевозок леса и строительных грузов. Фактически динамика показателей производства нескольких отраслей промышленности, прежде всего добычи железной руды, определяет динамику транспорта. Продолжается реконструкция Беломорско-Балтийского канала.

После трех лет спада в строительстве в 2005-2006 гг. возобновился рост. Были построены карьеры по добыче щебня, коммунальные объекты, автодороги, мосты, АТС и торговые объекты. Была завершена электрификация дороги Идель-Свирь, строительство деревообрабатывающего комплекса «Сведвуд Карелия», цеха по производству топливной щепы «Норд Интер Хаус», расширилась группа компаний «Кархакос».

Объем инвестиций в основной капитал рос в 2004–2006 гг. Увеличению объема инвестиций в экономику Карелии способствовала успешная деятельность по взаимоотношению с федеральными структурами. РАО «РЖД» увеличила вложения и продолжала электрификацию участков железной дороги и реконструкцию различных объектов, в результате доля инвестиций в транспорт составила 36.6%.

Объем иностранных инвестиций значительно вырос в 2006 г. (в 3.9 раза к 2005 г. или в 7 раз к 2004 г.). Также в несколько раз выросли прямые (в 4.6 раза) и портфельные инвестиции (в 2.8 раза). Основные инвестиции составляют кредит на освоение нового железорудного месторождения.

Внешнеторговый оборот продолжил начавшийся в 2002 г. рост и увеличился в 2006 г. на 19.2%. Более чем в два раза вырос экспорт котлов, машин и промышленного оборудования и составил почти 30 млн. долларов. Развитие группы компаний «Кархакос» привело к росту экспорта электрооборудования в 1.6 раза. ОАО «Карельский окатыш» увеличило экспорт в 1.7 раза, фактически весь прирост производства окатышей экспортировался. Экспорт в Финляндию на протяжении нескольких лет составляет примерно 1/3 всего экспорта. В структуре экспорта основную долю составляют продукция ЦБП, лесопродукция, металлы и изделия из них. Вырос экспорт машиностроительной продукции. Структура экспорта из РК стабильна в течение последних нескольких лет и вряд ли сильно изменится, лишь строительство деревообрабатывающих предприятий и введение пошлин на экспорт круглого леса могут уменьшить долю необработанной древесины и увеличить долю пиломатериалов.

Экономика республики была убыточна до девальвации рубля в 1998 г., затем стала прибыльной. В 2000-2001 гг. ЦБП обеспечивала высокую прибыль, затем эффект девальвации исчерпал себя и большинство отраслей экономики было убыточно. В 2004 г. начался рост цен на металл, и резко выросла прибыль ОАО «Карельский окатыш», что способствовало улучшению показателей в целом по республике. С началом падения цен уменьшилась прибыль ОАО «Карельский окатыш», но оно по-прежнему обеспечивает основную часть прибыли экономики республики. Прибыль добычи полезных ископаемых составила 5.1 млрд. руб, ЦБП – 2.5 млрд. руб, электроэнергетики – 0.25 млрд. руб, торговли и строительства – по 0.24 млрд. руб. Доля убыточных организаций сократилась незначительно и в полтора раза превышает уровень СЗФО. Доля просроченной задолженности в два раза превышает уровень России и в три – СЗФО.

Бюджет республики в 2005 г. был профицитным, но затем рост доходов замедлился, и в 2006 г. появился дефицит бюджета. Поступление налогов и сборов в бюджетную систему на душу населения в Карелии в два раза меньше, чем в Архангельской области, и в полтора – Мурманской.

Реально располагаемые денежные доходы населения стабильно росли в последние годы. Снижение занятости прекратилось, и в 2006 г. численность занятых в экономике республики немного выросла. Численность безработных несколько лет незначительно увеличивалась, а в 2006 г. уменьшилась.

Численность населения РК продолжала падать и составила на 1 января 2007 г. 693.1 тыс. чел. Надо отметить, что в 2006 г. рождаемость чуть-чуть выросла, а смертность продолжает уменьшаться. В результате естественная убыль населения немного снизилась.

2.6. Определение и идентификация социально-экологических индексов

Для определения влияния развития экономики на окружающую среду рассматривалось несколько достаточно простых индексов. Основными параметрами, характеризующими развитие экономики, являются ВРП и инвестиции. Развитие экономики региона определяется в первую очередь изменением ее структуры и для эффективного управления необходимо анализировать не только экономику региона в целом, но и ее структуру. Внешнее воздействие на региональный бизнес и предприни-

мательская активность приводят к постоянному изменению структуры экономики. В определенных ситуациях этот процесс может замедляться, могут происходить отрицательные структурные сдвиги, или положительные в краткосрочном плане изменения могут вести к созданию проблем для долгосрочного развития. Например, в силу разных причин наиболее эффективными могут стать технологически устаревшие производства. В 1990-х годах в большинстве регионов увеличилась доля сырьевых производств, наиболее рентабельных и эффективных для вложений инвестиций в то время.

Исследования изменения структуры экономики российских регионов в 1990-х годах показывают, что ее структура ухудшалась: росла доля добывающих отраслей, происходила деиндустриализация и упрощение производимой продукции, снижение конкурентоспособности, сжатие производств пятого технологического уклада относительно третьего, увеличение доли отраслей с высокой нагрузкой на окружающую среду. На основе статистической информации и данных специальных опросов можно рассматривать несколько вариантов разбиения экономики региона на секторы с учетом его особенностей, позволяющих анализировать и прогнозировать ее развитие. Главная цель – выделить секторы с различной эффективностью и различным воздействием на окружающую среду, изменение удельных весов которых приводит к различной динамике социально-экономических и экологических показателей. Выделив на первом этапе два-три сектора, по мере углубления исследований можно в дальнейшем рассматривать отдельные отрасли и подотрасли в зависимости от уровня технологий. Сложность дезагрегирования состоит в том, что информация частично отсутствует, а частично недоступна. Поэтому в работе приводятся результаты расчетов по агрегированным данным.

На основе анализа данных региона первоначально можно выделить три сектора: отрасли с высоким уровнем воздействия на окружающую среду (прежде всего металлургия и ЦБП), отрасли со средним воздействием (большинство отраслей промышленности, транспорт, строительство и другие) и отрасли со слабым воздействием (большинство отраслей сферы услуг). Динамика ВРП и других показателей оценивалась по данным за 1990–2005 гг., в данном разделе из-за проблем получения достоверной статистики динамические ряды показателей строились по сумме трех регионов – Республики Карелия, Архангельской и Мурманской областей, рассматривались также отдельные регионы (Регионы России, 2006; Регионы Северо-Западного федерального округа России., 2006; Республика Карелия в цифрах, 2006).

Для социально-экономического прогнозирования строились производственные функции, а прогнозирование воздействия на окружающую среду оценивалось через специальные индексы (Дружинин, 2005; Дружинин, 2000; Terzhevik et al., 2005). Обычно используемые индексы включают простые и комплексные параметры. Простые индексы характеризуют воздействие на отдельные показатели состояния окружающей среды. По ним можно строить графики и оценивать взаимосвязь отдельных экономических и экологических характеристик (рис. 2.10–2.16).

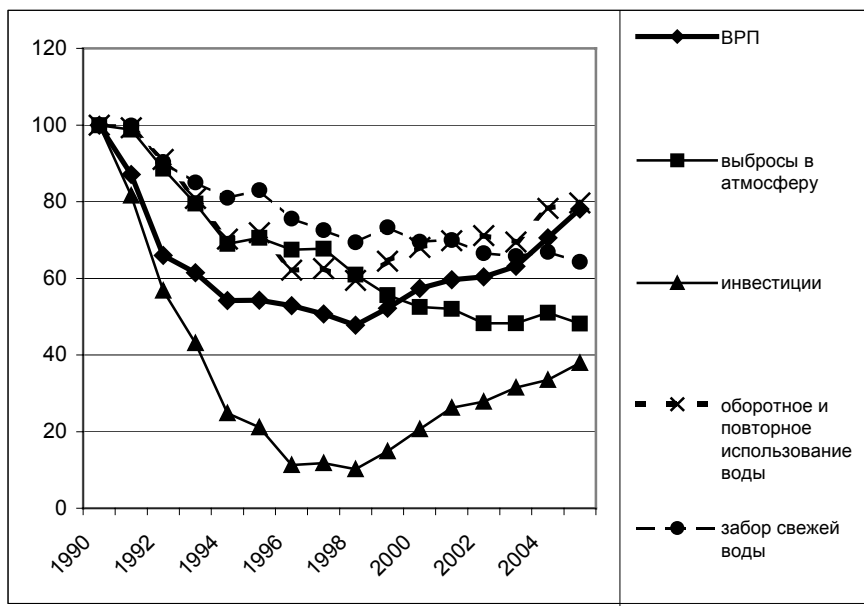


Рис. 2.10. Динамика некоторых показателей, характеризующих развитие ББМ (1990 г. принят за 100%)

Развитие региона в 1990-х годах, как и других российских регионов, характеризовалось значительным экономическим спадом, но как видно из рис. 2.10, уменьшалось и вредное воздействие на окружающую среду.

Примерно с 2000 г. стали уменьшаться удельные показатели (рис. 2.11), что говорит об эффективности природоохранной деятельности. Почти на треть уменьшились удельные выбросы в атмосферу от стацио-

нарных источников в расчете на единицу ВРП. Сокращаются также и удельные забор свежей воды и сброс загрязненных вод. Выбросы в атмосферу уменьшаются быстрее, т.к. основные загрязнители – крупные предприятия ЦБП и металлургии, экспортирующие свою продукцию и высококорентабельные. Они имеют финансовую возможность реализовывать крупные и эффективные экологические проекты.

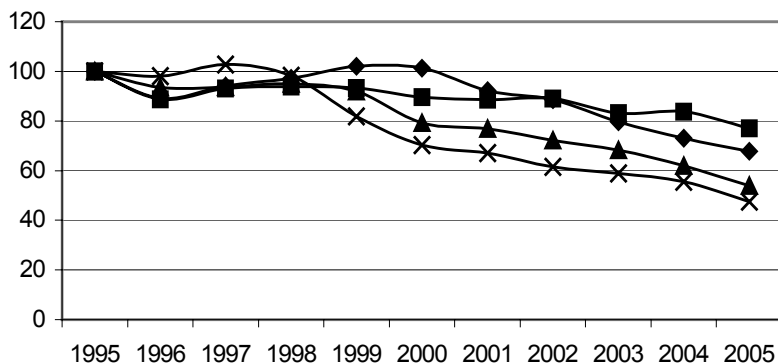


Рис. 2.11. Динамика отношения экологических показателей к ВРП БМ (1990 г. принят за 100%): объем оборотной и последовательно используемой воды к ВРП (■), сброс загрязненных вод к ВРП (◇), забор свежей воды к ВРП (▲), выбросы в атмосферу к ВРП (x)

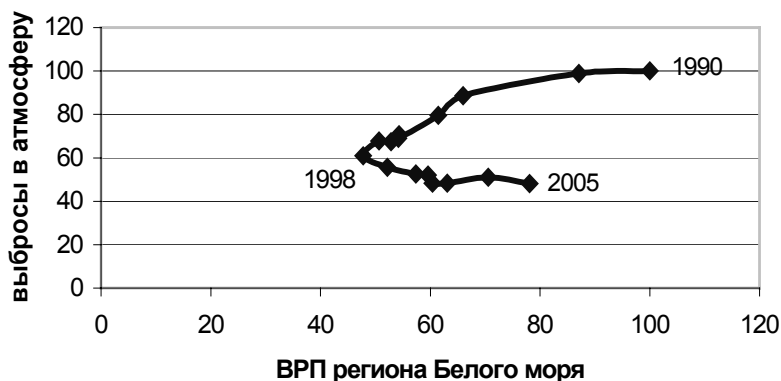


Рис. 2.12. Изменение динамики выбросов в атмосферу (1990 г. принят за 100%) в зависимости от динамики ВРП БМ (1990 г. принят за 100%).

На рисунке 2.12 показано, что в начальный период ВРП сокращается со 100% в 1990 г. до примерно 48% при уменьшении выбросов в атмосферу со 100% до 60%. Зависимость изменения показателей почти линейная. Затем с 1999 г. ВРП стал увеличиваться, и вырос почти в 2 раза – до примерно 80%, а выбросы в атмосферу продолжали снижаться, уменьшились до 48% от уровня 1990 г. и на этом уровне стабилизировались.

Из рисунка 2.12 видно, что сокращение ВРП до 1998 г. сопровождалось и уменьшением экологической нагрузки, что вполне логично, но и начавшийся рост ВРП после девальвации рубля не привел к ухудшению данной экологической характеристики. Данное явление можно объяснить либо структурными изменениями в экономике, либо модернизацией наиболее воздействующих на окружающую среду предприятий, улучшением охраны окружающей среды – ростом текущих расходов и природоохранных инвестиций.

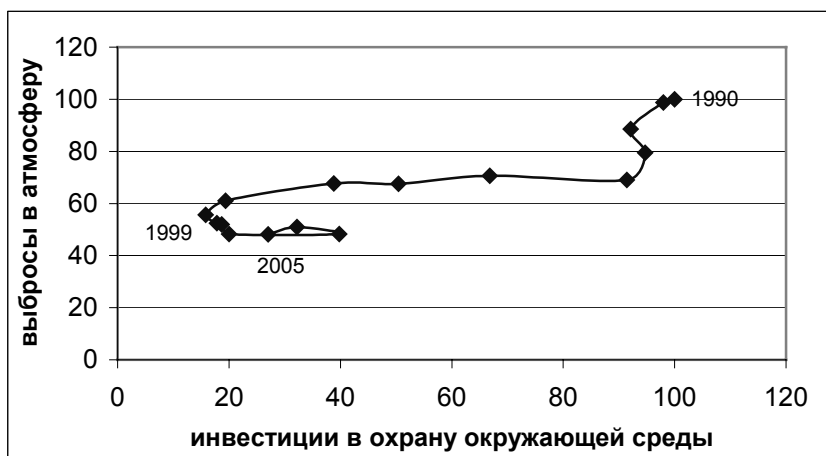


Рис 2.13. Изменение выбросов в атмосферу (1990 г. принят за 100%) в зависимости от динамики инвестиций на охрану окружающей среды БМ (1990 г. принят за 100%)

Первоначально инвестиции в охрану окружающей среды уменьшались незначительно, видимо завершались начатые объекты, а спад выбросов в атмосферу наоборот был быстрым (пропорционально спаду производства), но постепенно он замедлился, а объем инвестиций наоборот стал быстро падать и составил менее 20% к уровню 1990 г. В дальнейшем

инвестиции увеличивались и выбросы в атмосферу не возрастали при начавшемся с 1999 г. росте производства. Рисунок 2.13 показывает, что колебания объема инвестиций на охрану окружающей среды оказывали различное влияние на изменение объемов выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников. В начале 1990-х годов снижение выбросов происходило при неизменных инвестициях, затем резкое падение инвестиций во второй половине 1990-х годов не привело к изменению выбросов в атмосферу. В 2000-х годах рост инвестиций, возможно, способствовал тому, что увеличения выбросов не происходило. Снижение инвестиций в основной капитал до конца 1990-х годов сопровождалось снижением выбросов в атмосферу, но вряд ли можно говорить о взаимовлиянии, скорее оба эти процесса были связаны с экономическим спадом (рис. 2.14).

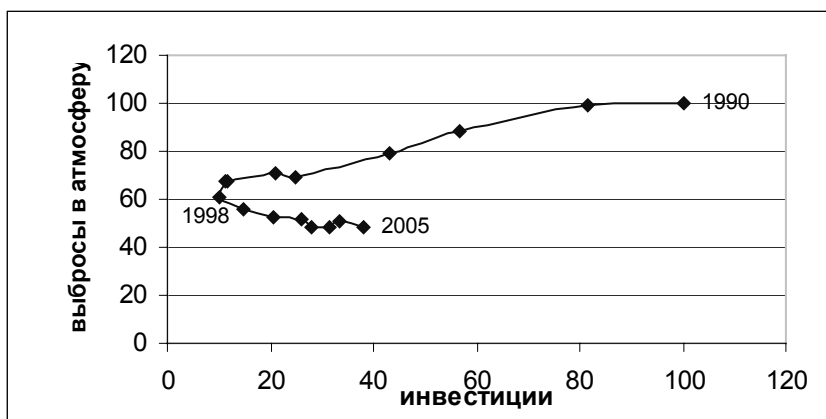


Рис 2.14. Изменение выбросов в атмосферу (1990 г. принят за 100%) в зависимости от динамики инвестиций БМ (1990 г. принят за 100%)

На графике видны две тенденции, каждая из которых приближенно описывается линейной зависимостью. До 1998 г. при примерно 10-кратном спаде инвестиций в экономику региона выбросы в атмосферу уменьшаются на 40%, а затем при четырехкратном росте инвестиций, значительная часть которых пошла на модернизацию производства и переход к более современным технологиям, выбросы в атмосферу снизились еще на пятую часть до 48% к уровню 1990 г.

После 1999 г. рост инвестиций в основной капитал сопровождался и снижением выбросов в атмосферу, что можно объяснить вложениями в модернизацию производства, особенно в ЦБП.

График показывает, что динамика ВРП и объемы оборотной и последовательно используемой воды практически линейно связаны. До 1998 г. они падали, а затем стали расти, причем продолжение тенденций приведет к тому, что при достижении ВРП уровня 1990 г. через некоторое время и объем оборотной и последовательно используемой воды достигнет уровня 1990 г.

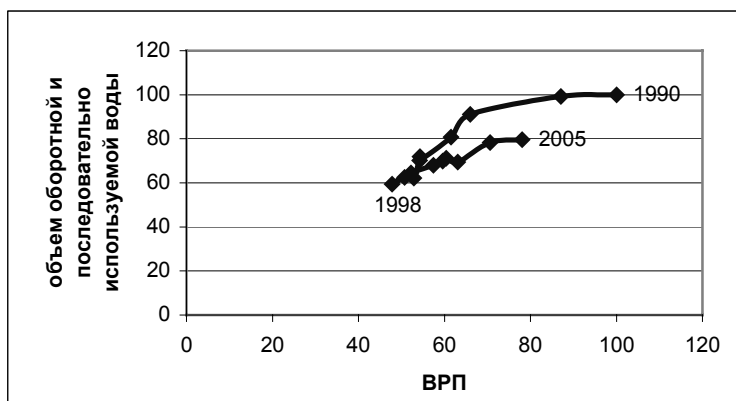


Рис 2.15. Изменение объемов оборотной и последовательно используемой воды (1990 г. принят за 100%) в зависимости от динамики ВРП БМ (1990 г. принят за 100%)

Объемы оборотной и последовательно используемой воды уменьшались во время спада в экономике, а затем стали расти, и постепенно приближаются к уровню 1990 г. (рис. 2.15). Использование свежей воды практически все время уменьшалось, и при спаде в экономике, когда инвестиции в охрану природы быстро уменьшались, и в период роста, когда происходила модернизация производства (рис. 2.16).

Использование свежей воды уменьшалось одновременно с падением ВРП, но существенно медленнее и в 1998 г. составило 69% к уровню 1990 г., а ВРП – 48%. Затем начался рост ВРП, а забор свежей воды стал медленно уменьшаться и при достижении ВРП 78% к уровню 1990 г., он составил 64% к уровню 1990 г.

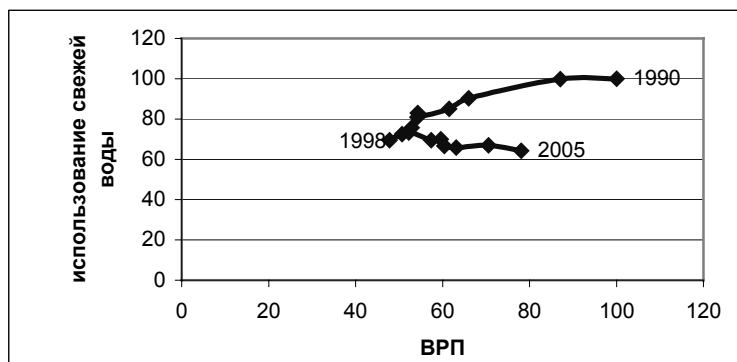


Рис 2.16. Изменение использования свежей воды (1990 г. принят за 100%) в зависимости от ВРП БМ (1990 г. принят за 100%)

Динамика различных простых экологических индексов может существенно отличаться и их можно связывать с отдельными экономическими показателями или строить комплексные индексы, характеризующие различные стороны процесса.

Комплексные индексы интегрируют отдельные экологические индексы и демонстрируют макроуровень развития и состояния окружающей среды региона и уровень его экологической безопасности. Наиболее распространенной формой записи комплексного индекса является следующая:

$$U = \sum_j U_j, \quad U_i = K_j \frac{P_j}{Np_j}, \quad (2.1)$$

где j – простой экологический показатель; K_j – весовой коэффициент j -го показателя (при расчетах обычно принимался одинаковым); P_j – фактическое значение показателя; Np_j – нормирующий множитель (обычно за 100% бралось значение показателя в первый год).

В качестве показателей, характеризующих состояние окружающей среды и воздействие экономики на него, брались выбросы в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников, сброс загрязненных сточных вод в поверхностные водоемы, объемы воды, используемой в промышленности, образование токсичных отходов и другие. На их основе по формуле (2.1) формировался комплексный индекс – комплексный экологический показатель, характеризующий отрицательное воздействие экономики на окружающую среду (Государственный доклад, 2006; Регионы России, 2006).

Список рассматриваемых экономических показателей кроме ВРП и инвестиций может включать индексы промышленного производства, влияющего на окружающую среду (в т.ч. и отдельных отраслей – ЦБП, металлургии), индексы развития других отраслей, включая сельское хозяйство и т.д.

Для характеристики взаимодействия между развитием экономики региона, природоохранными мероприятиями и экологическим состоянием было предложено использовать специальные индексы, включающие экономические показатели, простые и комплексные экологические индексы. Можно рассматривать отношение скорости изменения экологического индекса, например, суммарного загрязнения (или суммы его отдельных видов, взятых с соответствующими весами) к скорости изменения ВРП или других показателей.

Для оценки экологической ситуации по отношению к развитию ВРП предлагается следующий индекс:

$$I_{ecol} = \frac{I_{pol}}{I_{GRP} - I_{EF}}, \quad (2.2)$$

где I_{pol} - логарифмическая производная (темпы прироста по сглаженным данным) простого или агрегированного показателя воздействия экономики на состояние окружающей среды; I_{GRP} - логарифмическая производная ВРП; I_{EF} - логарифмическая производная объема финансирования природоохранных мероприятий (в качестве I_{EF} обычно рассматривались кумулятивные инвестиции за 5 лет).

Предложенный индекс имеет недостаток: он не учитывает возможности изменения воздействия, а в определенные периоды могут оказывать определяющее влияние разные факторы.

Был предложен следующий подход, который позволял исследовать и прогнозировать влияние развития экономики и вложений в охрану окружающей среды. Данный подход использует и развивает методы, сформировавшиеся в теории производственных функций. Было построено уравнение, определяющее зависимость показателей, характеризующих воздействие экономики на состояние окружающей среды, от динамики ВРП и вложений в охрану окружающей среды. В темпах прироста (логарифмических производных) оно выглядит следующим образом:

$$I_{pol} = \alpha I_{GRP} - \beta I_{EF} + p, \quad (2.3)$$

где параметр p характеризует влияние неучтенных факторов, в т.ч. и структурных сдвигов, а параметры α и β характеризуют степень влияния факторов: при увеличении ВРП на 1% изучаемый экологический показа-

тель возрастает на α %, а при увеличении инвестиций на охрану окружающей среды на 1% – уменьшается на β %. Анализ данных региона Белого моря показал, что параметр α постепенно снижался с 0.4 до 0.3, а в конце 1990-х годов стал практически равен нулю.

По Карелии проводился более детальный анализ воздействия различных факторов на состояние окружающей среды. По формуле (2.1) строился комплексный показатель I_{pol} и по формуле (2.3) определялись параметры α и β . В результате было выделено два периода. До 1999 г. параметр α немного меньше единицы, а параметр β близок к нулю. С 1999 г. ситуация становится противоположной – параметр α близок нулю, а параметр β меняется от -0.3 до -0.2 . Это означает, что до девальвации уменьшение комплексного индекса, характеризующего воздействие экономики на окружающую среду, определялось падением ВРП, а природоохранные инвестиции практически не влияли. После девальвации изменение ВРП слабо влияло на комплексный показатель; более существенным, хотя возможно и не самым главным было влияние природоохранных инвестиций. До девальвации снижение ВРП приводило к чуть меньшему падению комплексного экологического показателя, после девальвации увеличение на 1% накопленных за пять лет инвестиций на охрану окружающей среды (кумулятивные инвестиции) приводило к снижению комплексного экологического показателя на 0.2-0.3%.

Наличие значительного воздействия других факторов создает необходимость изменения модели для более точного прогнозирования. Вместо ВРП рассматривались инвестиции, которые разделялись на инвестиции на развитие экономики и на охрану окружающей среды. Фактически можно рассматривать два фактора, влияющие на загрязнение – инвестиции в развитие производства (логарифмическая производная I_{ID}) и инвестиции на охрану природы (логарифмическая производная I_{EF}):

$$I_{pol} = \mu I_{ER} - \nu I_{EF} + p, \quad (2.4)$$

где μ и ν – параметры, характеризующие экологическую эффективность инвестиций, которые оцениваются по ретроспективному периоду. Оценка параметров проводилась по инвестициям за год и по кумулятивным инвестициям за пять предыдущих лет.

Расчеты по карельским данным подтвердили полученные ранее: до девальвации рубля в 1998 г. инвестиции на охрану окружающей среды слабо влияли на экологические характеристики. На изменение воздействия на окружающую среду больше влияла динамика инвестиций в развитие экономики, и коэффициент μ составлял 0.2–0.4. После девальвации рост инвестиций на развитие экономики если и влиял, то незначительно,

а коэффициент ν составлял $-0.1 - -0.3$. Значит, возможно, до девальвации падение инвестиций на развитие экономики на 1% приводило к уменьшению комплексного экологического показателя примерно на 0.3%, а после девальвации – рост кумулятивных природоохранных инвестиций на 1% снижал комплексный экологический показатель на 0.2%.

Поскольку точность оценок опять оказалась недостаточной, то необходим следующий шаг – разделение инвестиций на три составляющих. Инвестиции на развитие производства могут идти на расширение существующих технологий, на переход на новые технологии и снижение воздействия на окружающую среду. Результаты для экологии территории могут быть очень разными. Инвестиции на новое строительство и расширение могут оказать нейтральное и отрицательное влияние на состояние окружающей среды, инвестиции на модернизацию (реконструкция и техническое перевооружение) могут оказать положительное и нейтральное влияние, а инвестиции на охрану окружающей среды – положительное. Соответственно формулу (2.4) надо дополнить и представить в следующем виде

$$I_{pol} = \mu I_{ER} + \eta I_{EM} - \nu I_{EF} + p, \quad (2.5)$$

где I_{EM} – логарифмическая производная объема инвестиций на модернизацию производства, η – параметр, характеризующий эффективность модернизации.

Развитие данной модели связано с ее дезагрегацией первоначально на три определенных ранее сектора, а затем возможно и на большее количество секторов. Но при прогнозировании выделение трех секторов позволяет сделать более точные оценки влияния экономической политики на окружающую среду.

Описанные в формулах (2.3) – (2.5) параметры при дезагрегировании можно представить через соответствующие параметры секторов (μ_i , η_i , и ν_i) и определить влияние секторов на динамику эффективности воздействия показателей на состояние окружающей среды:

$$\mu = \sum_i \mu_i \times \frac{U_i(t)}{U(t)} \quad (2.6)$$

$$\eta = \sum_i \eta_i \times \frac{U_i(t)}{U(t)} \quad (2.7)$$

$$\nu = \sum_i \nu_i \times \frac{U_i(t)}{U(t)} \quad (2.8)$$

$$p = \sum_i p_i \times \frac{U_i(t)}{U(t)} + \varepsilon_0 \quad (2.9)$$

$$\varepsilon_0 = \sum_i (\mu_i \times (I_{ER,i} - I_{ER}) + \eta_i \times (I_{EM,i} - I_{EM}) + \nu \times (I_{EF,i} - I_{EF})) \times \frac{U_i(t)}{U(t)} \quad (2.10)$$

где $U(t)$ – исследуемый экологический показатель, t – год, i – сектор.

Определяющими, как видно из указанных формул, являются степень влияния сектора на соответствующий экологический показатель и доля сектора в его общей величине.

Данные формулы позволяют проводить предварительные оценки влияния отдельных шагов властей и бизнеса, не проводя полных расчетов. Оценив параметры уравнения (2.5) по первому сектору, включающему предприятия ЦБП и металлургии по формулам (2.6), (2.7) и (2.8), можно определить, как инвестиционная политика (объем вложений и их направленность) будут влиять на окружающую среду в перспективе. Существуют и более сложные модели, но они требуют больших массивов качественной информации (Моделирование социо-эколого-экономической системы, 2001).

2.7. Методика прогнозирования социально-экономического развития

Предлагается следующая схема использования индексов в сценариях будущего экономического развития ББМ. Полученные по ретроспективным данным параметры за постдефолтный период являются параметрами для одного из сценариев, определяемого как экстраполяционный. Для других строящихся сценариев развития действие субъекта управления может привести к изменению параметров уравнений. Для каждого варианта экономической политики определяются сценарные условия, которые сводятся к изменению параметров уравнений и к различным вариантам объемов и структуры ресурсов (для оценки возможных изменений в биогенной нагрузке на Белое море первоначально достаточно рассмотреть инвестиции). Сценарный подход позволяет просчитывать возможные ситуации и оценивать результаты различных действий федеральных и региональных властей (Выбор стратегии и моделирование, 2000; Доктрина развития Северо-Запада России, 2002; Дружинин, 2005; Основные направления стратегии, 2003).

Для оценки возможных изменений экосистемы Белого моря вследствие развития экономики региона ББМ в перспективе необходимо проанализировать развитие региона, выявить его особенности и оценить основные тенденции в сфере экономики и экологии. Значительная часть условий развития бизнеса определяется решениями федеральных властей и теми особенностями, на которые невозможно повлиять (географическое положение, климат и другие). Но региональные власти, зная сильные и слабые стороны региона, могут создать благоприятные условия для отдельных отраслей, опираясь на местный бизнес и привлекая фирмы из других регионов и стран. Соответственно будет меняться структура экономики Беломорья и экологическая нагрузка на территорию ББМ.

Прогнозирование включает четыре этапа. В ходе первого (анализа) рассматриваются показатели развития региона, строятся графики, выделяются особенности региона и выявляются основные секторы. Каждый регион имеет свои особенности и специфику, которые определяют реакцию местного бизнеса на внешнее воздействие. В ходе анализа основных показателей развития экономики Беломорья было выделено три периода в его развитии. В 1990–1994 гг. спад ВРП сопровождался пропорциональным спадом кумулятивных инвестиций и незначительным уменьшением занятости. В 1995–1998 гг. предприятия адаптировались к новым условиям, спад производства замедлился, и резко ускорилось снижение занятости. С 1999 г. рост ВРП был почти пропорционален росту кумулятивных инвестиций и занятости. Надо отметить, что рост эффективности в отдельных секторах экономики начался уже в середине 1990-х годов.

Структурные сдвиги в экономике региона и спад производства почти во всех секторах в начале 1990-х годов привели к спаду производительности труда, которая лишь в последние годы достигла уровня 1990 г. Развитие Беломорья в последние годы характеризуется ежегодным приростом ВРП в пределах 2-3%, в отличие от 9-10% в 1999-2000 гг. после девальвации рубля.

Анализ связи экономических и экологических показателей показал (рис. 2.8–2.14), что с конца 1990-х годов произошли существенные изменения. Рост экономики региона сопровождается медленным увеличением показателей, характеризующих воздействие экономики на окружающую среду, либо даже снижением некоторых из них (например, выбросов в атмосферу загрязняющих веществ от стационарных источников). Анализ развития отраслевых секторов показал, что данный процесс связан с технологическими сдвигами в наиболее «грязных» отраслях (металлургия и ЦБП) и структурными сдвигами в экономике Беломорья.

На втором этапе (моделирование) с учетом результатов проведенного анализа данных подбираются уравнения и оцениваются их параметры. Первые два периода существенно отличаются от последнего и расчеты параметров уравнений должны вестись по данным именно третьего периода. Для расчетов динамики производства товаров и услуг использовались производственные функции в темпах и другие уравнения, позволяющие оценить динамику и структуру занятости, производства, основных фондов, заработной платы, прибыли и других показателей в целом по региону и по отдельным секторам (Дружинин, 2000; Дружинин, 2005). Для расчета влияния развития экономики на экологические показатели используются уравнения (6.1)-(6.10).

На третьем этапе строятся сценарные условия, которые определяют варианты внешнего воздействия на развитие региона и влияния политики региональных властей. В модели это выражается в определении вариантов распределения инвестиций и других ресурсов и изменении параметров уравнений. Для данной задачи важны, и изменения социально-экономической политики и изменения экологической политики.

Если изменения финансирования мер по сохранению окружающей среды незначительны или вообще отсутствуют, можно ожидать, что изменения в биогенной нагрузке на море будут определяться изменениями в динамике и структуре инвестиций на развитие экономики и другими экономическими характеристиками. Можно использовать и более грубый подход, оценивая экономику в целом без выделения секторов, для некоторых задач этого достаточно.

На четвертом этапе осуществляется прогнозирование, и появляются собственно сценарии (количественные оценки развития экономики и влияния ее на окружающую среду), отражающие те или иные варианты внешнего воздействия на регион и результаты политики региональных властей.

2.8. Сценарные условия

В зависимости от изменения внешних условий возможны следующие подходы к построению сценариев развития региона:

- инерционный, характеризующийся неизменностью сложившейся в 2000-х годах эколого-экономической политики федеральных и региональных властей с учетом существующих ограничений: отдельные сырьевые отрасли достигли пика своего развития из-за ограниченности рынка и роста затрат, а высокие цены на нефть и газ будут способствовать росту их добычи для экспорта; для отраслей, загрязняющих окружающую сре-

ду, большую часть инвестиций придется тратить на модернизацию устаревших производств с незначительным ростом продаж, при отсутствии крупных новых проектов в ЦБП и металлургии, основанных на новых технологиях; рост рынка внутри региона ограничен медленным ростом доходов населения; рост продаж на российском рынке ограничен высокими издержками из-за северного расположения Беломорья, ограничены энергетические мощности региона;

- активная социально-экономическая политика властей РФ, связанная с созданием рыночных институтов, стимулированием модернизации производства, поддержкой крупных инвестиционных проектов, созданием системы поддержки инновационной деятельности, уменьшением административных барьеров и другими действиями;

- активная экологическая политика властей РФ, связанная с уменьшением налоговой нагрузки при увеличении платежей за ресурсы, стимулированием природоохранной деятельности, ужесточением наказаний за экологические нарушения и другими действиями;

- активная экономическая политика властей субъектов региона, связанная с улучшением инвестиционного климата, развитием малого бизнеса, содействием модернизации крупных предприятий, развитием инновационной инфраструктуры, уменьшением административных барьеров, улучшением подготовки и переподготовки менеджеров, созданием интегрированных бизнес-групп, содействием сближению науки, образования и бизнеса, поддержкой активных и эффективных предприятий и согласованными действиями властей субъектов;

- активная экологическая политика властей субъектов региона, связанная со стимулированием перехода к незначительно воздействующим на окружающую среду технологиям, ужесточением требований к традиционным отраслям, поддержкой научных, образовательных и инновационных экологических проектов и другими действиями.

В рамках каждого из этих подходов можно определять сценарные условия, ориентированные на различные действия российских и региональных властей, и учитывать возможную консолидацию региональных властей в рамках Беломорья. Можно исследовать и другие возможности, в частности освоение шельфа, но в данном случае требуется информация о намечаемых проектах (оценки российских и норвежских специалистов значительно различаются). Анализ ретроспективных данных и оценка параметров уравнений будут касаться лишь существующих секторов, а данный проект будет требовать фактического рассмотрения двухсекторной экономики с выделением его в отдельный сектор (Дружинин, 2000; 2005).

При прогнозировании развития экономики можно рассматривать несколько механизмов реализации экономической политики региональных властей: активизация бюджетного стимулирования инвестиций (в нескольких вариантах: развитие традиционных отраслей по переработке природных ресурсов или развитие сферы услуг, включая туризм и информатизацию), активизация трансграничного сотрудничества и инновационной деятельности (создание инновационной инфраструктуры и развитие бизнеса «вокруг» университетов, развитие трансграничных кластеров), рациональное использование природных ресурсов при развитии малого бизнеса и прочее. Каждому из них соответствует разбиение экономики региона на секторы, отражающие особенности сценарных условий и позволяющие сделать прогноз, отражающий влияние внешних для бизнеса условий.

На основе статистической информации и данных специальных опросов можно рассматривать несколько вариантов разбиения экономики региона на секторы. Определяющим для экономического роста является доля наиболее эффективных и быстро развивающихся секторов, а для экосистемы Беломорья – доля секторов с минимальной нагрузкой на окружающую среду и наиболее быстро ее уменьшающих.

Активизация политики в любом из направлений увеличивает темпы роста экономики, но максимальный потенциальный рост, возможный при бюджетном стимулировании инвестиций, труднодостижим из-за внутрирегиональных проблем. Стимулирование инновационного развития даст заметную для ВРП отдачу за пределами 10 лет и зависит от федеральных властей. Развитие трансграничного сотрудничества, которое тоже может дать толчок инновационной деятельности, требует серьезных изменений российской политики.

Разработка сценарных условий развития региона (вариантов политики властей региона и РФ и их влияния на эффективность функционирования отдельных секторов и на распределение ресурсов между ними) позволяет изучить различные варианты развития Беломорья – максимально возможное увеличение инвестиций в наименее воздействующий на окружающую среду сектор; развитие неэффективных секторов для сохранения занятости; использование оптимизационной модели для выявления наименее воздействующей на окружающую среду структуры экономики; скачкообразное увеличение отдельных секторов как результат определенных шагов региональных властей. В сценариях могут рассматриваться возможности решения отдельных проблем или развития специально выделенных направлений.

При разработке прогноза развития экономики региона, ориентированного на мировой рынок, необходимо учитывать долгосрочные прогнозы мирового товарного рынка, прежде всего прогнозы уровня мировых цен на отдельные товары и прогноз потребности в них. Экономика Беломорья зависит от нескольких товаров, составляющих основу экспорта (апатит, бумага, древесина, железорудный концентрат).

Для минимизации существующих неопределенностей предлагается в качестве основного параметра любого сценария рассматривать изменение динамики и структуры инвестиций. Были сформулированы несколько возможных сценариев, которые основаны на анализе политической и экономической ситуации в РФ и за рубежом. В предлагаемом подходе принимается, что прогноз регионального экономического развития основан на оценке реакции бизнеса на акции регионального руководства и внешнего окружения с помощью моделей, основанных на анализе развития региональной экономики (Дружинин, 2005).

Инерционный сценарий

Сценарные условия подразумевают фиксированную национальную экономическую политику, региональное развитие зависит от динамики мировых цен на энергоносители и сырье (металл, нефть, газ, древесина). Новая девальвация рубля окажет существенно меньшее воздействие на экономику. Продолжится падение численности населения региона (табл. 2.4). Региональные власти слабо влияют на текущие процессы, хотя некоторое воздействие ведомств, контролирующих сырье, возможно. Часть сырьевых отраслей промышленности достигли пика своего развития из-за ограничений рынка, ухудшений условий добычи (заготовки леса) и растущих расходов. Большая часть инвестиций в промышленность с устаревшим оборудованием и технологиями будет истрачена на усовершенствование систем очистки, модернизацию и замену устаревшего оборудования. Это приведет к отсутствию роста доходов в этих отраслях. В результате структура промышленности не изменится, годовой прирост ВРП будет не более 1–3%. При сохранении сложившихся темпов роста природоохранных инвестиций снижение основных экологических индексов составит в среднем 1–2% в год. Данная тенденция может измениться и начнется небольшой рост индексов при ускорении экономического роста, если он будет связан с развитием внутреннего рынка.

Таблица 2.4

Прогноз динамики численности населения регионов, полностью или частично входящих в ББМ (инерционный сценарий), тыс. чел.

	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2020
Архангельская область	1577	1476	1369	1291	1220	1150	1075
Мурманская область	1177	1037	923	865	815	765	710
Карелия	798	763	729	698	680	655	625
Вологодская область	1356	1333	1290	1235	1185	1135	1080
Республика Коми	1255	1133	1043	985	935	885	830

В перспективе освоение новых месторождений нефти и газа вблизи региона может временно увеличить рост экономики до 3–5% при сохранении высоких цен. Если мировые цены на энергоносители и сырье упадут, может произойти новая девальвация (эксперты считают, что через 2–3 года), хотя и меньшего масштаба, с новым всплеском экономического развития до 5–10% в первый год после девальвации, а затем оно вернется на уровень 1–3%. Подобная проблема может возникнуть в случае резкого роста цен на сырье, т.к. приток нефтедолларов приведет к падению курса рубля.

Возможен и кризисный вариант развития. Из-за падения цен на сырье (лес и металлы) могут закрыться некоторые шахты и карьеры. Отток населения из северных районов усилится, что приведет к деградации инфраструктуры. Восстановление потерь будет возможно только в районах больших месторождений и потребует больших расходов. ВРП начнет падать на 1–3% в год.

Активная инвестиционная политика

Политика федеральных и региональных властей может стать более активной за счет стимулирования развития традиционных и перспективных секторов экономики региона и реформирования взаимоотношений между бюджетами, таким образом, создаются условия для более активной региональной экономической политики. Варианты будут зависеть от политики региональных властей (которые могут пренебречь появляющимися возможностями) и от динамики мировых цен на энергоносители и сырье, а также условий членства в ВТО для части сферы обслуживания. Важную роль будет играть инвестиционный климат региона, в первую очередь снижение административных барьеров, развитие законодательства, бюджетное стимулирование инвестиций. Важным ограничением будет невозможность увеличить занятость в регионе.

Модернизация существующих промышленных предприятий, использующих природные ресурсы, и строительство новых может привести к начальному росту ВРП на 3–4% с дальнейшим увеличением в будущем. Реализация средних и крупных проектов может увеличить темпы роста до 5–7%. Эти проекты будут основаны на новых технологиях с принципиально другим уровнем воздействия на окружающую среду.

При неизменной экологической политике экологическая нагрузка в регионе расти не будет, экспортоориентированные предприятия будут вкладывать инвестиции в охрану природы, а у прочих с ростом производства будет расти и воздействие на окружающую среду. При активной экологической политике, быстром росте природоохранных инвестиций и в условиях значительного экономического роста за счет развития внутреннего рынка можно добиться стабильного снижения комплексного экологического индекса на 2–3% в год.

Активная инновационная политика (оптимистический)

Близость Санкт-Петербурга и развитых индустриальных государств, а также доступность научного потенциала способствуют использованию накопленных знаний и опыта. Северные страны смогли создать инновационную экономику в своих регионах. Отличие структуры экономики ББМ от финской состоит в том, что доля добывающих отраслей в ней примерно в пять раз больше. При прохождении того пути, который прошли уже соседи, можно, используя их опыт, существенно изменить структуру экономики и степень ее воздействия на окружающую среду.

Власти могут создать условия, стимулирующие инновационную деятельность в регионе. Это может ускорить структурные реформы и развитие новых секторов экономики, что в свою очередь не приведет к изменению темпов роста в первое десятилетие, но скажется на экологической нагрузке, затем темпы роста экономики могут превысить 5–7%. Изменившаяся структура экономики будет соответствовать XXI веку и продолжится уменьшение биогенной нагрузки на Белое море (Filatov et al., 2005). В начальный период комплексный экологический показатель будет снижаться ежегодно на 3–4% в год. Ускорение экономического роста благодаря изменению структуры экономики не приведет к ухудшению динамики комплексного экологического показателя.

С участием экспертов определяются условия достижения этих показателей (влияние мирового рынка, соседних государств, федеральной экономической политики, политики региональных властей) и завершается

формирование сценариев развития региона, которые анализируются для выбора наилучших решений. Надо отметить, что решения, которые принимают региональные и федеральные власти, создают условия для принятия главных решений бизнесом, и именно бизнес определяет темпы роста и структуру региональной экономики. Отсутствие согласованности в действиях властей субъектов РФ, составляющих исследуемый регион (Республика Карелия, Мурманская и Архангельская области), усложняет процесс развития территории, кроме того, возникает конкуренция между данными субъектами из-за схожести ресурсов и отраслевой структуры, что не способствует согласованности решений по развитию экономики.

Глава 3 КЛИМАТ ВОДОСБОРА И СЦЕНАРИИ ЕГО ИЗМЕНЕНИЙ

3.1. Основные особенности климата

Климатические особенности региона охарактеризованы по данным длительных наблюдений на метеостанциях и постах Северо-Западного, Мурманского и Северного территориальных управлений по гидрометеорологии и мониторингу, расположенных на водосборе, а также береговых и островных станциях (рис. 3.1).



Рис. 3.1. Схема расположения гидрометеорологических станций:

● – гидрологические станции; ● – метеорологические станции и посты

Климатический режим региона Белого моря можно охарактеризовать как переходный от морского к континентальному; по условиям образования он принадлежит к атлантико-арктической зоне умеренного пояса. Преобладающие в течение года воздушные массы, поступающие с Атлантики, обуславливают довольно теплую, но продолжительную зиму, прохладное короткое лето, значительную облачность, высокую влажность воздуха, достаточное количество осадков и неустойчивые погодные условия в течение всех сезонов года. Для Белого моря в любые сезоны года характерна частая смена воздушных масс, связанная с прохождением барических образований над его акваторией. В целом для территории наблюдается 215 дней с циклонами в течение года (для сравнения: в районе Москвы циклоны наблюдаются в течение 150–160 дней за год). Интенсивная циклоническая деятельность, относительно быстрая смена синоптических процессов обуславливают значительную изменчивость, порой даже в течение суток, значений метеорологических элементов и параметров.

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на формирование климата региона, являются атмосферно-циркуляционные процессы над Атлантико-Европейским сектором Северного полушария. По классификации Г.Я. Вангенгейма выделяют несколько типов атмосферной циркуляции: западная (W), восточная (E) и меридиональная (C). При этом особенности долгопериодной изменчивости гидрометеорологического режима имеют ряд общих черт с тенденциями изменчивости преобладающих типов атмосферной циркуляции. С начала XX века отмечалась незначительная тенденция понижения интенсивности W формы, при которой наблюдалось слабо заметное снижение речного стока (Смирнова и др., 2001). Характерно, что в 20–30-е годы XX в. наблюдался резкий спад интенсивности западной циркуляции, приносящей влажные воздушные массы. Именно годы с 1929 по 1939 отнесены А.А. Гирсом (Гирс, 1971) к эпохе формы E, характеризующейся наименьшим количеством атмосферных осадков. Следующие 20 лет климат был более умеренным, а в 1960-е и первую половину 1970-х гг. имело место резкое сокращение западных переносов (в 1976 г. – 36 дней), и речной сток в эти годы был практически ниже нормы, а на большинстве станций наблюдалось падение уровня воды.

С середины 1970-х гг. начинается увеличение числа дней с западным переносом с соответствующим ростом пресного стока. Эти процессы с некоторым сдвигом во времени формируют значительный рост уровня воды, тенденции распреснения и повышения температуры воды в различных районах Белого моря, продлившиеся в среднем до 1990-х гг. (Смирнова и др., 2001).

С 1985 г. начался период, характеризовавшийся положительными аномалиями восточных переносов (E), повторяемость западной формы (W) при этом была близка к норме. Сток отдельных рек в Белое море, за исключением реки Мезень, и суммарный речной сток отличались положительными аномалиями.

На примере температуры воздуха и атмосферного давления в различных районах Белого моря можно также проиллюстрировать особенности современного (конец XX – начало XXI вв.) состояния метеорологического режима. Отрицательные аномалии температуры воздуха в конце 1980-х гг. сменились положительными (до 2.0–2.5°C); для атмосферного давления произошла смена знака аномалий с положительного на отрицательный.

Понижение атмосферного давления определяется увеличением западных переносов и усилением циклонической активности, а поступление теплых воздушных масс с Атлантики способствует повышению температуры воздуха. Однако, в целом, вторая половина 1980-х и начало 1990-х гг. характеризовались незначительными величинами отрицательных аномалий температуры и более значимыми отрицательными аномалиями атмосферного давления.

Белое море находится в зоне преобладающего действия западного переноса (W-циркуляция), здесь характерными являются зональные процессы, то есть перенос воздушных масс с запада на восток. В этом направлении перемещаются барические системы из района Гренландии и Исландии на Баренцево и Белое моря. По мере прохождения над территорией Фенноскандии, атлантический воздух остывает, что формирует температурные различия восточного и западного побережий Белого моря. Обычно температура приземного слоя воздуха восточного побережья ниже, чем западного, но эта закономерность может нарушаться холодными вторжениями воздушных масс с севера (С-циркуляция).

В последние годы наблюдается увеличение числа дней в году с переносом восточных воздушных масс, что стало одной из причин увеличения среднегодовой температуры воздуха над Восточной Фенноскандией (Филатов, 1997).

Исходя из анализа движения циклонов за более чем 50-летний период, можно заключить, что перемещающиеся циклоны подразделяются на “ныряющие”, западные, южные и аномально смещающиеся. Ю.И. Инжебейкиным (Инжебейкин, 2001) показано, что при западных циклонах в зависимости от того, проходит ли их центр над Баренцевым или Белым морем (или южнее последнего), механизм формирования ими штормовых

нагонов существенно различается. Поэтому циклоны, отнесенные к западным, разделены на «западные по Баренцеву» и «западные по Белому морю» циклоны. Обычно циклоны перемещаются над Белым или Баренцевым морями преимущественно с запада на восток с цикличностью 4–6 суток. Повторяемость циклонов типа “ныряющих” и западных составляет около 88%. Наиболее часто циклоны этого типа из центральных районов европейской территории, углубляясь, смещаются к северу и проходят Белое море восточнее или юго-восточнее. Траектории аномально смещающихся циклонов весьма разнообразны. Для циклонов такого типа характерны ветры северных румбов, вызывающие нагоны в южных районах моря, не достигающие максимальных значений, и сгонные понижения уровня в северных районах.

На рассматриваемой территории с сентября по март преобладают ветры западного и юго-западного направлений (повторяемость ветров этих направлений составляет 17–23 и 15–21% за год, соответственно), к ноябрю возрастает повторяемость ветров северных направлений. В октябре-ноябре отмечается смена ветров северных направлений на южные и увеличивается повторяемость штормов, которые приводят к штормовым нагонам. В холодное время года ветры более устойчивы по направлению и наибольшие по силе, что связано с возникновением в это время больших горизонтальных градиентов атмосферного давления. Среднемесячные и среднегодовые значения скоростей ветра по данным метеостанций, расположенных в рассматриваемом районе, приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Средняя месячная и годовая скорость ветра по данным метеостанций (м·с⁻¹)

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Лоухи	3.0	3.0	3.2	3.1	3.3	3.4	3.0	2.8	3.1	3.3	3.4	3.2	3.2
Гридино	4.9	4.6	4.7	4.7	4.9	4.9	4.6	4.6	5.1	5.3	5.1	5.0	4.9
Кемь,порт	5.3	5.0	5.2	4.7	4.8	4.8	4.4	4.3	5.0	5.5	5.7	5.3	5.0
Жужмуй	4.9	4.8	4.5	4.3	4.2	4.0	3.8	3.9	4.8	5.4	5.4	5.1	4.6
Разнаволоок	4.9	4.8	4.7	4.3	4.6	4.6	4.3	4.3	4.9	5.4	5.7	5.2	4.8
Колежма	4.3	4.4	3.9	3.9	4.1	4.2	3.6	3.5	3.9	4.3	4.6	4.4	4.1

На Карельском побережье Белого моря (по данным береговых и островных станций) в течение года преобладают ветры со скоростью 3.5–5.3 м·с⁻¹, на метеостанциях, удаленных от берега моря (Лоухи) скорости ветра меньше – 2.8–3.4 м·с⁻¹.

Важной характеристикой ветрового режима является число дней в году с сильным ветром. В среднем в изучаемом районе отмечается от 11 до 21 дня в году, когда хотя бы в один из сроков наблюдений скорость ветра достигала $15 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. За время наблюдений на метеостанциях были отмечены случаи усиления ветра до 30 (Кемь-порт, Разнаволок) и до $40 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (Гридино, сентябрь 1970 г.).

Продолжительность солнечного сияния зависит от астрономических факторов (длина дня и высота Солнца) и циркуляции атмосферы, которая обуславливает количество облачности. В районе Карельского побережья Белого моря продолжительность солнечного сияния (ПСС) изменяется от 1560 в северной части до 1700 ч в год на юге, что составляет 34–39% возможной. Годовой ход ПСС по данным многолетних наблюдений на метеорологических станциях Кемь и Лоухи представлен на рис. 3.2.

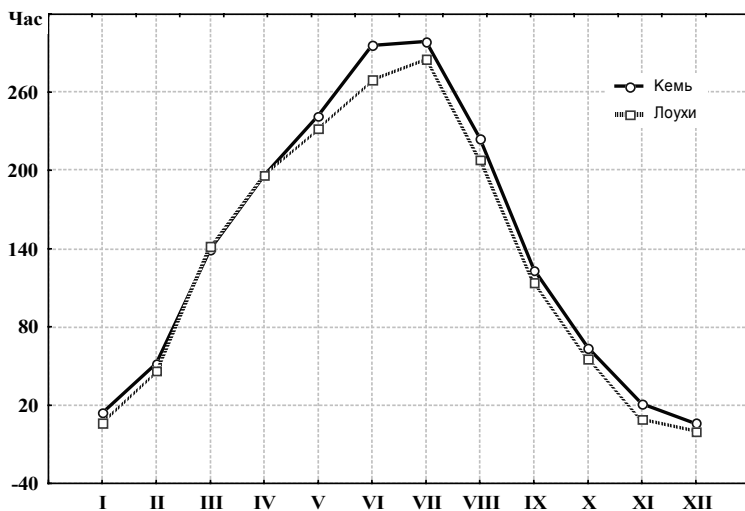


Рис. 3.2. Годовой ход продолжительности солнечного сияния (в часах) по МС Кемь и Лоухи. (Климат..., 2004; Filatov et al., 2003).

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

Максимум ПСС отмечается в июне-июле и составляет 270–300 ч или 42–49% от возможной продолжительности. Минимальная ПСС приходится на декабрь – от 0 ч по северу до 6 ч за месяц в южной части побережья. Число дней без Солнца составляет 1–3 в летние месяцы и 27–31 в декабре.

Интенсивная циклоническая деятельность обуславливает значительное количество облачности в течение всего года. Средний балл количества общей облачности в районе Карельского побережья Белого моря составляет 7.2–7.5 за год. Наибольшее количество облачности отмечается в период с октября по декабрь – 7.8–8.2 балла общей облачности, с января количество облачности начинает уменьшаться, достигая минимального значения в марте – в среднем 6.6 балла. В летние месяцы количество облачности составляет примерно 6.5–7.0 баллов общей облачности. Об устойчивости состояния неба в течение суток позволяет судить число ясных и пасмурных дней. В среднем за год число пасмурных дней составляет 165 в южной части рассматриваемого района и 172 в северной. Число ясных дней, напротив, уменьшается от 20 до 15 в направлении с юга на север.

Средняя годовая температура воздуха по многолетним данным за период около 100 лет в районе Карельского побережья Белого моря колеблется от -0.4°C в северной части до 1.3°C в южной (табл. 3.2). Самый холодный месяц года – январь ($-10.1\dots-12.8^{\circ}\text{C}$). В отдельные годы минимальные годовые температуры воздуха могут отмечаться в любой из зимних месяцев. Так понижение температуры до -47°C , отмеченное на МС Колежма, было зарегистрировано в феврале (1946 г.).

Т а б л и ц а 3.2

Средняя месячная и годовая температура воздуха на водосборе ($^{\circ}\text{C}$)

Станция	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Зашеек	-12.8	-12.8	-8.5	-2.3	3.8	10.5	14.0	11.9	6.5	0.4	-5.3	-9.9	-0.4
Лоухи	-12.1	-11.9	-7.9	-1.6	4.8	11.6	14.7	12.5	7.1	1.0	-4.5	-8.8	0.4
Гридино	-10.1	-10.6	-6.9	-1.5	3.8	9.9	13.9	13.0	8.2	2.2	-2.6	-6.6	1.1
Колежма	-11.1	-10.7	-6.5	-0.6	5.4	11.8	14.7	13.2	8.3	2.4	-3.2	-8.2	1.3

Самым теплым месяцем в году является июль, со средней суточной температурой воздуха $13.9\text{--}14.7^{\circ}\text{C}$. Абсолютный максимум температуры воздуха составляет $+35^{\circ}\text{C}$ (МС Колежма, Кемь). Годовая амплитуда температуры воздуха в рассматриваемом районе $24\text{--}27^{\circ}\text{C}$.

Характерным признаком наступления весеннего сезона являются дневные оттепели, которые обычно отмечаются в конце марта – начале апреля. Устойчивый переход температуры воздуха через 0°C происходит в 20-х числах апреля, через 5°C – во второй декаде мая. Для весенних сезонов характерен неустойчивый режим погоды, оттепели часто сменяются заморозками, возможно кратковременное установление снежного покрова. Заморозки возможны в среднем до конца первой декады июня.

Начало лета совпадает с началом безморозного периода, в среднем 10–12 июня, когда температура воздуха устойчиво переходит через 10°C. Период с устойчивым переходом температуры через 15°C в районе Карельского побережья Белого моря отсутствует. Средняя продолжительность летнего сезона на рассматриваемой территории составляет 80 дней. Осень наступает в последних числах августа – первой декаде сентября. Температура воздуха устойчиво переходит через 10°C в сторону понижения.

Зима в изучаемом районе хотя и не суровая, но длительная. Начало зимнего сезона совпадает со средней датой образования снежного покрова. Переход температуры воздуха через 0°C в сторону понижения отмечается в среднем в третьей декаде октября. Продолжительность периода с устойчивой отрицательной среднесуточной температурой воздуха составляет 180–190 дней (рис. 3.3).

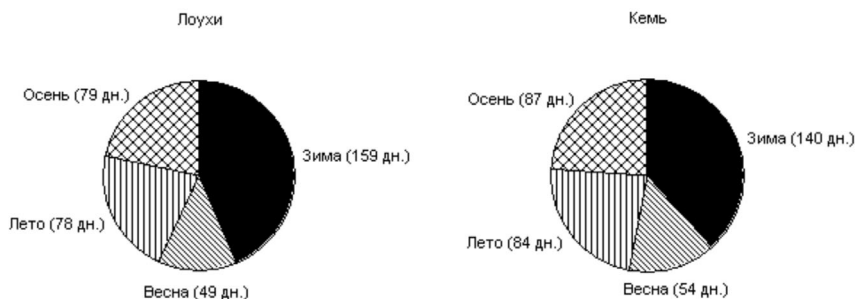


Рис. 3.3. Продолжительность климатических сезонов года (дни) в районе Карельского побережья Белого моря (1951–2000 гг.)

На рис. 3.4 показан временной ход средней годовой температуры приземного слоя воздуха по данным метеорологических станций Зашеек, Лоухи и Колежма. Очень слабая тенденция к потеплению (на 0.1°C за 60 лет) отмечается в Колежме, в остальных пунктах наблюдений тренд изменения температуры воздуха отрицателен. Региональные изменения приземной температуры воздуха в исследуемом районе не совпадают с положительными тенденциями изменения глобальной температуры.

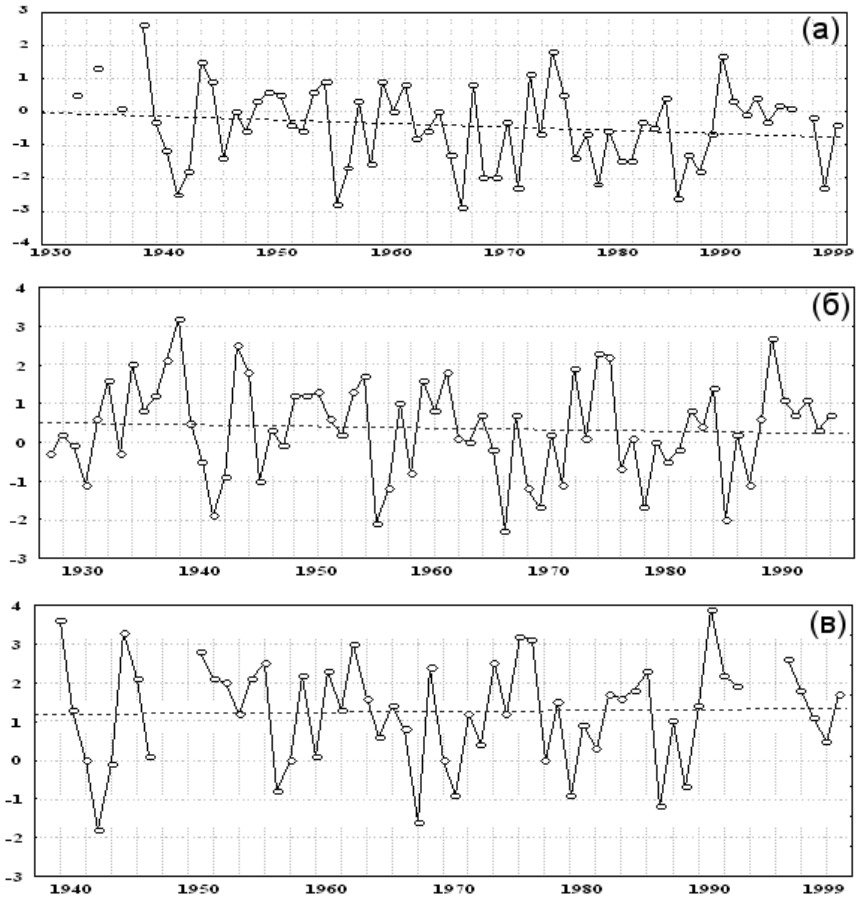


Рис. 3.4. Значения среднегодовой температуры воздуха по МС Зашеек (а), Лоухи (б) и Колежма (в) за периоды инструментальных наблюдений. (Климат..., 2004; Filatov et al., 2003)

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

По данным о среднесуточной температуре воздуха за период – с 1951 по 1995 г. для МС Кемь-порт (побережье Белого моря) были рассчитаны даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0, 5 и 10°C как в сторону понижения, так и в сторону повышения температуры. В резуль-

тате анализа полученных данных можно сделать вывод, что к середине 1990-х годов на территории Карельского побережья Белого моря не произошло смещение дат наступления климатических сезонов года (рис. 3.5 и 3.6). Только дата перехода температуры воздуха через 0°C в сторону отрицательных температур (дата наступления холодного периода) сместилась с 25 на 31 октября, в результате чего теплый период года увеличился на 6 дней. Значительное мартовское потепление не повлияло на смещение даты наступления весеннего сезона – 20 апреля (устойчивый переход среднесуточной температуры воздуха через 0°C в сторону повышения), но выразилось в изменении климатической нормы среднемесячной температуры воздуха с $-7,3$ до $-6,2^{\circ}\text{C}$. Дата начала летнего сезона в Кемь – 13 июня, осеннего – 6 сентября.

Анализ данных о накопленных суммах среднесуточных температур ниже 0°C (отрицательных температур) за холодный период в районе Белого моря выявил уменьшение этих сумм с -1238°C (климатическая норма за 1931–1960 гг.) до -1301°C (среднее значение за 1951–1994 г.), что позволяет говорить об усилении суровости зим в рассматриваемом районе к середине 1990-х годов. Значения средних многолетних сумм положительных температур воздуха за теплый период также изменились – с 1553 до 1684 $^{\circ}\text{C}$.

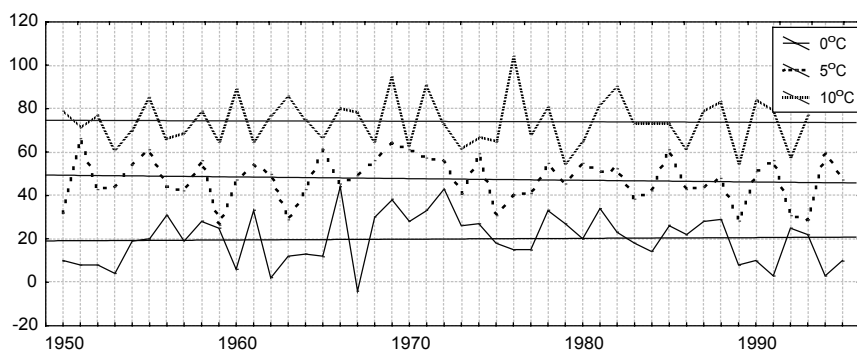


Рис. 3.5. Даты устойчивого перехода температуры воздуха через 0, 5, 10 $^{\circ}\text{C}$ весной в районе МС Кемь-порт (отсчет дат от 31 марта)

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

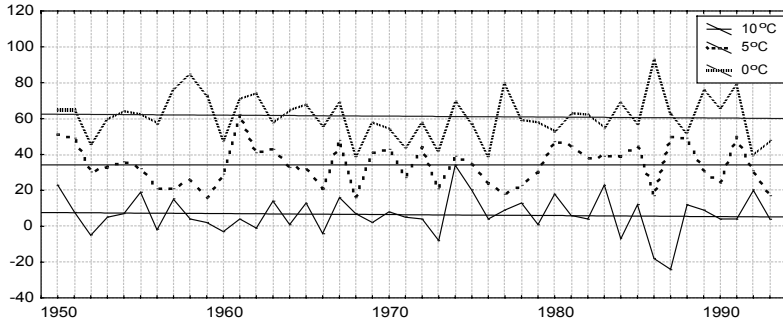


Рис. 3.6. Даты устойчивого перехода температуры воздуха через 10, 5, 0°C осенью в районе МС Кемь-порт (отсчет дат от 31 августа)

Анализ изменений температуры воздуха по месяцам позволил сделать вывод, что значимый положительный линейный тренд выявлен только в марте и составляет на разных станциях от 3.5 до 5.0°C за 50 лет. В летний период и значительную часть осеннего сезона изменения температуры разнонаправленны и малы по абсолютной величине, к ноябрю они сменяются слабовыраженной тенденцией к похолоданию на всей территории (рис. 3.7). Таким образом, максимум статистически значимого увеличения температуры воздуха в районе карельского побережья Белого моря приходится на март – начало апреля.

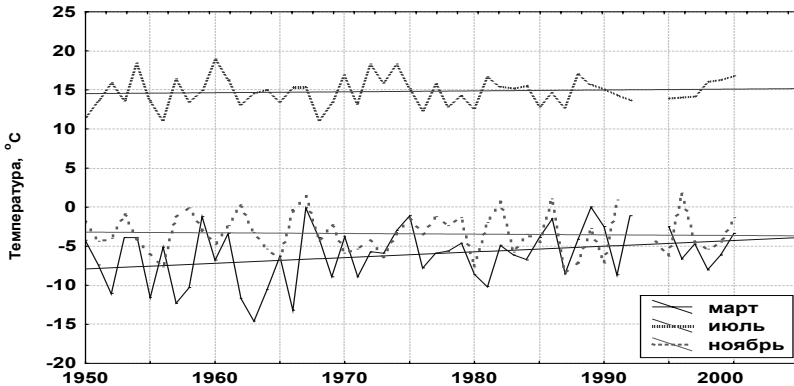


Рис. 3.7. Изменчивость средней месячной температуры воздуха за период 1951–2000 гг. по данным метеорологической станции Колежма

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

Анализ сезонных температур воздуха по метеорологическим станциям, расположенным на севере европейской территории России (ЕТР), позволил сделать вывод, что для различных районов исследуемой территории тенденции изменения температуры различны для одних и тех же сезонов года. Только весенняя температура воздуха имеет положительные тренды (до $+3.5^{\circ}\text{C}/100$ лет) по всей изучаемой территории (рис. 3.1.8.). Для остальных сезонов районы с положительными значениями трендов расположены, в основном, в южной части региона вблизи крупнейших озер Европы – Ладожского и Онежского.



Рис. 3.8. Пространственное распределение зон положительного (+) и отрицательного (-) трендов сезонных температур воздуха на территории северо-запада России за период 1951–1999 г.г. (1 – декабрь-февраль, 2 – март-май, 3 – июнь-август, 4 – сентябрь-ноябрь)

На рис. 3.9 показан временной ход температуры приземного слоя воздуха по ст. Архангельск за 176 лет (с 1814 по 2000 гг.).

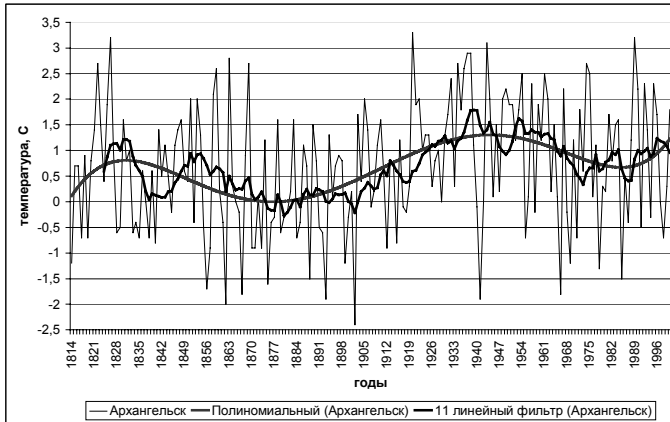


Рис. 3.9. Временной ход температуры приземного слоя воздуха по ст. Архангельск в период 1814–2000 гг. с 11-летней фильтрацией и полиномиальным трендом 6-й степени (по среднегодовым данным). (Климат..., 2004; Filatov et al., 2005)
Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

Для выделения периодов в 176-летнем ряду данных было проведено спектральное разложение среднегодовых значений температуры воздуха (рис. 3.10).

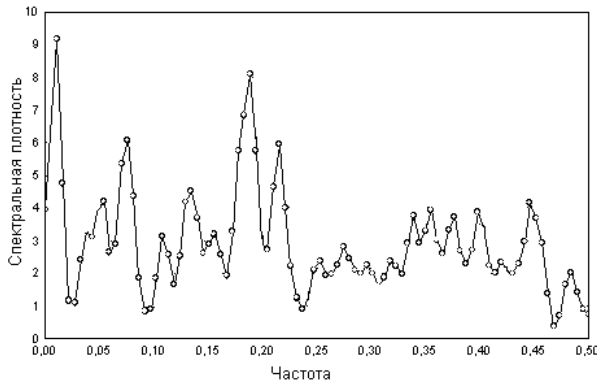


Рис. 3.10. Функция спектральной плотности температуры воздуха приземного слоя за 176 лет по ст. Архангельск. (Климат..., 2004; Filatov et al., 2004)
Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

На рис. 3.10 показан спектр колебаний температуры приземного слоя воздуха за 176 лет по ст. Архангельск. В спектре $\hat{St}(\omega)$ доминируют колебания с временными масштабами порядка 4–5 и 11–13 лет. Подобные закономерности изменчивости температуры воздуха с теми же циклическостями наблюдаются для спектров температуры воздуха достаточно обширной территории Фенноскандии (Филатов, 1997). В работе Н.П. Смирнова с соавторами (Смирнов и др., 1998) показаны трех-четырёхлетние вариации, которые проявляются практически во всех районах Северной Атлантики. Механизмы их недостаточно точно описаны. В этой же работе показано, что четырехлетний ритм – это следствие интерференции колебаний семилетнего периода и колебаний более короткого периода, например, двухлетнего. Эти колебания были выделены нами по данным изменений температуры воздуха в районе Белого моря (рис. 3.9), а также по данным длительных наблюдений температуры поверхностного слоя (ТПС) Белого моря. Наиболее низкие температуры воды по всем проанализированным беломорским станциям наблюдаются в конце 1970-х, середине 1980-х и начале 1990-х годов, а высокие – в 1989 г. Значительные изменения в ТПС Белого моря начала 1980-х гг. хорошо согласуются с глобальными особенностями отклика на эти события температуры воды района каждой конкретной станции Белого моря. Так, усиление циклонической активности Северной Атлантики в начале 1980-х гг. проявилось в климате района водосбора Белого моря, вызвав понижение ТПС Белого моря в это же время. Изменения 1990-х гг. связаны с увеличением средней глобальной температуры воздуха над Европейским Севером (Будько и др., 1999).

В целом, изменчивость гидрометеорологических параметров Белого моря характеризуется высоким вкладом низкочастотных составляющих, что свидетельствует о влиянии крупномасштабных климатических процессов на формирование долгопериодной изменчивости элементов режима моря.

Водосбор Белого моря относится к зоне избыточного увлажнения. На распределение осадков большое влияние оказывают орографические особенности местности и характер подстилающей поверхности, ведущие к нарушению плавного хода изменения количества выпадающих осадков. Заметно уменьшаются осадки вблизи крупных водоемов. В районе побережья Белого моря в границах Карелии отмечаются наименьшие в республике годовые суммы осадков (500–550 мм). Относительно равнинная территория побережья в средней и северной части Белого моря покрыта огромными массивами болот, открыта для воздействия ветров на значительные

расстояния, вплоть до возвышенностей западной Карелии. При таких особенностях рельефа влияние Белого моря сказывается здесь в смягчении среднегодовых температур воздуха, а также в создании минимума осадков в северной приморской полосе. Летом Белое море холоднее суши, и воздух, поступаая с моря на сушу, нагревается и при этом не только не выделяет влагу, а наоборот поглощает образовавшуюся на суше (Романов, 1961). Южнее 64° с.ш. выпадает более 500, чуть севернее – менее 500 и на побережье Баренцева моря – 400 мм осадков в год (табл. 3.3). Это объясняется тем, что летние траектории движения циклонов проходят южнее, чем зимние, вследствие смещения центров действия атмосферы. Минимальное годовое количество осадков выпадает в центральных частях Бассейна и Воронки (менее 300 мм), а максимальное наблюдается над относительно тёплой южной частью моря, т.е. в Двинской и Онежской губе (500–600 мм).

Таблица 3.3

Средние многолетние суммы осадков на водосборе

Станция	Сумма, мм	Максимум за сутки, мм
Канин Нос	354	9.0
о-в Сосновец	343	–
Мезень	423	18.0
Лоухи	467	23.6
Кемь	425	–
Архангельск	529	14.8
Онега	543	28.0

Внутри года количество выпадающих осадков распределено неравномерно (табл. 3.4). Наибольшее количество осадков выпадает в период с июня по октябрь – 280–320 мм, что составляет приблизительно 60% годовой суммы. Наименьшие суммы осадков характерны для февраля-марта (17–26 мм за каждый месяц). В течение теплого периода (апрель-октябрь) в рассматриваемом районе выпадает 71–75% годового количества осадков. В среднем за год жидкие осадки составляют 55-65, твердые – 20–30, смешанные – 13–18%.

Таблица 3.4

Среднемесячные значения осадков в районе Карельского побережья Белого моря (в среднем по территории)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Осадки, мм	35	29	29	34	42	50	65	69	66	62	43	43	567

Таким образом, количество осадков увеличивается с севера на юг и с востока на запад. Возможно формирование и внутримассовых осадков, которые вносят свой вклад в распределение поверхностных слоев моря. В этом процессе более существенную роль играет сток рек. В отдельные годы месячные суммы осадков могут значительно отклоняться в ту или иную сторону от многолетних величин. Например, в мае 1978 г. в Колежме за месяц выпало 1.6 мм осадков при норме 36, станция Лоухи в августе 1981 г. зарегистрировала месячную сумму осадков 138 мм при норме 76. Величина суточных максимумов количества осадков может быть довольно значительной. Так, в Лоухи в августе 1959 года за сутки выпало 60 мм осадков, а в июле 1989 года в Колежме было отмечено выпадение 60 мм осадков за 3 часа.

Анализ изменений количества осадков в изучаемом регионе 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 указанных районов. Тенденция к увеличению количества осадков отмечается на всех станциях в период с октября по июнь. С июля по сентябрь по данным метеостанций отмечается как увеличение, так и уменьшение сумм осадков за месяц (рис. 3.11).

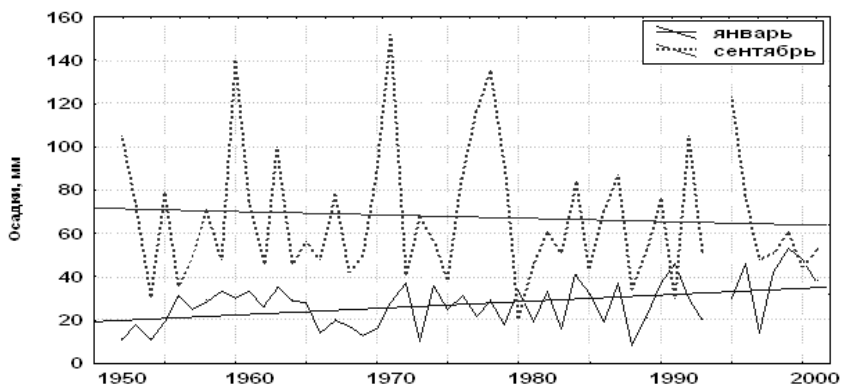


Рис. 3.11. Изменчивость сумм атмосферных осадков за месяц за период 1951–2000 гг. по данным метеорологической станции Колежма

В зависимости от отношения осадков в весенне-летнее (март-август) и осенне-зимнее (сентябрь-февраль) полугодия выделяют четыре типа

годового хода осадков, отражающие степень континентальности климата (Швер, 1976): неоконтинентальный (морской), полуконтинентальный, континентальный и резкоконтинентальный. Преобладание осадков в осенне-зимнее полугодие характерно для морского климата. Такой годовой ход осадков в районе Белого моря наблюдается на станциях Канин Нос, Мыс Конушин, Мезень, Архангельск, Онега (отношение сумм осадков в указанные периоды менее 1.0). Станции Карельского берега Белого моря (Колежма, Кемь-порт, Лоухи) и станция Сосновец отмечают небольшое преобладание сумм осадков в весенне-летнее полугодие, что характерно для полуконтинентального промежуточного типа климата.

Оценки, касающиеся изменений количества осадков, 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, связанной с изменениями наблюдательной практики. Для территории России, как и для суши земного шара в целом, в основном характерен максимум на рубеже 1950–1960-х годов, который означает убывание осадков после начала 1960-х гг. (на европейской территории сменившееся ростом с начала 1970-х). Исключение составляет Байкальский регион, где в общем происходит постоянное убывание осадков с 1936 г. (на 7 мм за 100 лет), и Западная Сибирь, где не наблюдается никаких заметных тенденций (Груза и др., 2001). Метеорологические станции Карельского берега Белого моря также отмечают увеличение годовых сумм осадков в исследуемом районе к концу XX столетия (рис. 3.12).

Относительная влажность воздуха в районе Белого моря является довольно устойчивой метеорологической характеристикой, значения ее высоки в течение всего года: от 67–69% в среднем за месяц в мае-июне до 88–89% в ноябре-декабре. Годовой ход относительной влажности воздуха по данным станций, расположенных вблизи Белого моря, показан на рис. 3.13.

Нередкое явление на Белом море – туманы. Возникновение туманов связано главным образом с изменением температуры и влажности воздуха. Среднее за год число дней с туманом на Карельском побережье Белого моря составляет 32–34. В отдельные годы число дней с туманом может достигать 54–60 за год. Наименьшая повторяемость туманов отмечается в период с мая по июль (1–2 дня в месяц), наибольшая – в августе и октябре (3–5 дней), что связано с активизацией циклонической деятельности и

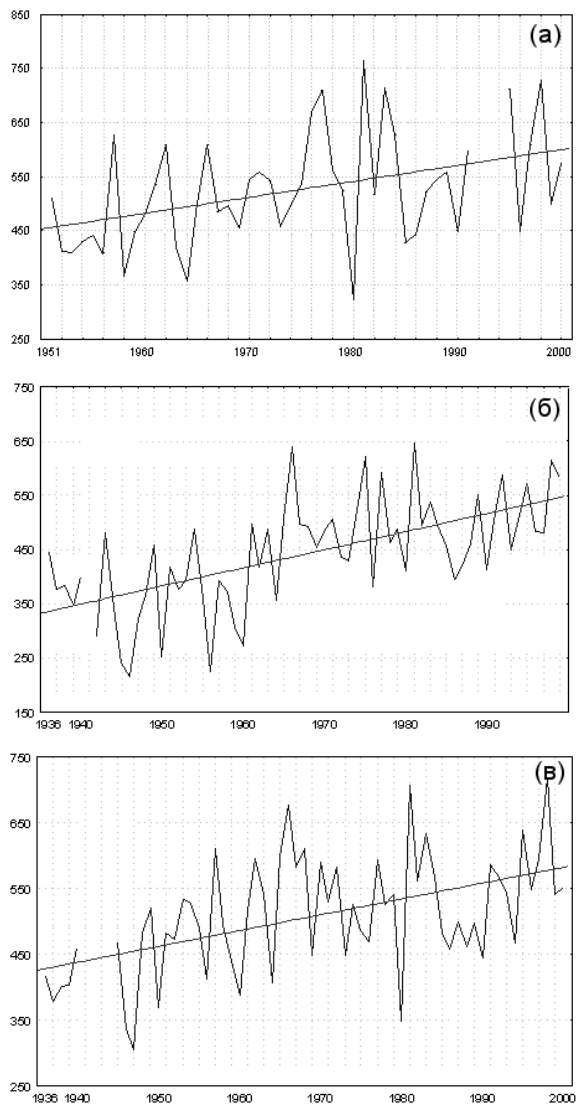


Рис. 3.12. Многолетний ход годовых сумм осадков по данным станций Колежма (а), Зашеек (б), Лоухи (в). (Filatov et al., 2005)
Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

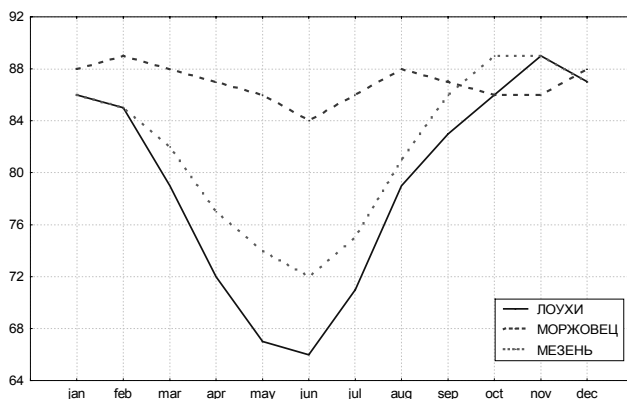


Рис. 3.13. Годовой ход относительной влажности воздуха в различных районах Белого моря. (Климат..., 2004)

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

с выносом атлантических воздушных масс на акваторию моря, приводящим к возникновению адвективных туманов охлаждения. В зимний период повторяемость туманов также достаточно высока – около трех дней за месяц, что связано с возрастанием вероятности возникновения радиационных туманов, возникающих при выхолаживании воздуха над ледяной поверхностью заливов.

Для климатических условий района Белого моря характерными являются метели. Различают несколько видов метелей: общая метель, с выпадением снега и низовая метель или поземок. Но поскольку вид метели определяется не всегда точно, при подсчете количества дней с этим явлением все виды объединяют. Возникновение метелей в рассматриваемом районе возможно в период с сентября по июнь. В среднем за год наблюдается 30–40 дней с метелью. Повторяемость метелей возрастает к середине зимнего сезона и становится максимальной в январе, что обусловлено интенсивной ветровой деятельностью и наибольшим в году количеством дней с твердыми осадками, а также наибольшей сухостью снега. В это время может наблюдаться до 10–15 дней с метелью, в отдельные годы – до 20–25 дней за месяц. К апрелю повторяемость метелей значительно уменьшается – до 3–4 дней за месяц. В июне только в редкие годы в районе Карельского побережья Белого моря возможно возникновение метелей. Так, на станциях Лоухи и Кемь-порт в указанное время были зарегистрированы по одному дню с этим явлением.

3.2. Сценарии изменений климата

Для оценки возможных изменений климата и его влияния на экосистему Белого моря через изменения температуры атмосферы, элементов водного баланса, водного стока рек были использованы данные объединенной численной модели глобального климата для системы океан-атмосфера-суша, разработанной в Метеорологическом институте Макса Планка (Гамбург, Германия). Детальное описание модели, получившей индекс ЕСНАМ4/ОРУСЗ (далее для краткости обозначим эту модель аббревиатурой ЕСНАМ4), дано в работе (Bengtsson, 1997). В основе трехмерной модели лежит система математических уравнений движения (уравнения Навье-Стокса в упрощенной форме), термодинамики для воздуха и водяного пара, и уравнение состояния. Пространственное разрешение составляет $2.8^\circ \times 2.8^\circ$ по широте и долготе и 19 уровней до 30 км (до высоты 10 ГПа) по вертикали для всего Земного шара. Минимально возможный временной шаг модели составляет 24 минуты. Выходными данными модели являются хронологические ряды основных гидрометеорологических характеристик, в том числе атмосферного давления, температуры воздуха в приземном слое и на 10 уровнях в слое 0–30 км, осадков, облачности, относительной влажности, составляющих радиационного баланса, характеристик ветра у земли и на высотах. Численные эксперименты были выполнены в Метеорологическом институте Макса Планка для контрольного периода (1850–2000 гг.) и на перспективу до 2100 года. В качестве сценариев использовались оценки возможного изменения (увеличения) парниковых газов, принятые при разработке и проверке известной модели глобального циркуляционного механизма IPCC (Houghton et al., 1996). В первом случае (сценарий G) предполагается удвоение содержания углекислого и других парниковых газов в атмосфере Земли к 2100 году. Во втором сценарии (GA) дополнительно учитывается прямой эффект влияния аэрозоль техногенного происхождения на радиационный баланс атмосферы. Повышение содержания аэрозолей в атмосфере ведет, как правило, к обратному эффекту – возможному похолоданию из-за отражения части падающего солнечного излучения.

В качестве исходной информации для оценки возможных изменений основных характеристик климата и элементов водного баланса (ЭВБ) водосбора были использованы рассчитанные по модели ЕСНАМ4 ряды температуры воздуха и осадков по месяцам за контрольный (1950–2000 гг.) и предстоящий (2000–2050 гг. по сценариям G и GA) периоды в узлах сетки (рис. 3.14).

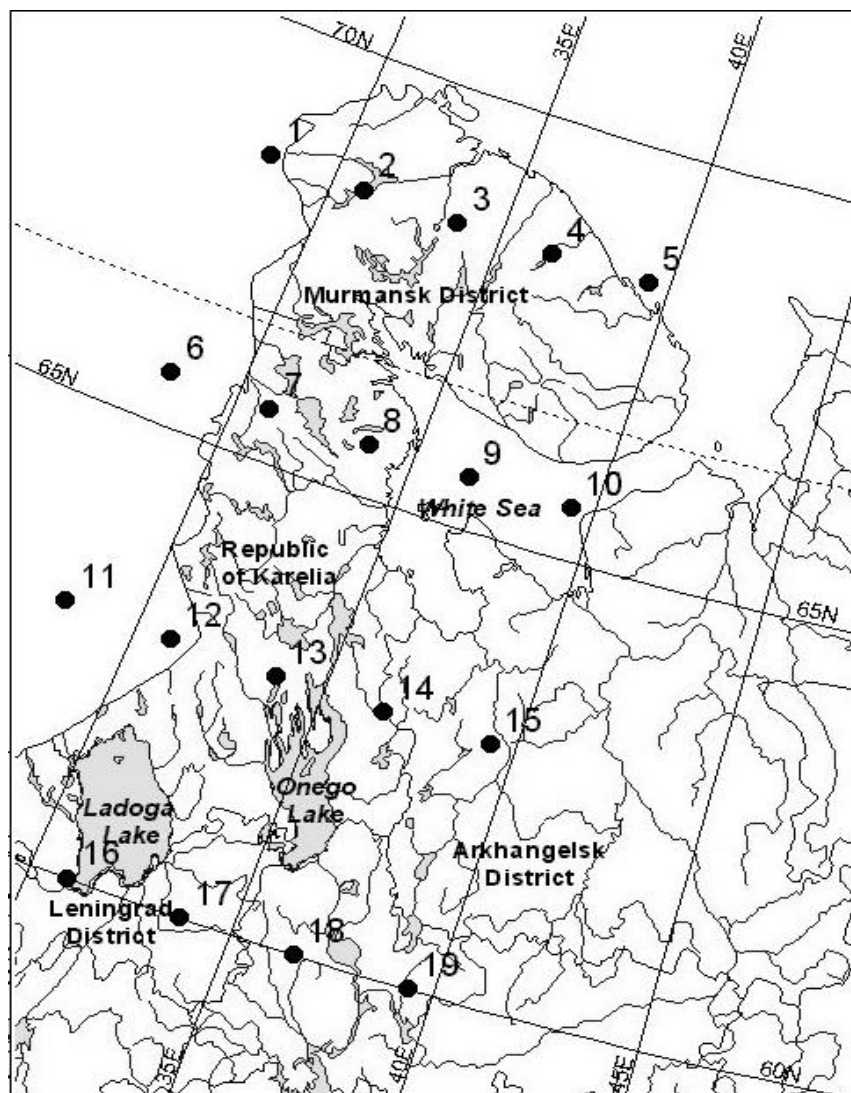


Рис. 3.14. Расположение расчетных узлов модели ECHAM-4 в пределах исследуемой территории (Filatov et al., 2005)

Анализ показал, что модельные данные достоверно воспроизводят месячные нормы и годовые значения температуры воздуха, а также годовые суммы осадков; однако степень соответствия модельных и фактических месячных норм осадков для водосбора нельзя признать удовлетворительной (Филатов и др., 2002). Этот недостаток характерен для расчетных схем многих моделей, как это следует из работы Г.С. Голицына с соавторами (Голицын и др., 2000), выполнившими оценку изменения водного и теплового баланса на водосборе Ладожского озера по 14 различным МГК, в том числе по модели ЕСНАМ4.

С учетом соотношений между характеристиками климата и ЭВБ была разработана схема сопряжения МГК с имитационной моделью регионального водного баланса (Сало, 2003), входными параметрами для которой служат ряды годовой температуры (T_M) и осадков (P_M) модели ЕСНАМ4 в узлах сетки.

Проверка адекватности модели выполнена для контрольного периода 1957–1991 гг. (годовая температура воздуха) и 1963–1991 гг. (осадки). Подготовка данных состояла в выборе оптимального количества узлов методом перебора для включения в уравнение и его параметризации по первой половине контрольного периода. По второй половине периода, включающей независимые данные, была выполнена оценка адекватности модельных данных. Несмотря на ограниченную длину выборок, степень соответствия сравниваемых модельных и фактических рядов температуры воздуха и осадков достаточно высокая, регрессия объясняет более 50% общей дисперсии фактических данных относительно модельных (коэффициент детерминации равен 0.55–0.56).

Расчеты на перспективу, для дальнейшего их использования при численных расчетах на моделях экосистемы, выполнены следующим образом.

Для сценариев G и GA в соответствующих узлах вычислены осредненные по водосбору ряды годовой температуры воздуха и осадков. После их сглаживания рассчитаны ряды испаряемости, суммарного испарения и речного стока для периода 2000–2050 гг., оценены их линейные тренды, изменение средних значений за предстоящий 50-летний период. Расчеты показывают, что если глобальный климат будет изменяться в соответствии с предполагаемыми сценариями, то норма региональной температуры воздуха возрастет на 0.4–1.4°C по сравнению с наблюдавшейся во второй половине XX века (рис. 3.15, табл. 3.5). Увеличение нормы суммарного испарения с территории составит 20–80 мм и будет на порядок выше, чем увеличение осадков.

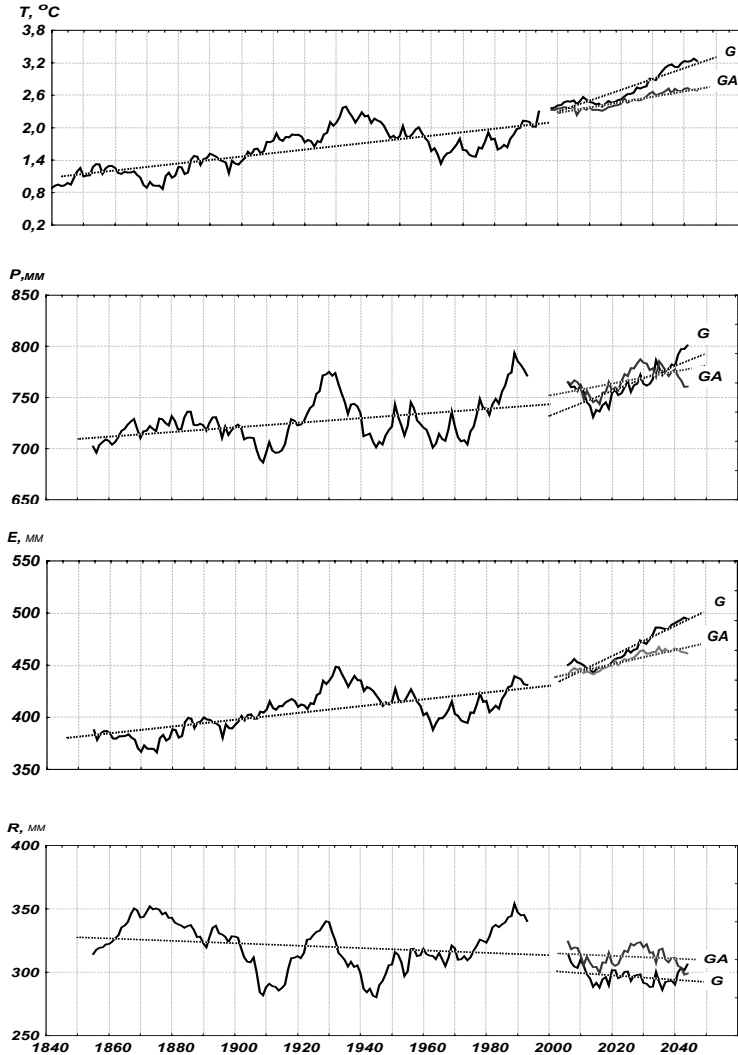


Рис. 3.15. Фактические (до 2000 года) и модельные ряды температуры воздуха (Filatov et al., 2005) и основных элементов водного баланса по сценариям G и GA для территории Карелии (15-летние скользящие средние). По работе (Filatov et al., 2005)

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

Т а б л и ц а 3.5

Возможные изменения нормы температуры воздуха и ЭВБ территории Карелии в первой половине XXI в.

Характеристика	Период		Сценарий	Изменения, %
	1950–1999 гг.	2000–2049 гг.		
Температура воздуха, °С	1.8±0.2	2.7±0.3	G	↑ 38–50
		2.5±0.1	GA	
Осадки, мм	750±25	763±17	G	↑ 1–2
		767±12	GA	
Суммарное испарение, мм	413±13	466±17	G	↑ 10–13
		455±9	GA	
Речной сток, мм	322±14	297±7	G	↓ 3–8
		312±7	GA	

Аналогичные оценки по изменению испарения для этой территории получены О.Е. Бусаровой и Е.М. Гусевым (Бусарова и др., 1995), а также Ю. Кивиненом и А. Леписто (Kivinen et al., 1996) для территории Финляндии на основе анализа результатов МГК. Вследствие непропорционального увеличения осадков и суммарного испарения «глобальное потепление... может сопровождаться уменьшением речного стока из-за заметного повышения испарения (испаряемости)» (Будыко и др., 1986). Именно по этой причине норма речного стока для водосбора несколько уменьшится. На основе анализа современных изменений водности более чем по 300 речным водосборам России и модельных расчетов Р. А. Шикломанов и В. Ю. Георгиевский (Шикломанов и др., 2003) пришли к выводу, что «в первой половине следующего столетия нет оснований ожидать какого-либо ухудшения водообеспеченности населения и экономики на преобладающей части территории России». Аналогичные выводы о незначительных изменениях стока рек России в 2000–2050 гг. получены И.И. Моховым и В.Ч. Хоном (Мохов и др., 2002), М.Г. Хубларяном с соавторами (Хубларян и др., 2003) и другими исследователями.

Изменение коэффициентов стока ($K_R=R/P$) и испарения ($K_E=E/P$) характеризуют возможные изменения структуры многолетнего водного баланса территории Карелии. Для текущего периода их средние значения равны $K_R=0,45$ и $K_E=0,55$, а для условий нового климата в последующие 50 лет они составят 0.40 и 0.60 соответственно. Следовательно, изменения глобального климата по сценариям G и GA не приведут к существенному изменению структуры водного баланса рассматриваемой территории в 2000–2050 гг.

В соответствии с результатами моделирования на модели ECHAM4/OPYC3 в изучаемом регионе возможны заметные изменения климатического режима. В новых климатических условиях возможно смещение годовых изотерм и изогет в северном направлении (рис. 3.15 и 3.4). Для Кольского полуострова по обоим сценариям климатическая норма годовой температуры воздуха может увеличиться от -0.7 до 0.2°C , годовые суммы осадков в средних многолетних значениях возрастут от 461 до 482–486 мм.

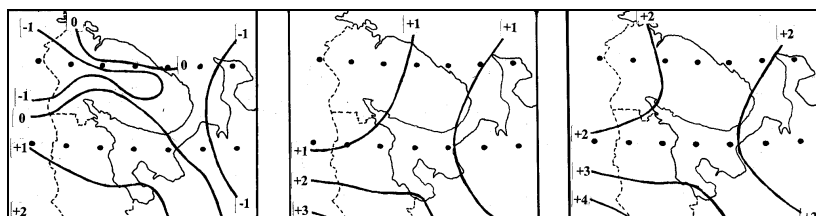


Рис. 3.16. Пространственное распределение нормы годовой температуры воздуха для периода 1950–2000 гг. (1) и 2000–2050 гг. по сценариям GA (2) и G (3), соответственно

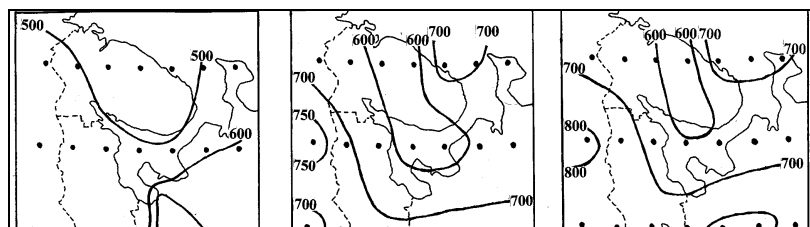


Рис. 3.17. Пространственное распределение нормы годового количества осадков для периода 1950–2000 гг. (1) и 2000–2050 гг. по сценариям GA (2) и G (3), соответственно

Аналогичные изменения возможны и в Карелии: рост годовой температуры воздуха от 1.6 до 2.7 – 3.0°C , увеличение годовых сумм осадков от 582 до 610–635 мм. В настоящее время наибольшие положительные тренды температуры воздуха отмечены в весенние сезоны по всей изучаемой территории, в то время как в будущем по обоим сценариям наибольшие положительные тренды будут характерны для зимних сезонов (декабрь–февраль). Согласно модельным данным возможны значительные изменения в распределении среднемесячных температур воздуха: месяцы с мая по октябрь станут более теплыми, чем в настоящее время.

Изучение реакции водных экосистем на изменения климата и гидрологического режима является актуальной задачей и должно быть основано на принципах комплексного системного анализа. Климатические и гидрологические характеристики рассматриваются в этой связи как элементы подсистемы, объединяющей важнейшие абиотические факторы среды, и во многом определяют тот природный фон, на котором происходит функционирование экосистем. Рассмотренный выше подход позволяет оценить изменения основных элементов климата и водного баланса при различных сценариях изменения глобального климата, а предложенная расчетная схема может быть интегрирована в комплексные модели экосистем региона. В качестве входных параметров новых климатических условий могут использоваться результаты численных экспериментов на различных ГКМ, удовлетворяющие сформулированным критериям адекватности.

*Влияние возможных изменений климата
на элементы водного баланса*

Общая площадь водосбора бассейна Белого моря составляет 720 000 км². Основная часть водосбора (72%) расположена на территориях Архангельской, Вологодской областей и Республики Коми. Коэффициент удельного водосбора, определяемый как отношение площади акватории моря к площади его водосбора, составляет 8,3, что является, по данным В.В. Иванова (Иванов, 1976), наибольшим показателем для всех окраинных морей Северного Ледовитого океана. Этот показатель свидетельствует о потенциально большой роли водосбора в формировании химико-биологического режима самого Белого моря. Наиболее крупными притоками моря являются реки Северная Двина (площадь водосбора 357000 км² или около 50% всего водосбора Белого моря), Мезень (78000 км²), Онега (56000 км²), Кемь (27700 км²), Нижний Выг (27100 км²) и Ковда (26100 км²). Площади водосборов остальных притоков не превышают 20000 км². В гидрологическом отношении водосбор Белого моря достаточно хорошо изучен, данными наблюдений освещено около 90% территории. Учет стока ведется на стационарных гидрологических постах (Мурманское, Северо-Западное и Северное территориальные управления по гидрометеорологии и мониторингу природной среды Роскомгидромета), а также на ведомственных постах, измеряющих расходы воды на гидротехнических сооружениях ОАО «Карелэнерго» (реки Кемь, Нижний Выг) и «Колэнерго» (реки Ковда, Нива). Наиболее продолжительный стоковый ряд имеется по основному притоку – р. Северная Двина (с

1882 года). Средний многолетний приток речных вод в Белое море составляет 231 км^3 , в том числе 108 км^3 (46.8%) приходится на долю водосбора Северной Двины.

Наибольший за период с 1882 по 1988 гг. годовой приток в Белое море отмечен в 1923 г., для которого модульный коэффициент годового стока K р. Сев. Двины был равен 1.59, наименьший – в 1937 г. ($K=0.54$). Многоводными ($K>1.3$) были 1916, 1929 и 1988 гг., относительно небольшой приток ($K<0.7$) наблюдался в 1938, 1960, 1967, 1975 гг. Для речных водосборов, расположенных в сходных физико-географических условиях формирования стока, характерна синфазность хронологических рядов годовых расходов воды и высокие значения коэффициентов корреляции. Анализ стока рек Кольского полуострова (Поной, Варзуга, Умба) показал, что корреляция стоковых рядов характеризуется коэффициентами $r = 0.83-0.87$; для основных притоков Белого моря, расположенных в пределах Республики Карелия (рек Кемь, Нижний Выг, Ковда), коэффициенты корреляции не высоки вследствие регулирования стока каскадами ГЭС. Тем не менее, связь годового стока рек Кемь и Нижний Выг, водосборы которых имеют общую границу, является достаточно тесной ($r = 0.79$). Ряд годового стока по р. Северная Двина – наиболее крупному притоку Белого моря – имеет высокую корреляцию с рядами по рекам Онега и Мезень (0.77 и 0.71 соответственно) и слабо коррелирован со стоком значительно меньших по размерам водосборов, расположенных в Карелии и на Кольском полуострове ($r = 0.16-0.66$). Это свидетельствует о значительной неоднородности условий формирования стока на различных частях водосбора Белого моря и существенном влиянии искусственного внутри- и межгодового перераспределения стока, что, в свою очередь, значительно осложняет расчет и анализ динамики суммарного годового притока в Белое море. Кроме этого, дополнительная трудность объективного и полного учета притока связана с различной продолжительностью и полнотой рядов наблюдений на основных речных водосборах и отсутствием стационарной сети постов на территории, составляющей около 10% всего водосбора моря.

Для расчета средневзвешенного модуля годового притока для всего водосбора Белого моря ($M_{БМ}$) использованы ряды годовых модулей стока по семи его притокам (Северная Двина, Мезень, Онега, Кемь, Нижний Выг, Ковда, Поной) с учетом доли их частных водосборов в общей площади водосбора моря. Расчетное уравнение множественной корреляции имеет вид

$$M_{БМ} = 0.52M_{СД} + 0.11M_{МЭЗ} + 0.08M_{ОН} + 0.04(M_K + M_{НВ} + M_{КОВ}) + 0.02M_{ПОН}, \quad (3.1)$$

где соответствующие нижние индексы обозначают водосборы указанных выше рек.

Продолжительность совместного периода, по которому выполнены расчеты, составила 33 года (с 1956 по 1988 гг.). Основная доля притока приходится на водосбор р. Северная Двина, имеющий наибольший весовой коэффициент в формуле (3.1). Поэтому была исследована зависимость $M_{БМ} = f(M_{СД})$ и получено уравнение линейной связи в виде

$$M_{БМ} = 1.11 + 0.742M_{СД} \quad (3.2)$$

Коэффициент линейной корреляции достаточно высокий ($r=0.966$), следовательно, изменчивость стока р. Северная Двина объясняет 93% дисперсии средневзвешенного по бассейну Белого моря речного притока. Средняя квадратическая ошибка расчета (удлинения ряда $M_{БМ}$) по уравнению связи (3.2) равна $\pm 0.3 \text{ л}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{км}^2$.

Учитывая длинный ряд наблюдений за стоком р. Северная Двина, уравнение (3.2) было использовано для расчета (удлинения) годовых объемов речного притока ($W_{БМ}$) к акватории моря со всего его водосбора по значениям $M_{БМ}$

$$W_{БМ} = 0.001 \cdot M_{БМ} \cdot F \cdot T, \quad (3.3)$$

где $F=718000 \text{ км}^2$ – площадь водосбора Белого моря, $T=31.54 \cdot 10^6$ – число секунд в расчетном периоде.

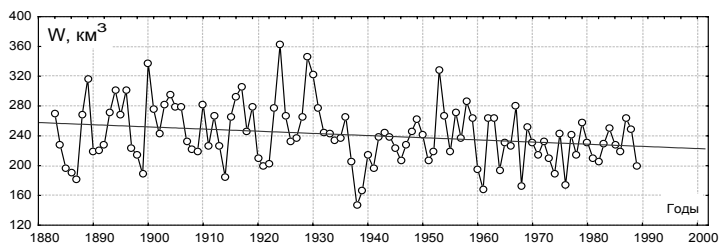


Рис. 3.18. Хронологический ряд и линейный тренд суммарного притока речных вод с водосбора в Белое море за период 1882–1988 гг. (Filatov et al., 2005)

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

Таким образом, был рассчитан непрерывный хронологический ряд годового притока речных вод в Белое море за период 1882–1988 гг. Среднее за указанный 107-летний период значение $W_{БМ}$ составило 241 км^3 , что незначительно (на 4.5%) отличается от нормы притока в Белое море по

данным В.В. Иванова (Иванов, 1976), равной 231 км^3 . Для указанного стокового ряда характерна существенная внутривековая изменчивость (рис. 3.18).

В целом для всего периода среднеквадратическое отклонение от нормы притока составило 40.2 км^3 , коэффициент вариации ряда $C_V = 0.17$. В 1937 г. объем годового притока речных вод в Белое море был наименьшим за указанный период (146 км^3), в 1923 г. – наибольшим (362 км^3). Уравнение линейного тренда характеризует общую тенденцию снижения стока в Белое море за период 1882–1988 гг.:

$$W_{\text{БМ}} = 258 - 0.291 t, \quad (3.4)$$

где t – время с дискретностью один год.

Из уравнения (3.4) следует, что на протяжении периода с 1882 по 1988 гг. темп уменьшения притока речных вод в море составил $29.1 \text{ км}^3 \cdot 100 \text{ лет}^{-1}$. Существенно то, что для различных частей бассейна Белого моря, а также близлежащих территорий во второй половине XX века отмечаются различные тенденции стоковых рядов (табл. 3.6).

Т а б л и ц а 3.6

Средние модули стока (M) и уравнения линейного тренда речного стока в районе Белого моря за совместный период 1947–1988 гг. (коэффициенты линейного тренда выражены в $\text{л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2} \cdot \text{год}^{-1}$)

Водосбор	$M, \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$	Уравнение линейного тренда
Северная Двина	8,46	$11,0 - 0,028 \cdot t$
Мезень	8,39	$9,90 - 0,017 \cdot t$
Онега	8,74	$11,7 - 0,034 \cdot t$
Ковда	10,6	$6,57 + 0,046 \cdot t$
Кемь	9,65	$5,01 + 0,052 \cdot t$
Нижний Выг	9,66	$7,02 + 0,026 \cdot t$
Поной	7,06	$6,86 + 0,002 \cdot t$
Республика Карелия	9,88	$6,79 + 0,035 \cdot t$

Отрицательный тренд в течение указанного 42-летнего периода выявлен в стоке рек Сев. Двина, Онега и Мезень, положительный – на наиболее крупных западных притоках Белого моря (реках Ковда, Кемь, Нижний Выг). Сток с водосборов Кольского полуострова имеет слабую положительную тенденцию, для р. Поной коэффициент линейного тренда составляет $0.02 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{км}^{-2}$ за 10 лет, что на порядок меньше, чем в стоковых рядах рек Карельского побережья. Обусловлено это отличиями морского и континентального климата в исследуемых регионах.

Для оценки межгодовой изменчивости притока речных вод наряду с основной детерминированной составляющей (трендом) важно исследовать квазициклические колебания различных временных масштабов, отражающие продолжительность и чередование многоводных и маловодных фаз на рассматриваемой территории.

Как было показано В.А. Карпечко (Карпечко, 1994), длительность многоводных периодов стока рек Карельской части водосбора Белого моря составляет 5–11 лет, маловодных – колеблется от 2 до 12 лет. Ранее А.Н. Афанасьевым (Афанасьев, 1967) были выделены циклы в колебаниях стока р. Северная Двина в створе с. Усть-Пинега за период 1887–1960 гг. (табл. 3.7), средняя продолжительность циклов составила 15 лет.

Т а б л и ц а 3.7

Внутривековые колебания стока р. Северная Двина за период 1887–1960 гг. По работе (Афанасьев, 1967)

Продолжительность цикла, годы	Число лет	Средний слой стока, мм
1887–1898	12	285
1889–1913	15	301
1914–1921	8	303
1922–1937	16	307
1938–1960	23	274

Более объективное выделение циклическостей в стоковых рядах основано на корреляционном и спектральном анализе. Циклическости с близкими значениями периодов характерны и для 120-летнего ряда суммарного стока рек территории Республики Карелия, для которого значимые флуктуации выделяются при временном сдвиге 5, 10 и 13 лет (Климат., 2004).

Как и для большинства природных геофизических процессов, для рассматриваемого ряда годового притока в Белое море характерна нестационарность и полициклическость. На графике функции спектральной плотности (рис. 3.19) выделяется несколько квазипериодических составляющих в различных временных масштабах. Для приведения к стационарным условиям из исходного ряда был исключен тренд и произведено вычитание выборочного среднего по всей выборке. При уровне значимости $\alpha=10\%$ и проверке на “белый” шум, достоверными следует считать квазипериодические колебания с частотами, соответствующими периодам 5-7, ~13 и ~27 лет. Пики спектральной функции на других частотах не являются

значимыми. Цикличности с близкими временными масштабами в гидрометеорологических рядах выявлены многими исследователями, в частности, А.В. Шнитниковым (Шнитников, 1966), Б.Б. Богословским и А.М. Догановским (Богословский и др., 1981), Н.Н. Филатовым (Филатов, 1997) и многими другими. Для территории Европы М.Д. Масановой (Масанова, 1979) сделан вывод о том, что образование цикличности в стоке рек Европы с периодами 15–14 и 12–10 лет объясняется действием стоячих термобарических волн в атмосфере. Изучая закономерности колебаний водности рек СССР, Э.И. Саруханян и Е.П. Смирнов (Саруханян и др., 1971) выделили цикличности в стоковых рядах с временными масштабами 5–7 лет и связали их с флуктуациями оси вращения Земли. В целом вопрос о природе квазипериодических колебаний и достоверности выделяемых цикличностей продолжает оставаться дискуссионным.

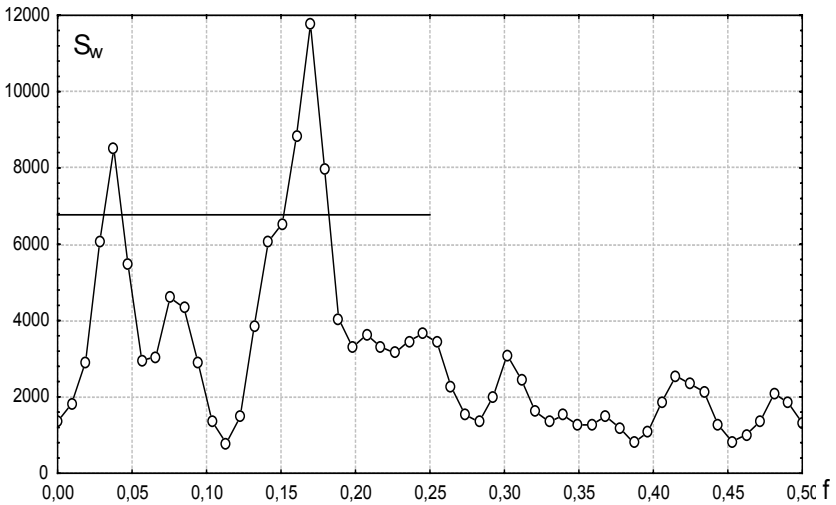


Рис. 3.19. График функции спектральной плотности годового объема притока в Белое море за период 1882-1988 г.г. Горизонтальная линия – доверительная граница для уровня значимости $\alpha=10\%$ (Климат., 2004)

Учитывая синфазность внутривековой динамики основных элементов регионального климата Белого моря и водного баланса для близко расположенных территорий, оценка возможных изменений суммарного

речного притока в море была выполнена по аналогии с возможными изменениями суммарного речного стока с территории Республики Карелии на период 2000–2050 гг. Результаты расчетов по территории Карелии приведены в работе (Филатов и др., 2001). Были рассмотрены два сценария изменения глобального климата в XXI веке и получены результаты численного моделирования на модели глобального климата ECHAM4 (Bengtsson, 1997). Первый сценарий предусматривал удвоение концентрации углекислого газа в атмосфере Земли к 2100 г., во втором сценарии дополнительно учитывалось влияние на тепловой баланс атмосферы аэрозолей антропогенного происхождения. В результате использования данных модели ECHAM4 установлено, что в первой половине текущего столетия для территории Карелии норма годовой температуры воздуха возрастет в 1.3–1.5 раза, увеличения годового количества осадков практически не произойдет (рост по отношению к норме 1950–1999 г.г. составит 1–2%), а суммарное испарение увеличится на 10–13%. Вследствие такого соотношения речной сток как разность осадков и испарения будет несколько снижаться, и в 2000–2049 г.г. его норма уменьшится на 3–8% по отношению к настоящему периоду. Северная часть территории Республики Карелия является одновременно частью водосбора Белого моря, при этом А.Н. Афанасьев (Афанасьев, 1967) включает обе территории в одну зону с синхронными колебаниями речного стока. Существенным подтверждением этого является наличие квазипериодических колебаний в стоковых рядах суммарного стока рек Карелии и суммарного речного притока в Белое море. Это дает основания предположить, что при рассматриваемых сценариях изменения глобального климата направленность тенденций изменения годового стока на обеих территориях будет одинаковой. Таким образом, в ближайшие 50 лет существенных изменений многолетних характеристик притока речных вод в Белое море не произойдет, при условии того, что глобальный и региональный климат будут изменяться в соответствии с предполагаемыми сценариями. Норма притока в Белое море для периода 2000–2049 гг. может уменьшиться на 3–8% и будет равна 220–230 км³.

С учетом соотношений между характеристиками климата и ЭВБ была разработана схема сопряжения МГК с имитационной моделью регионального водного баланса (Сало, 2003), входными параметрами для которой служили ряды годовой температуры и осадков модели ECHAM4 в узлах сетки и осредненные по скользящим 15-летиям. С использованием данных моделирования были оценены возможные изменения климата и основных элементов водного баланса в целом для всего водосбора Белого моря к 2050 году (табл. 3.8).

Таблица 3.8

Средние многолетние характеристики климата и элементов водного баланса водосбора Белого моря для современных условий и на перспективу

Характеристика	Расчетный период, годы		
	1950–2000 г.г.	2000–2050 г.г.	
		Г-сценарий	ГА-сценарий
Температура воздуха, °С	0.5	2.5	1.5
Осадки, мм	550	650	580
Испаряемость, мм	361	497	427
Испарение, мм	328	429	374
Приток с водосбора, мм	322	221	207

Из данных расчета следует, что норма температуры воздуха при G- и ГА-сценариях изменения глобального климата для района Белого моря возрастет на 1–2°С к 2050 г., годовое количество осадков увеличится на 5–20%. Вследствие более интенсивного роста суммарного испарения с водосбора Белого моря (на 14–30%) возможно снижение суммарного притока в море с его водосбора на 30–36%. Эта оценка хорошо согласуется и с общей тенденцией уменьшения притока речных вод в Белое море в настоящее время (рис. 3.18). Уравнение (3.4) может быть представлено в виде

$$W_{BM} = 258 - 0.291 \cdot (t_{ПП} - t_0), \quad (3.5)$$

где $t_{ПП}$ – год, для которого дается оценка величины притока в Белое море; t_0 – начальный год хронологического ряда, для которого рассчитано уравнение линейного тренда (3.4).

Уравнение (3.5) является наиболее простым прогностическим уравнением, поскольку учитывает только экстраполяцию линейного тренда хронологического ряда W_{BM} . Для $t_{ПП} = 2050$, $t_0 = 1882$ получим $W_{BM} = 209 \text{ км}^3$, что несколько меньше оценок по модели ЕСНАМ4 (220–230 км³). Таким образом, независимые оценки по модели линейного тренда (3.5) и по модели ЕСНАМ4 для двух сценариев ИРСС дают сходный результат – снижение к 2050 году суммарного притока речных вод в Белое море с его водосбора.

Глава 4

ГИДРОЛОГО-ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДОСБОРА БЕЛОГО МОРЯ

Речной сток (сток воды, тепла, наносов и растворенных веществ) является основной водно-ресурсной характеристикой поверхностных вод, во многом определяющей хозяйственную деятельность человека и его жизнеобеспечение. Без знания закономерностей формирования и изменения характеристик речного стока под влиянием изменений климата и антропогенных воздействий практически невозможно получить надежных оценок возможных изменений окружающей среды, наземных, пресноводных, эстуарных и морских экосистем и дать интегрированную оценку глобальных изменений в регионе. От направленности этих изменений во многом будет зависеть водообеспеченность населения, функционирование водоемких отраслей промышленности, водного транспорта, энергетики, сельского хозяйства и рыболовства.

4.1. Краткая характеристика природных условий и антропогенного воздействия на водосборе Белого моря

В водосборный бассейн Белого моря входит значительная часть гидрографической сети рек Мурманской, Архангельской областей и республики Карелия. Устьевые области таких крупных рек, как Северная Двина, Онега, Мезень, Кемь, Ковда и др., включают в себя их устьевые участки (от замыкающего створа реки до устьевых баров) и устьевые взморья рек, которые находятся под преобладающим влиянием пресных речных вод.

Общая площадь водосбора бассейна Белого моря составляет более 1100 тыс. км², при этом около 92% площади водосбора относится к числу гидрологически изученных (табл. 4.1). Соотношение площадей суши и моря для водосбора Белого моря составляет 8.25, что является наибольшим показателем для всех окраинных морей Северного Ледовитого океана. Эти соотношения являются косвенным показателем влияния речного стока на окраинные моря (Иванов, 1976).

Глава 4. Гидролого-гидрохимический режим водосбора

Водосбор бассейна Белого моря отличается хорошо развитой речной сетью, обилием озер и болот и находится в зоне избыточного увлажнения за счет значительного количества осадков при малом их испарении. Поэтому, все реки этого региона имеют преимущественно снеговое питание. Однако из-за медленного таяния снегов таежной зоны, весеннее половодье удлиняется во времени. Крупные равнинные водотоки в период половодья и паводка несут большое количество взвешенных частиц, что связано с эрозионными процессами на водосборах рек и интенсивной переработкой берегов и пойм. При этом многие притоки (реки Онега, Мезень) сохраняют высокие скорости течения (до $1 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$) (Государственный водный..., 1978–1992).

Таблица 4.1

Площади водосборов рек Белого моря по субъектам Российской Федерации

№ п/п	Водосборы моря, его частей, реки	Общая площадь водосбора реки, км ²	Сведения по замыкающим гидрометрическим створам рек			Площадь водосбора ниже замык. створа до выхода в море, км ²
			Название замыкающего створа	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	
1. Водосборы рек Мурманской области						
1	р. Поной	15500	с.Каневка	114	10200	5300
2	р. Сосновка	603	с. Сосновка	3.5	584	19
3	р. Пулоньга	734	с. Пулоньга	1.5	734	0
4	р. Пялица	946	с. Пялица	1.0	946	0
5	р. Чапома	1110	с. Чапома	2.9	1090	20
6	р. Стрельна	2770	с. Стрельна	1.0	2770	0
7	р. Варзуга	9840	с. Варзуга	23	7940	1900
8	р. Оленица	403	с. Оленица	2.0	374	29
9	р. Кузрека	255	с. Кузрека	3.0	250	5
10	р. Умба	6250	пор. Паялка	3.7	6250	0
11	р. Колвица	1310	д. Колвица	4.3	1260	50
12	р. Нива	12830	ГЭС-3 (Кандалакша)	6.2	12800	30
13	Другие реки и междуречья	14349	–	–	–	14349
	Суммарная площадь водосборов Мурманской области	66900	–	–	45198	21702
2. Водосборы рек республики Карелия						
14	р. Ковда	26100	Княжегубская ГЭС	1.2	25900	200
15	р. Кереть	3360	ж.д. мост	38.0	2560	800

БЕЛОЕ МОРЕ

№ п/п	Водосборы моря, его частей, реки	Общая площадь водосбора реки, км ²	Сведения по замыкающим гидрометрическим створам рек			Площадь водосбора ниже замык. створа до выхода в море, км ²
			Название замыкающего створа	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	
16	р. Гридина	540	с. Гридино	0.2	540	0
17	р. Воньга	2580	ж.д. мост	11.0	1190	1390
18	р. Кузема	884	ст. Кузема	2.5	882	2
19	р. Поньгома	1220	с. Поньгома	2.5	1220	0
20	р. Летняя	1020	ж.д. мост	7.5	960	60
21	р. Кемь	27700	Путкинская ГЭС	5.7	27700	0
22	р. Мяг-река	387	Рзд. Мягрека	11.0	300	87
23	р. Шуя	938	с. Шуерецкое	5.8	934	4
24	Беломорско-Балтийский канал	27100	Беломорская ГЭС	5.5	27000	100
25	р. Сума	2020	с. Сумский Посад	5.9	1990	30
26	р. Нюхча	1770	с. Нюхча	10.0	1350	420
27	Другие реки и междуречья	5681	–	–	–	5681
	Суммарная площадь водосборов республики Карелия	101300	–	–	92526	8774
3. Водосборы рек Архангельской области						
28	р. Малюшуйка	604	ст. Малюшуйка	13.0	460	144
29	р. Онега	56900	с. Порог	31.0	55700	1200
30	р. Солза	1420	Сухие пороги	39.0	1190	230
31	р. Сев. Двина	357000	с. Усть-Пинега	137.0	348000	9000
32	р. Мудьюга	871	д. Патра-кеевская	19.0	305	566
33	р. Золотица	1950	д. Верхняя Золотица	17.0	1840	110
34	р. Кулой	19000	д. Кулой	209.0	3040	15960
35	р. Мезень	78000	д. Малонисогорская	186.0	56400	21600
36	Другие реки и междуречья	33755	–	–	–	33755
	Суммарная площадь водосборов Архангельской области	549500	–	–	466935	82565
	Суммарная площадь по бассейну Белого моря	717700	–	–	604659	113041

На большей части водосбора отмечаются близкие геолого-геоморфологические условия развития гидрографической сети и русловых процессов. В основном это области с чередованием свободных и ограниченных условий. Свободные условия развития русловых переформирований наблюдаются в пределах приморской низменности и на отдельных участках побережья Белого моря. Условия ограниченного развития русловых переформирований наиболее распространены в Карелии и на Кольском полуострове, где отмечается наличие трудно размываемых скальных пород, много порогов и обрывистых берегов. Такой водный режим и геоморфологические условия для большинства рек региона предопределяют характер русловых процессов, который находит отражение в распространении различных типов русел. Доли врезанных и широкопойменных русел в регионе практически равны. Наиболее распространенными типами русел являются излучины и разветвления. Кроме того, в бассейне р. Сев. Двины карстовые явления в известняках и гипсах создают сеть подземных водоемов и многочисленных ключей (Gladkov, 1994; Grishanin, 1997).

Основные черты ледотермического режима рек бассейна определяются, главным образом, климатическими условиями. Кроме того, на его формирование и изменчивость оказывают влияние водность, высота местности, скорости течений и наличие карста. Эти факторы обуславливают различия ледотермического режима соседних рек, а также по длине одной реки. Переход температуры через 0.2°C весной, в среднем, происходит в третьей декаде апреля в южных районах и во второй декаде мая в северных. Наибольшая среднемесячная температура воды (июль) превышает 18°C в южной части и не более 15°C в северной и восточной частях. Переход температуры воды рек через 0.2°C происходит до 20 октября на северо-востоке и в первой декаде ноября в южной части. Осенний ледоход на реках начинается 10–20 октября на северо-востоке и позднее 30 октября на юге и юго-западе. Весенний ледоход начинается в южных частях бассейна в третьей декаде апреля и постепенно смещается в низовьях рек к третьей декаде мая.

Столь многообразные и сложные гидрологические и геоморфологические условия оказывают заметное влияние на формирование своеобразного естественного гидрохимического режима рек этого региона с преимущественно гидрокарбонатно-кальциевым типом вод. Поскольку питание рек и озер региона глубинными подземными водами незначительно, решающая роль в формировании гидрохимического режима принадлежит почвам и подстилающим их границам. Таежные и болотные реки имеют высокую цветность за счет повышенного содержания гуминовых веществ (Ресурсы..., 1963, 1965, 1972).

Речная система бассейна Белого моря относится к Северному экономическому району с высокой плотностью промышленных объектов (рис. 4.1). В промышленности этого района основную роль играют предприятия цветной металлургии, принадлежащие концерну «Норильский никель» и расположенные в районе городов Печенга-Никель, Мончегорск (Евсеев и др., 1996; Обзоры..., 2000).

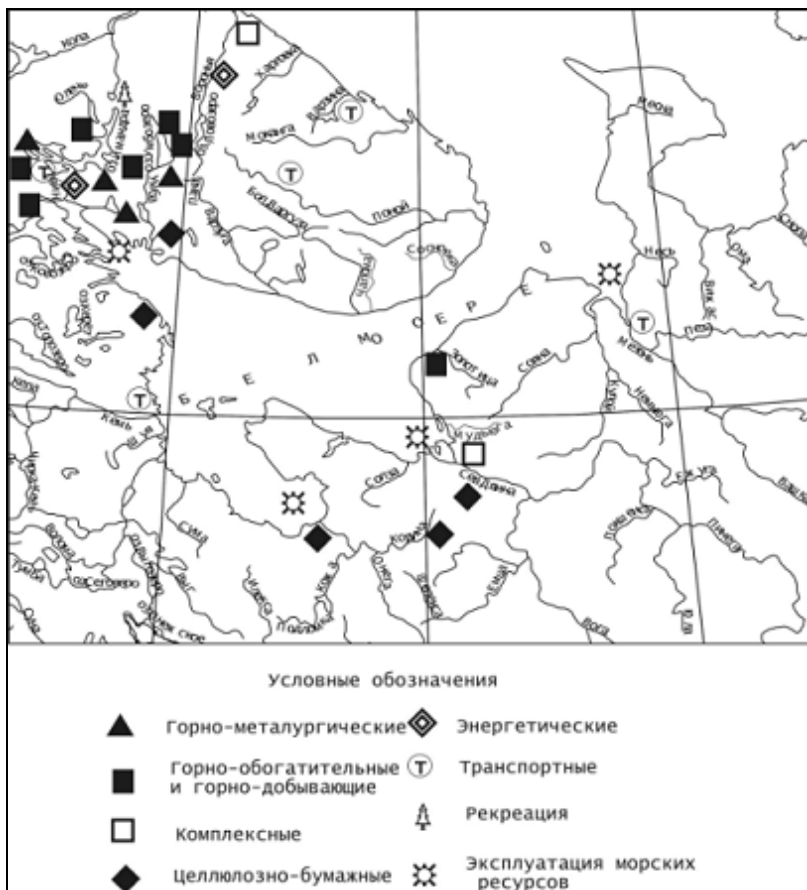


Рис. 4.1. Карта-схема расположения основных промышленных районов на водосборе Белого моря. (Иванов, Брызгалов, 2003; Filatov et al., 2005)

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

В г. Кандалакша работает крупный алюминиевый комбинат, в г. Оленегорск – железорудный комбинат. В г. Ковдор действует предприятие по добыче железорудного сырья апатитонепелиновых руд. Машиностроительные, строительные и пищевые предприятия сосредоточены в г. Мурманск, Северодвинск, Оленегорск. Крупные предприятия целлюлозно-бумажной промышленности и лесопромышленного комплекса расположены в Архангельске, Новодвинске, Коряжме. Основу энергетики района составляют Кольская АЭС, ГЭС на реках Ниве и Туломе, Кировская, Архангельская, Северодвинская ГРЭС, работающие на интинских углях и мазуте.

Такое интенсивное освоение водосбора Белого моря способствовало формированию зон повышенного антропогенного воздействия, приводящего к существенным изменениям в экосистеме моря. Основными негативными факторами антропогенного воздействия являются (Евсеев и др., 1996):

- механические нарушения почв и грунтов, преимущественно, в районах с многолетней мерзлотой, а также значительные загрязнения подземных и поверхностных вод и воздуха за счет сбросов взвешенных веществ (включая угольные шламы), соединений стронция, тяжелых металлов (особенно ртути), нефтепродуктов в районах действия предприятий горнодобывающей промышленности;

- высокий уровень загрязненности природных вод (неочищенными и недостаточно очищенными промышленными стоками, содержащими фенолы, формальдегид, фурфурол, лигносульфанаты, тяжелые металлы, такие как медь, цинк, свинец, ртуть) и воздушного бассейна (специфическими примесями, такими как метилмеркаптан, сероводород, сажа, сероуглерод), а также механическое нарушение растительного покрова и почв, снижение биоразнообразия на обширных территориях деятельности предприятий бумажной и деревообрабатывающей промышленности;

- загрязнение атмосферы автомобильным транспортом (соединениями азота, бензопиреном, окисью углерода), деятельность которого также приводит к значительным механическим нарушениям почв и грунтов, особенно в районах с многолетней мерзлотой;

- поступление в природную среду неочищенных или недостаточно очищенных сточных вод предприятий пищевой (включая рыбопереработку) промышленности, содержащих органические вещества, соединения азота, взвешенные частицы и т.д.;

- загрязнение природной среды в районах деятельности крупных тепловых электростанций, работающих на твердом топливе, окислами серы и азота, тяжелыми металлами, сажей, ПАУ.

Опасным для Северного экономического района является тепловое загрязнение водных объектов и, в частности, озера Имандра. Потенциально опасным источником формирования «горячих точек» являются АЭС.

Жилищно-коммунальное хозяйство городов и поселков практически повсеместно вносит свой вклад в формирование «горячих точек» вследствие недостаточной эффективности и мощности очистных сооружений, либо их полного отсутствия. Коммунально-бытовые стоки бактериально загрязнены и содержат органические соединения, взвешенное вещество, нефтепродукты, СПАВ и т.п. С жилищно-коммунальным хозяйством связано загрязнение природной среды твердыми бытовыми отходами, переработка которых слабо развита в России, что приводит к захлапмлению территории, загрязнению поверхностного стока, возгораниям и т.д.

Водные объекты водосбора становятся потенциальными источниками загрязнения устьев впадающих в Белое море рек и прибрежных зон моря (табл. 4.2).

Т а б л и ц а 4.2

**Объем загрязняющих веществ, поступающих в Белое море
(Обзоры загрязненности окружающей среды..., 2000)**

Годы	Объем загрязняющих веществ, тыс. т·год ⁻¹			
	нефтепродукты	фенолы	ХОП т·год ⁻¹	СПАВ
1989	<u>2.76*</u>	<u>0.110</u>	<u>0.460</u>	<u>0.42</u>
	2.63	0.100	0.460	0.38
1990	<u>5.17</u>	<u>0.052</u>	<u>0.830</u>	<u>0.98</u>
	5.10	0.051	0.830	0.94
1991	<u>3.96</u>	<u>0.022</u>	<u>0.290</u>	<u>1.48</u>
	3.90	0.021	0.290	1.43
1992	<u>2.91</u>	<u>0.010</u>	<u>0.137</u>	<u>0.75</u>
	2.87	0.010	0.137	0.75
1993	<u>3.52</u>	<u>0.036</u>	<u>1.350</u>	<u>0.00</u>
	3.49	0.036	1.240	0.00
1994	<u>4.46</u>	<u>0.022</u>	<u>0.230</u>	<u>0.68</u>
	4.41	–	0.230	0.66
1995	<u>3.74</u>	<u>0.021</u>	<u>0.300</u>	<u>0.50</u>
	3.70	0.020	0.300	0.49
1996	<u>2.71</u>	<u>0.002</u>	<u>0.190</u>	<u>0.61</u>
	2.67	–	0.190	0.60

* В числителе – общий объем поступающих веществ, в знаменателе – поступление с речным стоком.

В результате возрастающего антропогенного воздействия и связанных с ним негативных последствий происходит постепенная трансформация экосистем устьевых областей рек. Наряду с поступлением загрязняющих веществ на водосбор и непосредственно в водные объекты, на водный и русловой режим рек значительное влияние оказывают инженерные и воднотранспортные мероприятия, связанные с коренным улучшением судоходных условий (в первую очередь, дноуглубление), добычей песка и гравия из русел рек, а также лесосплавом. Эти техногенные мероприятия оказывают длительное воздействие не только на водный и русловой режимы рек, но и на состояние речных экосистем в целом. Серьезную озабоченность вызывает все более выраженное накопление токсичных загрязняющих веществ в рыбе и других морепродуктах, а также микробное загрязнение прибрежных морских вод.

4.2. Водный баланс и водные ресурсы

Одним из существенных последствий изменения климата может стать изменение характеристик элементов водного баланса и водных ресурсов региона и, как следствие, гидрологического режима и состояния пресноводных и эстуарных экосистем. Следует отметить, что сток семи крупных рек – Северной Двины, Онеги, Мезени, Поноя, Нивы, Ковды, Кеми – составляет 78% от общего притока материковых вод в Белое море (табл. 4.3). Поэтому, по изменению стока этих рек, можно судить об изменениях речного стока на водосборе Белого моря в целом. Внутригодовое распределение поступающего в море речного стока неравномерно. За период открытой воды четыре крупных реки вносят в море до 80% годового стока, а за период весеннего половодья (май-июнь) – около 50%.

Совместный анализ многолетних колебаний метеорологических и гидрологических характеристик показал, что для всех рассматриваемых рек до 1990-х годов наблюдалось увеличение водности. За этот же период увеличились среднегодовая температура воздуха региона, температура зимнего периода, а объем среднегодовых и зимних осадков вырос на 8 и 15%, соответственно (Иванов, Соловьева, Шикломанов, 1996). За последнее десятилетие речной сток в море несколько уменьшился (см. раздел 3.2 Наст. книги).

Т а б л и ц а 4.3

Приток речных вод в Белое море

№ по табл. 2.1	Водосборы моря, его частей и рек	Общая площадь водосбора реки, км ²	Среднегодовой приток в море, км ³	в т.ч.		Период обработки
				По замыкающим гидрометрическим створам	С неизученных территорий	
1. Водосборы рек Мурманской области						
1	р. Поной	15500	5.32	3.50	1.82	1933-1996
2	р. Сосновка	603	0.22	0.21	0.01	1948-1992
3	р. Пулоньга	734	0.29	0.29	0.00	1948-1957
4	р. Пялица	946	0.37	0.37	0.00	1952-1964
5	р. Чапома	1110	0.41	0.40	0.01	1961-1992
6	р. Стрельна	2770	0.98	0.98	0.00	1936-1978
7	р. Варзуга	9840	3.16	2.55	0.61	1936-1996
8	р. Оленица	403	0.15	0.14	0.01	1947-1992
9	р. Кузрека	255	0.09	0.09	0.00	1946-1992
10	р. Умба	6250	2.54	2.54	0.00	1932-1996
11	р. Колвица	1310	0.48	0.46	0.02	1928-1992
12	р. Нива	12830	5.06	5.06	0.00	1956-1996
13	Другие реки и междуречья	14349	6.70	–	6.70	*
	Суммарный приток по Мурманской области	66900	25.77	16.59	9.18	1950-1998
2. Водосборы рек республики Карелия						
14	р. Ковда	26100	9.04	8.95	0.09	1956-1996
15	р. Кереть	3360	0.94	0.72	0.22	1938-1989
16	р. Гридина	540	0.16	0.16	0.00	1945-1992
17	р. Воньга	2580	0.69	0.32	0.37	1956-1975
18	р. Кузема	884	0.28	0.28	0.00	1957-1988
19	р. Поньгома	1220	0.38	0.38	0.00	1940-1991
20	р. Летняя	1020	0.28	0.26	0.02	1946-1964
21	р. Кемь	27700	8.82	8.82	0.00	1968-1988
22	р. Мяг-река	387	0.10	0.08	0.02	1957-1989
23	р. Шуя	938	0.26	0.26	0.00	1935-1992
24	Бел.-Балт. канал	27100	8.31	8.15	0.16	1956-1992
25	р. Сума	2020	0.66	0.65	0.01	1926-1992
26	р. Нюхча	1770	0.64	0.49	0.15	1954-1992
27	Другие реки и междуречья	5681	2.2	–	2.20	*

Глава 4. Гидролого-гидрохимический режим водосбора

№ по табл. 2.1	Водосборы моря, его частей и рек	Общая площадь водосбора реки, км ²	Среднегодовой приток в море, км ³	в т.ч.		Период обработки
				По замыкающим гидromетрическим створам	С неизученных территорий	
	Суммарный приток по республике Карелия	101300	3276	29.52	3.24	1950-1998
3. Водосборы рек Архангельской области						
28	р. Малошуйка	604	0.21	0.16	0.05	1950-1992
29	р. Онега	56900	16.12	15.80	0.32	1943-1993
30	р. Солза	1420	0.46	0.39	0.07	1936-1988
31	р. Северная Двина	357000	108.15	105.00	3.15	1882-1998
32	р. Мудьюга	871	0.51	0.18	0.33	1947-1992
33	р. Золотица	1950	0.74	0.70	0.04	1956-1988
34	р. Кулой	19000	6.63	1.06	5.57	1927-1988
35	р. Мезень	78000	28.01	20.30	7.71	1921-1996
36	Другие реки и междуречья	33755	11.40	–	11.40	*
	Суммарный приток по Архангельской области	549500	172.23	143.59	28.64	1950-1998
	Суммарный приток по Белому морю	717700	230	189	41.00	1950-1998

Примечание: сведения о замыкающих створах рек Белого моря приведены в таблице 2.4.

* суммарный сток по неизученным частям водосборов рек (ниже замыкающих створов и междуречий) дан по картам среднегодового стока.

Следует отметить, что приходная часть пресноводного баланса Белого моря определяется не только притоком материковых вод, но и атмосферными осадками. Многолетнее и внутригодовое распределение притока речных вод и атмосферных осадков представлено на рис. 4.2. В Белом море пресноводный приток за счет речных вод существенно превышает приток за счет атмосферных осадков (Иванов, Соловьева, Шикломанов, 1996).

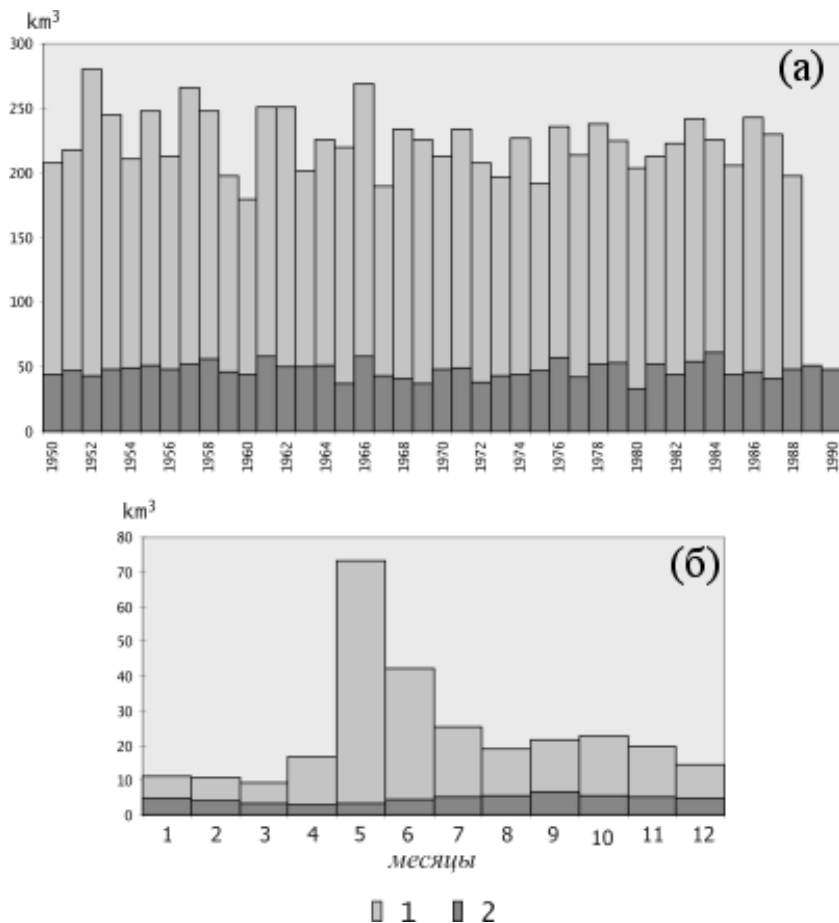


Рис. 4.2. Межгодовое (а) и внутригодовое (б) распределение притока пресных вод в Белое море по данным до 1990 г.: 1 – приток за счет речных вод; 2 – приток за счет атмосферных осадков. (Иванов, Брызгалов, 2003; Filatov et al., 2005)

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

В последние годы, как показали наши исследования, отмечается увеличение осадков, но еще более заметно увеличение испарения. В результате, при потеплении климата в регионе пресноводный приток в море уменьшается.

4.3. Влияние климатических воздействий на гидрологический и гидрохимический режим речных систем

Изменение характеристик водного и теплового баланса под влиянием изменений климата и различных видов антропогенных воздействий приводит к изменениям водного, руслового, ледотермического режимов и экологического состояния речных систем.

Ледовый и термический режим рек, с ожидаемым изменением характеристик речного стока и элементов теплового баланса атмосферы, также претерпят определенные изменения. Анализ рядов аномалий сроков появления плавучего льда и начала весеннего ледохода на реках бассейнов Печоры и Северной Двины, выполненный в ГМЦ России Б.М.Гинзбургом и И.И.Солдатовой, показал наличие тенденции к смягчению суровости ледового режима. Она выражается во все более раннем вскрытии рек и их более позднем замерзании. Эти тенденции в 3-4 раза меньше, чем на большинстве рек более южных районов европейской территории России. Установлено, что знак и величина выявленных тенденций изменения сроков ледовых явлений зависят от трендов определяющей эти сроки средней месячной температуры воздуха над рассматриваемым бассейном.

Экологическое состояние устьев рек бассейна Белого моря находится под сильным воздействием антропогенного фактора, проявляющегося в первую очередь в переходе от олиготрофных к мезотрофным, а в отдельные периоды и к эвтрофным экосистемам. Эти изменения проходят в условиях сурового климата, широкого распространения мерзлых пород, низкого потенциала самоочищения и самовосстановления природных вод, и, наконец, низкого биологического разнообразия, что предопределяет высокую уязвимость рассматриваемых экосистем, в том числе их повышенную чувствительность ко всем видам природных и антропогенных факторов воздействия.

К природным факторам, в первую очередь, следует отнести атмосферные осадки, сток воды и наносов, ледотермический и русловой режим, солнечную радиацию. Основными антропогенными факторами являются: 1) физические, выражаемые в виде регулирования речного стока гидроэлектростанциями, теплового воздействия, работ по улучшению условий судоходства, карьерных разработок и берегового гидротехнического строительства, и 2) загрязнение химическими соединениями за счет сбросов от точечных источников, смыва их с поверхности суши и выпадения из атмосферы.

К главным внутрисистемным факторам относятся окислительно-восстановительные и продукционно-деструкционные процессы и трансформация загрязняющих веществ. При этом, учитывая особенности природных условий и многообразие видов хозяйственной деятельности, влияние этих факторов на динамику состояния речных систем неоднозначно и требует дифференцированного подхода.

О динамике изменения гидрохимического режима Белого моря можно судить на основе анализа многолетней (1965–1999 гг.) режимной гидрохимической информации, полученной на постоянных пунктах Государственной сети наблюдений за качеством поверхностных вод СССР и Российской Федерации (ОГСНК/ГСН) на 16 реках, включая Северную Двину, Онегу, Поной, Ниву, Мезень, через которые происходит основной вынос речных вод в Белое море (Ежегодники..., 2000). Расположение пунктов режимных наблюдений представлено на рис. 4.3.

Таблица 4.4

Основные гидрологические характеристики замыкающих створов рек бассейна Белого моря (Ivanov V.V. River..., 1998; Ivanov V.V in book Filatov et al., 2005)

Река	Общая площадь водосбора, км ²	Сведения о замыкающих створах				Среднегодовой приток в море, км ³
		Местоположение створа на рис. 2.3	Расстояние от устья, км	Площадь водосбора, км ²	Диапазоны колебания среднегодового водного стока, км ³ ·год ⁻¹	
Поной	15500	1. п. Краснощелье	280.0	3810	0.970-1.900	5.32
Сосновка	603	2. с. Сосновка	3.5	584	0.138-0.603	0.22
Чапома	1110	3. с. Чапома	2.9	1090	0.290-0.590	0.41
Варзуга	9840	4. с. Варзуга	23.0	7940	2.100-3.880	3.16
Умба	6250	5. порт Паялка	3.7	6250	2.050-3.240	2.54
Нива	12830	6. г. Кандалакша	6.2	12800	4.320-6.720	5.06
Кереть	3360	7. ж. д. Мост	38.0	2560	0.379-0.965	0.94
Гридина	540	8. с. Гридино	0.20	540	0.098-0.277	0.16
Поньгома	1220	9. с. Поньгома	2.5	1220	0.162-0.583	0.38
Кемь	27700	10. п. Шомба	84.0	26300	5.600-10.640	8.82
Нюхча	1770	11. с. Нюхча	10.0	1350	0.285-0.713	0.64
Онега	56900	12. с. Порог	31.0	55700	12.500-19.900	16.10
Северная Двина	357000	13. с. Усть-Пинега	137.0	348000	70.300-130.000	108.00
Мудьюга	871	14. д. Патракеевская	19.0	305	0.117-0.220	0.51
Золотица	1950	15. д. Верхняя Золотица	17.0	1840	0.478-0.986	0.74
Мезень	78000	16. д. Малонисогорская	186.0	56400	13.300-28.500	28.00

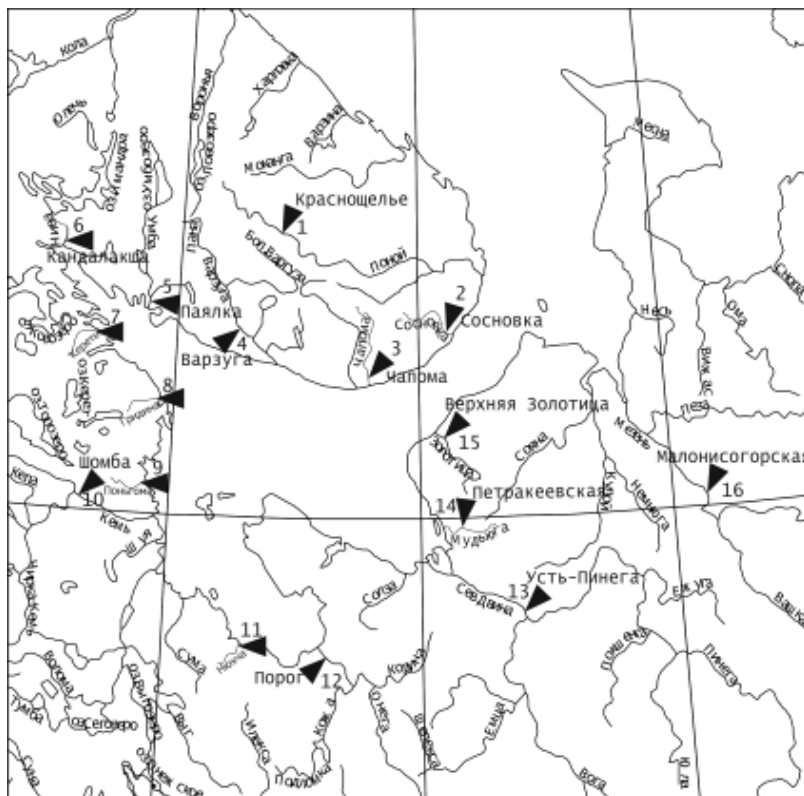


Рис. 4.3. Карта-схема расположения пунктов режимных гидрохимических наблюдений ГСН на реках бассейна Белого моря. (Иванов, Брызгалов, 2003)

Основные гидрологические характеристики замыкающих створов исследуемых рек приведены в табл. 4.4. Для всех пунктов гидрохимических наблюдений имеются соответствующие данные по гидрометеорологическому режиму (Ресурсы..., 1963, 1965; River..., 1998); Filatov et al., 2005.

4.4. Основные виды загрязнения рек

Анализ многолетней режимной информации ГСН позволил выявить общие тенденции пространственно-временных изменений гидрохимического режима в устьях рек бассейна Белого моря. Различия в уровне и

характере антропогенного воздействия на реки региона сказываются на режиме большинства исследованных параметров качества вод. Наиболее заметная межгодовая и сезонная изменчивость отмечена для биогенных элементов и приоритетных загрязняющих веществ.

Минеральные формы азота и фосфора. Для устьевых участков рек бассейна Белого моря характерны довольно заметные различия в диапазонах изменения концентрации в воде минеральных форм азота и фосфора (табл. 2.5). Наиболее широкий диапазон колебания концентраций характерен для р. Нива по азоту аммонийному (н.о.-3.190 мг·л⁻¹), р. Поной – по азоту нитритному (н.о.-0.070 мг·л⁻¹), р. Варзуга – по азоту нитратному (н.о.-0.12 мг·л⁻¹) и р. Мезень – по фосфору фосфатному (н.о.- 0.263 мг·л⁻¹). Н.о. – ниже предела обнаружения.

В целом, режим биогенных элементов названных рек по содержанию в воде азот- и фосфорсодержащих соединений близок к таковому для мезотрофных водных объектов, с тенденцией периодического накопления в воде минеральных форм азота и фосфора до концентраций, превышающих предельно-допустимые экологические концентрации (ПДЭК), условно принятые для мезотрофных водоемов (Иванов, Соловьева, Шиклома-нов, 1996), в 3–70 раз по максимальным значениям многолетних вариационных рядов и в 2–10 раз по максимальным значениям модального интервала (табл. 4.5).

Характерной особенностью режима биогенных элементов этих рек является тенденция увеличения межгодовой и внутригодовой изменчивости концентрации азот- (рис. 4.4) и фосфорсодержащих соединений по мере усиления антропогенной нагрузки (рис. 4.5). Характерные черты, присущие внутригодовой (сезонной) динамике биогенных элементов в естественных условиях, для большинства исследуемых рек нарушены за счет периодического усиления антропогенного воздействия.

Загрязняющие вещества. Антропогенное воздействие проявляется в высокой межгодовой изменчивости содержания в воде устьев рек многих загрязняющих веществ, а также в расширении общего диапазона колебаний их концентраций за исследуемый период. Неравномерное по срокам и уровням антропогенное воздействие в значительной мере является определяющим фактором высокой внутри- и межгодовой изменчивости концентрации многих загрязняющих веществ. Наиболее широкий диапазон колебания концентраций загрязняющих веществ отмечен для (табл. 4.5):

Таблица 4.5

Приоритетные загрязняющие вещества на замыкающих створах рек бассейна Белого моря

Реки	Замыкающие створы	Общий диапазон колебания концентраций, мг/л-1							
		ЛООС	фенолы	нефтепродукты (НУ)	СПАВ	соединения			никеля
Поной	Краснощелье	0,06-2,46	н.о.*-0,063	н.о.-0,450	н.о.-0,120	н.о.-0,018	н.о.-0,035	н.о.-0,073	
Сосновка	Сосновка	0,27-5,78	н.о.-0,032	н.о.-0,077	н.о.-0,080	н.о.-0,011	н.о.-0,092	н.о.-0,037	
Чапوما	Чапوما	0,02-2,44	н.о.-0,019	н.о.-1,770	н.о.-0,210	н.о.-0,013	н.о.-0,108	н.о.-0,054	
Варзуга	Варзуга	0,02-8,52	н.о.-0,021	н.о.-1,940	н.о.-0,120	н.о.-0,017	н.о.-0,080	н.о.-0,022	
Умба	Паялка	0,19-3,76	н.о.-0,038	н.о.-0,820	н.о.-0,090	н.о.-0,022	н.о.-0,037	н.о.-0,029	
Нива	Кандалакша	0,02-0,35	н.о.-0,380	н.о.-6,900	н.о.-0,940	н.о.-0,015	н.о.-0,065	н.о.-0,034	
Кереть	жд. Мост	0,31-8,15	—**	н.о.-0,620	н.о.-0,080	—	—	—	
Гридино	с. Гридино	—	—	н.о.-0,880	н.о.-0,040	—	—	—	
Поньгома	с.Поньгома	0,61-6,33	—	н.о.-0,400	н.о.-0,070	—	—	—	
Кемь	Шомба	0,28-4,05	—	н.о.-1,120	н.о.-0,050	—	—	—	
Нюхча	с.Нюхча	0,42-7,55	—	н.о.-0,630	н.о.-0,100	—	—	—	
Онега	с.Порог	0,05-.05	н.о.-0,012	н.о.-2,300	н.о.-0,070	н.о.-0,061	н.о.-0,120	н.о.-0,045	
Сев. Двина	Усть-Пинегга	0,65-7,45	н.о.-0,028	н.о.-0,519	н.о.-0,169	н.о.-0,013	н.о.-0,248	н.о.-0,006	
Мудьюга	д. Патракевская	0,60-5,73	н.о.-0,009	н.о.-2,400	н.о.-0,070	н.о.-0,008	н.о.-0,090	н.о.-0,017	
Золотница	Верхняя Золотница	0,61-5,44	н.о.-0,006	н.о.-1,770	н.о.-0,370	н.о.-0,009	0,001-0,114	н.о.-0,016	
Мезень	д. Малонисогорская	0,53-7,29	н.о.-0,018	н.о.-1,410	н.о.-0,090	н.о.-0,039	н.о.-0,096	н.о.-0,039	

ЛООС – легкоокисляемые органические соединения, определяемые по БПК5

* – ниже предела обнаружения

** – прочерк означает отсутствие информации.

- р. Поной по соединениям никеля (н.о.-0.073 мг·л⁻¹);
- рек Варзуга и Кереть по легкоокисляемым органическим веществам, определенным по БПК₅ (0.02-8.52 мг·л⁻¹);
- р. Нива по фенолам (н.о.-0.380 мг·л⁻¹), нефтепродуктам (н.о.-6.90 мг·л⁻¹) и СПАВ (н.о.-0.940 мг·л⁻¹);
- р. Онега по соединениям меди (н.о.-0.061 мг·л⁻¹);
- р. Северная Двина по соединениям цинка (н.о.-0.248 мг·л⁻¹).

Сравнительная оценка уровня загрязненности устьевых участков рек по кратности превышения ПДК позволяет заключить, что критическими показателями загрязненности являются:

- фенолы, концентрация которых в воде периодически достигала 380 ПДК в устье р. Нива и 63 ПДК в устье р. Поной;
- углеводороды нефтяного происхождения, максимальная концентрация которых периодически составляла 138 ПДК в устье р. Нива и 35-46 ПДК в устьях рек Чалома, Варзуга, Онега, Золотица;
- соединения меди, кратность превышения ПДК которых по максимальным концентрациям достигала 61 в устье р. Онега и 9 в устье р. Мезень.

Для устьевой области р. Северная Двина критическими показателями загрязненности являются также лигносульфонаты (ПДК 1.0 мг·л⁻¹), концентрация которых в воде чаще всего составляла 10-34 мг·л⁻¹ при общем диапазоне колебаний их содержания за многолетний период от 1.0 до 212 мг·л⁻¹. Нередки случаи накопления в воде и метанола (ПДК 0.10 мг·л⁻¹) до концентраций 10.0-33.0 мг·л⁻¹ (Ежегодники..., 2000).

Тенденция накопления в водной среде загрязняющих органических и неорганических веществ приводит, в первую очередь, к нарушению кислородного режима речных экосистем. На устьевых участках это выражалось в расширении диапазона колебаний концентрации растворенного в воде кислорода от 2.20 до 17.8 мг·л⁻¹ с тенденцией увеличения повторяемости ситуации его дефицита в воде. Наиболее отчетливо последнее проявляется на замыкающих створах рек Нива и Сев. Двина.

Высокая изменчивость гидрохимического режима рек изучаемого бассейна на их замыкающих створах и заметное превышение «антропогенно измененного» фона по целому ряду приоритетных загрязняющих веществ в современных условиях предопределяет актуальность детального изучения изменчивости объемов и компонентного состава притока растворенных химических веществ в Белое море.

Эти данные крайне важны для оценки характера и уровня возможного загрязнения морских вод и влияния речного стока на формирование их качества.

Расчет и анализ изменчивости речного стока химических веществ проведен применительно к тем ингредиентам, по которым выявлены существенные различия в гидрохимическом режиме на замыкающих створах исследуемых рек и для которых характерна высокая повторяемость (более 30%) фактов превышения ПДК и ПДЭК.

Оценка межгодовой изменчивости стока проведена за период с 1980 по 1999 гг. для следующих химических веществ: минеральные формы азота, фосфор фосфатный и общий, легкоокисляемые органические соединения (ЛООС), фенолы, нефтепродукты, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), соединения меди, цинка, никеля, хрома и железа общего, взвешенные вещества, сульфаты, хлориды и сумма ионов.

Для соединений азота и фосфора детально исследовались внутригодовая изменчивость объемов стока. Количественная оценка объема стока растворенных веществ проводилась путем перемножения значений концентраций и объемов водного стока за соответствующий промежуток времени по методике Гидрохимического института (Организация..., 1999). Значимыми для оценки природной и антропогенной изменчивости химического стока считались вариационные ряды длиной не менее 8–10 лет режимных наблюдений с частотой отбора проб 6–12 раз в год.

Расчет объемов стока химических веществ проведен для всех исследуемых рек. Для сравнительной межсистемной оценки водного и химического стока был введен модуль стока, т.е. отношение среднегодовых объемов стока к площади водосбора ($\text{т}\cdot\text{км}^{-2}$ в год) (Брызгалов и др., 2000). Все результаты наблюдений за гидрохимическими показателями обеспечены данными о стоке воды, публикуемыми в изданиях Государственного водного кадастра (Государственный водный..., 1994; Ресурсы..., 1963, 1965, 1972; Ivanov, 1998). Результаты проведенных расчетов показали высокую изменчивость компонентного соотношения стока химических веществ для каждой исследуемой речной системы.

С водосборов рек Мурманской области аномально высокие объемы стока химических веществ стали периодически возможными для (табл. 4.6):

- всех исследуемых устьев рек по взвешенным веществам, сульфатам и кремнию (десятки тыс. $\text{т}\cdot\text{год}^{-1}$);
- рек Варзуга, Умба, Нива по легкоокисляемым органическим веществам (до 10–17 тыс. $\text{т}\cdot\text{год}^{-1}$);
- рек Варзуга, Умба, Нива по азоту аммонийному, азоту нитритному (до 2.5 тыс. $\text{т}\cdot\text{год}^{-1}$) и нефтяным углеводородам (до 1.5–6.2 тыс. $\text{т}\cdot\text{год}^{-1}$).

С водосборов рек Карелии приток химических веществ в Белое море периодически достигал для (табл. 4.7):

- р. Кереть по взвешенным веществам, сумме ионов, легкоокисляемым органическим веществам и кремнию 1.8–16.9 тыс. т·год⁻¹;
- р. Кемь по взвешенным веществам, сульфатам, соединениям кремния и легкоокисляемым органическим веществам 23.0–428.0 тыс. т·год⁻¹;
- р. Нюхча по сумме ионов 15.0-35.0 тыс. т·год⁻¹.

С водосборов рек Архангельской области наиболее высокие объемы стока химических веществ отмечены в отдельные годы по (табл. 4.8):

- азоту аммонийному, азоту нитратному и нефтяным углеводородам для рек Онега, Сев. Двина и Мезень (2.0-14.0 тыс. т·год⁻¹);
- легкоокисляемым органическим веществам и соединениям кремния для рек Сев. Двина и Мезень (85.0-335.0 тыс. т·год⁻¹);
- взвешенным веществам и сульфатам для р. Сев. Двина ($2.5 \cdot 10^3$ тыс. т·год⁻¹ и $6.2 \cdot 10^3$ тыс. т·год⁻¹, соответственно).

Т а б л и ц а 4.6

Диапазоны колебаний среднегодовых объемов стока химических веществ с водосборов рек Мурманской области (тонн·год⁻¹)

Компоненты стока	Реки (расположение пунктов режимных наблюдений на рис. 4.3)					
	Поной	Сосновка	Чапома	Варзуга	Умба	Нива
Азот аммонийный	1-247	н.о.*-56.1	н.о.-54.3	н.о.- 933.0	н.о.-189.0	29.0-2520.0
Азот нитритный	н.о.-27.0	н.о.-5.3	н.о.-8.6	н.о.-22.6	н.о.-6.4	н.о.-65.0
Азот нитратный	7.0-82.0	н.о.-75.9	8.1-54.8	26.7-916.0	38.1-186.0	16.0-496.0
Фосфор фосфатный	н.о.-73.0	н.о.-25.9	н.о.-13.8	н.о.-75.4	н.о.-44.5	4.0-168.0
ЛООС (по БПК ₅)	702-2050	64-1024	39-790	42-10012	450-10060	3100-17100
Фенолы	1-24	н.о.-10	н.о.-19	н.о.-68	н.о.-121	н.о.-304
НУ	н.о.-343	н.о.-152	н.о.-302	н.о.-2729	н.о.-2605	н.о.-1510
СПАВ	н.о.-9.5	н.о.-80.0	н.о.-107.0	н.о.-258.0	н.о.-213.0	н.о.-258.0
Соединения меди	н.о.-8.20	н.о.-6.20	0.38-3.84	н.о.-17.60	4.63-21.50	9.00-35.00
Соединения цинка	2.40-27.00	0.50-4.10	0.87-10.10	7.60-128.00	3.96-74.20	н.о.-72.00
Соединения никеля	2.40-25.00	н.о.-1.58	0.11-9.98	н.о.-31.00	0.71-26.00	13.00-638.00
Кремнекислота	(1.10-67.00)·10 ³	(0.40-1.91)·10 ³	(0.57-2.02)·10 ³	(2.76-12.20)·10 ³	(1.06-7.02)·10 ³	(2.00-14.00)·10 ³
Взвешенные вещества	(1.4-16.7)·10 ³	(0.53-2.24)·10 ³	(0.34-20.6)·10 ³	(5.02-35.40)·10 ³	(1.25-17.20)·10 ³	(11.00-167.00)·10 ³
Сульфаты	(2.1-8.8)·10 ³	(0.39-1.95)·10 ³	(0.56-3.79)·10 ³	(4.57-13.6)·10 ³	(4.18-18.2)·10 ³	(38-143)·10 ³

* – ниже предела обнаружения.

Глава 4. Гидролого-гидрохимический режим водосбора

Т а б л и ц а 4.7

Диапазоны колебаний среднегодовых объемов стока химических веществ с водосборов рек Республики Карелия (тонн-год⁻¹)

Компоненты стока	Реки (расположение пунктов режимных наблюдений на рис. 2.3)				
	Кереть	Гридина	Поньгома	Кемь	Нюхча
Азот аммонийный	45.4-290.0	14.6-88.6	319.0-235.0	616.0-2853.0	71.2-326.0
Азот нитритный	н.о.*-1.43	н.о.-0.28	н.о.-0.33	3.90-28.60	н.о.-2.05
Азот нитратный	3.39-55.90	1.70-7.50	3.20-99.80	112.00-614.00	7.80-48.40
Фосфор фосфатный	н.о.-5.53	н.о.-0.91	н.о.-2.20	н.о.-67.00	н.о.-32.70
Кремнекислота	481-2116	106-374	127-535	10800-23400	340-1330
ЛЮОС (по БПК ₅)	360-3675	—**	518-1656	9800-31000	67.3-3044
HУ	12.9-188.0	н.о.-111.0	16.4-97.2	224.0-4296.0	н.о.-157.0
СПАВ	5.40-24.10	1.10-7.47	2.20-11.70	37.00-319.00	н.о.-33.10
Соединения железа общего	152.0-277.0	29.4-80.8	91.2-318.0	1492.0-6296.0	12.2-56.3
Соединения хрома общего	0.48-3.52	0.11-0.59	0.20-1.15	—	0.70-1.87
Взвешенные вещества	32.5-1907.0	27.4-402.0	84.6-683.0	3200.0-53800.0	131.0-1159.0
Сульфаты	1069-3925	462-1044	562-2081	13600-428000	1040-3382
Хлориды	852-1891	532-975	531-1504	—	1517-2747
Сумма ионов	6670-16887	1637-2908	3143-7754	—	15320-35440

* – ниже предела обнаружения;

** – прочерк означает отсутствие наблюдений.

Т а б л и ц а 4.8

Диапазоны колебаний среднегодовых объемов стока химических веществ с водосборов рек Архангельской области (тонн-год⁻¹)

Компоненты стока	Реки (расположение пунктов режимных наблюдений на рис. 4.3)				
	Онега	Сев. Двина	Мудьюга	Золотица	Мезень
Азот аммонийный	760.0-4660.0	4540.0-2090.0	2.6-27.0	41.0-317.0	620.0-5400.0
Азот нитритный	н.о.*-31.9	н.о.-572.0	н.о.-0.12	н.о.-3.4	н.о.-532.0
Азот нитратный	870.0-3450.0	5700.0-13000.0	2.3-8.2	9.6-221.0	349.0-2450.0
Фосфор фосфатный	41.4-270.0	—**	1.3-3.7	1.6-38.5	250.0-1000.0
Фосфор общий	350.0-1020.0	2900.0-6110.0	3.1-8.0	2.1-43.0	532.0-1800.0
ЛЮОС (по БПК ₅)	3925-21420	179000-273000	83-1261	296-3734	11200-96900
Фенолы	н.о.-27.70	н.о.-103.00	н.о.-1.76	н.о.-3.90	н.о.-819.00
HУ	н.о.-8316	1180-9780	н.о.-426	н.о.-1745	213-14300
СПАВ	н.о.-326	н.о.-3810	н.о.-14	н.о.-256	н.о.-509
Соединения меди	23.90-316.00	145.00-408.00	0.22-0.51	0.63-2.47	23.90-191.00
Соединения цинка	46.2-688.0	594.0-5256.0	0.68-6.96	10.3-41.3	139.0-704.0
Соединения никеля	21.8-322.0	н.о.-317.0	н.о.-1.04	н.о.-2.21	15.8-200.0
Кремнекислота	(17-49)·10 ³	(194-335)·10 ³	240-430	120-2200	(38-85)·10 ³
Взвешенные вещества	(98-602)·10 ³	(890-2552)·10 ³	420-6830	(2.55-160)·10 ³	(88-738)·10 ³
Сульфаты	(136-1098)·10 ³	(3964-6175)·10 ³	860-2590	(4.5-133)·10 ³	(100-318)·10 ³

* – ниже предела обнаружения;

** – прочерк означает отсутствие наблюдений.

Отмечена также тенденция расширения диапазона колебаний среднегодовых объемов стока химических веществ при усилении антропогенной нагрузки за счет высокой временной изменчивости содержания в воде рек многих загрязняющих веществ. Чем выше антропогенное воздействие, тем заметнее межгодовая изменчивость объемов стока химических веществ.

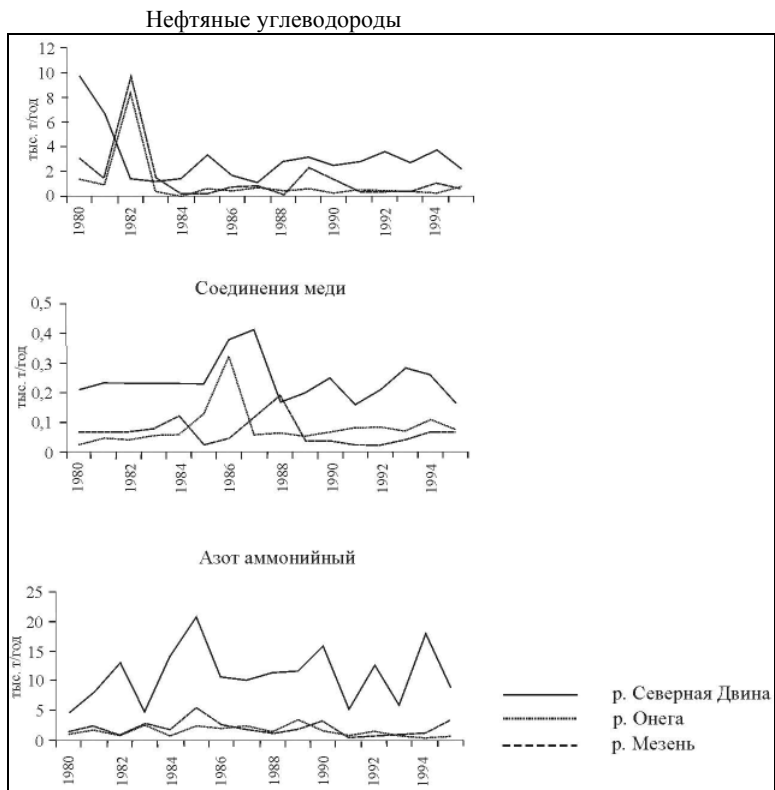


Рис. 4.6. Межгодовая изменчивость среднегодового выноса приоритетных загрязняющих веществ (тыс. т·год⁻¹), поступающих со стоком рек (Иванов, Брызгалов, 2003; Ivanov et al., in book Filatov et al., 2005)

Второй особенностью компонентного состава стока химических веществ является очевидное преобладание объемов стока азота аммонийного

над стоком азота нитратного на замыкающих створах рек Поной (отношение 3:1), Нива (отношение 5:1), Северная Двина и Мезень (отношение 2:1). Это можно объяснить не столько особенностями водосбора, сколько нарушением равновесия между внутрисистемными процессами аммонификации и нитрификации в сторону усиления процессов минерализации больших количеств органического вещества антропогенного происхождения в условиях значительного дефицита кислорода. Минимальные значения растворенного кислорода снижались до $2.20 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$.

Третьей особенностью компонентного состава следует считать заметную внутригодовую изменчивость объемов стока биогенных элементов.

Широкий диапазон колебаний среднегодовых значений внутригодовых ежемесячных объемов стока минеральных форм азота и фосфора обусловлен следующими факторами: особенностями фаз водного режима; сезонной динамикой концентрации этих ингредиентов; нарушением скоростей и направленности внутриводных процессов минерализации органических веществ.

Антропогенное воздействие нередко нарушает природную сезонную зависимость объемов химического стока от объемов стока водного. Поскольку абсолютные значения объемов химического стока определяются, главным образом, объемами водного стока, которые для исследуемых рек существенно различаются, последние непригодны для определения роли антропогенного фактора в формировании количественного и качественного состава химического стока и его пространственной неоднородности (межсистемной) (рис. 4.7). Наиболее информативным для этих целей является модуль среднего годового стока химических веществ ($\text{т}\cdot\text{км}^{-2}$ в год) (Иванов, 1976).

Результаты расчета модуля стока для приоритетных загрязняющих веществ позволяют заключить, что наиболее интенсивное поступление химических веществ с речными водами происходит по:

- азоту аммонийному со стоком рек Кемь, Золотица и Мудьюга ($0.041\text{--}0.067 \text{ т}\cdot\text{км}^{-2}$ в год);
- азоту нитратному со стоком рек Сосновка, Варзуга и Сев. Двина ($0.030\text{--}0.049 \text{ т}\cdot\text{км}^{-2}$ в год);
- кремнию со стоком рек Поной, Сосновка, Чалома, Мудьюга и Мезень ($1.00\text{--}1.40 \text{ т}\cdot\text{км}^{-2}$ в год);
- легкоокисляемым органическим веществам со стоком рек Сев. Двина, Мудьюга, Золотица, Мезень ($0.72\text{--}1.06 \text{ т}\cdot\text{км}^{-2}$ в год);
- нефтяным углеводородам со стоком рек Мудьюга и Золотица ($0.10\text{--}0.27 \text{ т}\cdot\text{км}^{-2}$ в год).

Со стоком рек Сев. Двина, Онега и Мудьюга в прибрежные районы Белого моря поступает значительное количество взвешенных веществ (10.4–14.6 т·км⁻² в год) и сульфатов (6.88–7.09 т·км⁻² в год).

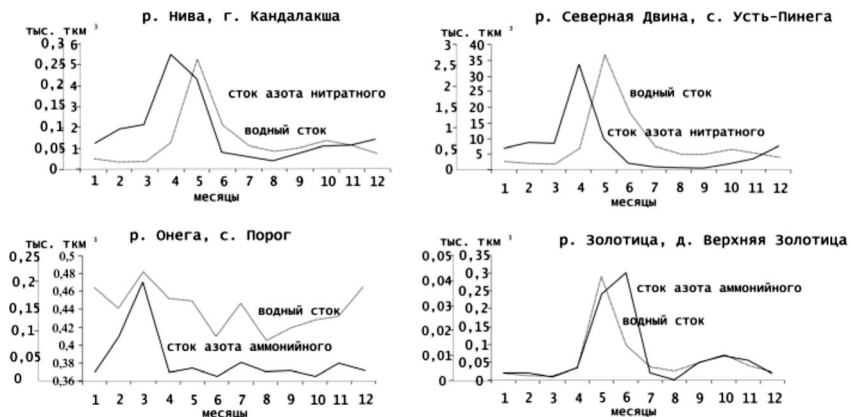


Рис. 4.5. Внутригодовые изменения средних многолетних величин водного и химического стока. (Иванов, Брызгало, 2003; Ivanov, Brizgalo in box; Filatov et al., 2005)

4.5. Антропогенные воздействия на эстуарии

Необходимость выделения устьевых областей крупных рек в самостоятельные водные объекты вызывается тем, что, в отличие от остальной части гидрографической сети, их режим во многом определяется морскими факторами, такими как уровень моря, динамика, термохалинная структура и химический состав морских вод, наличием солоноватых форм в составе биоценозов. Это позволяет выделить в устьевых областях рек отдельный вид водных экосистем, называемых эстуарными.

Эстуарные экосистемы или экосистемы солоноватых вод, несмотря на относительно небольшие акватории, занимаемые ими в зонах взаимодействия рек и морей, в настоящее время рассматриваются как самостоятельные подобно наземным, пресноводным и морским экосистемам. Именно зона смешения пресных речных и морских вод с неизбежным градиентом солености (всегда продольным и, иногда, дополнительно, поперечным) признается местом нахождения эстуарной экосистемы.

В гидрологии и геоморфологии эстуарием называется лишь один из типов устьевой области реки или ее части, а именно – приливное ворон-

кообразное устье реки. Другими типами устьевой области реки являются дельтовая и эстуарно-дельтовая. Анализ критериев, используемых для определения местоположения границ устьевых областей рек и эстуарных экосистем, показал, что только один из них является общим – степень минерализации вод, выраженная соленостью.

В результате многофакторного анализа гидролого-морфологических, гидрохимических и гидробиологических показателей устьевых природных комплексов сделан вывод, что эстуарные экосистемы занимают в устьевых областях рек Арктики зону смешения речных и морских вод с результирующей соленостью в диапазоне 0.5–26‰; сохраняют свое местоположение в течение периода, превышающего акклиматизацию донных организмов (две-три недели) и характеризуются наличием в них специфических солоноватых форм организмов (Иванов, Хлебович, 1996). Учитывая, что устьевые области рек Арктики находятся под сильным воздействием речных вод, эстуарные экосистемы, как правило, смещены к морским границам устьевых областей, а зачастую захватывают акватории приустьевого пространства моря за пределами их гидролого-морфологических границ (Иванов, 1987).

Основными факторами, определяющими изменение устьевых областей рек (природных комплексов) и эстуарных экосистем на речной границе являются речной сток (сток воды, тепла и льда, наносов, химических и биогенных веществ) и на морской границе – динамика вод и термохалинные условия. Существенное влияние на изменение облика устьевых областей оказывает хозяйственная деятельность в бассейнах рек.

В бассейне Белого моря наибольшее народнохозяйственное и экологическое значение имеют устьевые области рек Северной Двины, Онеги, Поноя, Нивы, Ковды, Кеми и Мезени. Общие гидрологические характеристики устьевых областей этих рек достаточно полно освещены в научной литературе (Залогин и др., 1969; Михайлов, 1997; Полонский и др., 1992; Georgievsky et al., 1995). Однако каких-либо обоснованных прогнозов изменения облика устьевых областей вышеназванных рек под влиянием глобальных изменений не имеется.

В 1980-90-х годах наблюдалось некоторое увеличение речного стока и изменение его внутригодового перераспределения в устьевых областях рек Белого моря, которое привело к изменению положения галоклина. При потеплении климата, как показали наши исследования, сток рек несколько уменьшается (что показано в 1990-2005 гг.), при этом заметно увеличение солености. Соответственно, смещаются границы дальности проникновения морских вод в реки и местоположение солоноватого биоценоза.

Результаты анализа многолетней режимной информации ГСН по 16 рекам бассейна Белого моря, в особенности по данным 1970-90 гг., свидетельствуют, что длительное антропогенное воздействие нарушило их естественный гидрохимический режим и способствовало формированию более высокого «антропогенно измененного» фона по азоту аммонийному, легкоокисляемым органическим веществам, фенолам, нефтяным углеводородам, соединениям меди, цинка. Наиболее высокий природный фон сформировался по азоту аммонийному в устьях исследуемых рек Республики Карелия и Архангельской области; по легкоокисляемым органическим веществам в устьях рек Северная Двина, Мезень, Кереть, Поньгома, Нюхча; по фенолам в устьях рек Мурманской области; по нефтяным углеводородам и соединениям цинка в устьях рек Архангельской области.

Тенденция накопления в водной среде загрязняющих органических и неорганических веществ привела к нарушению внутригодовой (сезонной) динамики биогенных элементов и режима растворенного в воде кислорода с тенденцией увеличения повторяемости ситуаций его дефицита в водной среде, что наиболее отчетливо проявляется в устьях рек Нива и Северная Двина.

Высокая частота встречаемости проб воды, в которых обнаружены азот нитритный (концентрации в 10–70 раз превышающие ПДК) и азот аммонийный (концентрации в 18–60 раз превышающие ПДК) может свидетельствовать о потенциальной угрозе токсического воздействия на биоценозы.

Анализ режимной гидробиологической информации ГСН показал, что следствием антропогенного воздействия на экосистемы рек баренцево-морского региона является ускорение двух основных внутрисистемных процессов (Брызгалов и др., 2000):

- антропогенного эвтрофирования за счет поступления заметного количества азот- и фосфорсодержащих биогенных элементов и легкоокисляемых органических соединений;
- экологического регресса отдельных сообществ водных организмов вплоть до их исчезновения за счет периодического накопления в водной среде загрязняющих веществ (в том числе и токсичных) в концентрациях, в десятки и сотни раз превышающих ПДК, и нарушения кислородного режима даже в поверхностных горизонтах водотоков.

Эвтрофирующий эффект антропогенного воздействия проявляется, в первую очередь, в многолетней сукцессии фитопланктонных сообществ, в характере развития которых отмечены такие изменения, как:

- расширение списка массовых видов;
- смена в группе диатомовых олиготрофных малопродуктивных видов на высокопродуктивные виды эвтрофных водоемов;
- периодический выход в группе диатомовых на доминирующее положение водоросли *Fragillaria crotonensis*, которая может активно вегетировать не только в олиготрофных условиях, но и при антропогенном эвтрофировании;
- массовое развитие в летне-осенний период в группе сине-зеленых не только *Aphanizomenon flos-aquae*, которая обычно присутствует в фитопланктоне, но и видов из рода *Anabaena*, *Oscillatoria* и *Microcystis*.

Токсичный эффект антропогенного воздействия, вызывающий элемент экологического регресса отдельных сообществ наиболее отчетливо стал проявляться в:

- фитопланктонных сообществах, для которых характерно не только снижение общей численности, но и нарушение структурной организации за счет выхода на доминирующее положение α -сапробных видов из родов *Steppanodiscus* и *Syndra*;
- зообентосных сообществах, природные модификации которых сопровождались не столько низким уровнем их развития, когда численность не превышала 0.30 тыс. экз. \cdot м⁻², сколько усилением развития группы олигохет и выхода их на доминирующее положение с относительной численностью 60–100%.

Результаты анализа данных многолетних исследований рек бассейна Белого моря по гидрохимическим и гидробиологическим показателям позволяют сделать вывод о том, что помимо поступления загрязняющих веществ (от трансграничных переносов и техногенных воздействий предприятий химической, газовой, нефтеперерабатывающей, целлюлозно-бумажной, горнодобывающей и угольной промышленности, цветной и черной металлургии, энергетики, электрификации, коммунального и сельского хозяйства) существенное влияние на устьевые области рек оказывают антропогенное эвтрофирование и экологический регресс, переводящие их экосистемы в новое трофическое состояние (Брызгалов и др., 2000).

Детальное изучение изменчивости объемов и состава речного стока химических веществ в прибрежных районах Белого моря показало, что аномально высокие объемы стока периодически возможны для рек Поной, Нива, Онега, Северная Двина и Мезень по азоту аммонийному и нефтяным углеводородам, а для рек Сосновка, Чапома, Варзуга, Умба, Нива, Онега, Северная Двина, Мудьюга и Золотица – по легкоокисляемым органическим веществам.

Основной особенностью компонентного состава стока химических веществ является очевидное преобладание объемов стока азота аммонийного над стоком азота нитратного и нарушение связи между внутригодовым распределением водного стока и объемами стока биогенных элементов.

Сравнительная оценка интенсивности выноса веществ (модуль химического стока) с водосборов показала, что следствием антропогенного воздействия является высокая, качественная и количественная межсистемная неоднородность компонентного состава речного притока в Белое море. Следует отметить, что при дальнейшем увеличении стока загрязняющих веществ будет наблюдаться повышение степени загрязнения донных отложений в зоне галоклина и, как следствие, накопление загрязняющих веществ в планктонных и бентосных организмах сообществ солоноватых вод.

Глава 5

КАЧЕСТВО ВОД МАЛЫХ РЕК ВОДОСБОРА

5.1. Гидрохимия

Введение

В этом разделе подробно рассматривается гидрохимия и гидробиология малых рек. Глава в определенной степени дополняет предыдущую.

Белое море следует рассматривать как сложную эстуарную иерархическую систему, в которой впадающие в море реки играют важнейшую роль (Maksimova, 2003; Pantuulin, 2003). Водный и химический сток рек имеет большое значение в формировании гидрохимического режима Белого моря (Максимова, 1991а, б), особенно, многочисленных губ, в вершины которых, как правило, впадают реки (Максимова, Чугайнова, 2001; 2006). К сожалению, исследованиям малых рек уделялось мало внимания как научными организациями, так и мониторинговой службой Роскомгидромета – Росгидромета, в сфере внимания которых оказывались в основном крупные и средние реки. До недавнего времени мало исследовались многочисленные губы, которые имеют немаловажное рыбохозяйственное значение, в том числе и для развития мариккультуры. В научном отношении изучение малых рек позволило установить основные природные факторы формирования химического состава речных вод Северной климатической зоны бассейна Белого моря.

Этот раздел монографии основан на полученных автором материалах комплексных исследований 44 малых рек, (а также средних – Выг, Кемь и крупных –интразональных – Онега, Северная Двина), впадающих в Белое море на территории Терского, Кандалакшского, Карельского, Поморского, Лямецкого (Онежского) и Летнего побережий Белого моря, общей протяженностью береговой линии более 1500 км (см. рис. 1.1 наст. книги). На рис. 5.1 показаны основные реки водосбора Белого моря.

Комплексные исследования включили обширный спектр определяемых параметров – ионного состава, газового режима, биогенных элементов (минеральных и органических форм соединений), органического вещества, цветности, рН и физических факторов. Исследования проводились в начале 1960-х годов (1961–1962) на базе Отдела водных проблем

Карельского филиала Академии наук по инициативе, под руководством и непосредственном участии автора. Этот период, как мы отмечали, является фоновым, когда уровень загрязнения был еще относительно не велик, и сохранялось высокое качество вод рек.



Рис. 5.1. Карта рек водосбора Белого моря. 1 – место расположения станций отбора проб. Цифрами показаны значения среднегодового стока рек

Экспедиционные исследования рек проводились в период наиболее устойчивого, сформировавшегося к середине июля, летнего гидрохимического режима и меженного стока рек (во второй половине июля –

первой половине августа). Август характеризуется и летним устойчивым коэффициентом фитопланктона ($P/C_{фит}$), и средней первичной продуктивностью, близкой к средней за вегетационный период (Федоров, Корсак, Бобров, 1974; Федоров, Бобров, 1977). Для рек, представляющих различные типы, выполнялись сезонные наблюдения.

Изучение химизма малых водотоков позволяет решить ряд вопросов формирования химического состава вод, поскольку чем меньше водоток, тем полнее он отображает условия первичного формирования речных вод, присущие данной местности (климатические, геологические, почвенные – водосборного бассейна) и малые реки быстрее, чем крупные, отражают антропогенное воздействие.

Интерпретация материалов исследований выполнена на основе анализа состояния водосборного бассейна рек – геологической структуры, рельефа, почвенного покрова, озерности, заболоченности площади водосборного бассейна, микроклиматических условий, а также особенностей эолового переноса химических компонентов. Исследования малых рек, проведенные нами в меженный период близких по водности 1961 и 1962 гг., а также сезонные наблюдения по типовым рекам (Максимова, 1982, 1983), позволили выявить генетические связи и установить закономерности формирования их химического состава в зависимости от природных факторов. Большинство исследованных рек сравнительно короткие – средняя длина менее 70 км (см. табл. 5.1).

Т а б л и ц а 5 . 1 .

Средняя длина малых рек, впадающих в Белое море

Название побережий	Средняя длина рек, км	Количество исследованных рек
Терское	80	4
Кандалакшское	50	4
Карельское	70	15
Поморское	70	15
Лямецкое	40	6
Средняя длина рек	65	44

Примечание: при вычислении средней длины исключены крупные реки (Сев. Двина, Онега, Выг, Кемь).

Выполненные исследования позволяют установить природные особенности формирования химического состава воды рек, питающих Белое море, в период, еще не подвергшийся интенсивному антропогенному воздействию. Интерпретация материалов в сравнительном аспекте для гид-

рохимических показателей воды 44 малых рек с учетом особенностей их водосборного бассейна позволила выявить природные факторы, определяющие их гидрохимический состав.

Большинство выполненных исследований посвящено, в основном, рекам Карельского и Поморского побережий Белого моря и Кольского п-ва. При этом следует отметить, что изучение ряда малых рек, впадающих в Белое море, выполненное в конце 1980-х – 1990-х годах Институтом водных проблем Севера КарНЦ РАН (Сабылина, Селиванова, 1985; Феоктистов, 2004), показало: химический состав воды этих рек за 40-50 лет мало изменился. Формирование их химического состава по-прежнему определяется природными условиями водосборной территории, поскольку их водосборные бассейны в силу природно-социально-экономических условий практически не подверглись антропогенному воздействию. Для крупных рек, как Северная Двина, Онега, а также средних – Кемь, Выг – антропогенное воздействие на химический состав вод достаточно сильно выражено (Сабылина, Селиванова, 1989; Феоктистов и др., 2004).

Полный химический анализ воды подавляющего большинства малых рек был произведен нами впервые в 1961-1962 гг. и, к сожалению, с тех пор подобные работы не повторялись. В настоящем разделе книги впервые публикуются фактические данные по гидрохимии 44 малых рек, которые могут служить справочным материалом для решения ряда проблем (оценки антропогенной нагрузки на водосбор, рыбохозяйственных вопросов, водоснабжения и пр.), а в дальнейшем позволят проследить изменения гидрохимического состава относительно фонового периода.

Большинство исследований в основном посвящены проблеме трансформации речных вод, их смешения с морскими (Захарова, Савенко, 1993; Пантюлин, Повалишникова, Захарова и др., 2005; Савенко, 2001; Долотов и др., 2005; Долотов и др., 2006), а также стоку химических веществ в Белое море (Сабылина, Селиванова, 1985; Лозовик и др., 2005; Феоктистов, 2004), химическому составу некоторых притоков Белого моря по материалам мониторинга 1992–1997 гг. посвящены работы ИВПС КарНЦ РАН (см. Лозовик и др., 1998). Практически все эти исследования сконцентрированы в пределах Карельского и Поморского побережий. Интересная работа П.А. Лозовика с соавторами (2006), представляющая исследования процессов формирования химического состава поверхностных вод Карелии, посвящена озерам.

Химические анализы проб воды рек производились общепринятыми в гидрохимической практике методами. Хлор-ионы определялись наиболее точным, в условиях низкой минерализации, меркуриметрическим

методом. Сульфатные ионы определялись объемным методом с дитизином. Анализы, как правило, производились в экспедиционных условиях в свежееотобранных пробах.

Краткая климатическая, гидрографическая, гидрогеологическая и почвенно-геологическая характеристика бассейна Белого моря

Поверхностные воды водосбора являются неотъемлемой частью географического ландшафта, с которым генетически связан их состав. Они находятся в тесной связи с общим комплексом физико-географических условий. Территория бассейна Белого моря расположена в Северной климатической зоне, для которой характерен суровый климат. Несмотря на умеренное выпадение осадков (около 400 мм), в условиях длинной зимы, короткого прохладного лета и слабого испарения, этих осадков достаточно для избыточного увлажнения. Климатические условия Европейского Севера благоприятствуют скоплению маломинерализованных поверхностных вод. Наряду с этой общей чертой, по геологическому строению, рельефу и характеру гидрографической сети территорию бассейна Белого моря можно подразделить на два своеобразных района: 1) Кольско-Карельский (Терское, Кандалакшское, Карельское и северо-западная часть Поморского побережья) и 2) Юго-Восточный (юго-восточная часть Поморского, Лямецкое, Летнее, Зимнее побережья).

Геологическое строение водосборного бассейна

Кольско-Карельский район занимает восточную часть Балтийского кристаллического щита, сложенного сильно дислоцированными архейскими и протерозойскими метаморфическими и изверженными породами. Рельеф представлен сглаженными холмами и горами, а также широкими долинами, распространены моренные гряды, друмлины, камы, озы. Ледниковые отложения не достигают значительной мощности, почти повсюду можно встретить выходы древних пород. Прибрежные районы покрыты местами доледниковыми отложениями (Рихтер, 1946; Лебедев, 1958; Марченко, 1962; Геология СССР, 1958, 1960; Кузнецов, 1960; Геология Карелии, 1987; Литосфера и гидросфера Европейского Севера России, 2001; Грунты Карелии, 2002).

В Юго-Восточном районе бассейна Белого моря кристаллический фундамент глубоко погружен и скрыт под мощной толщей большей частью горизонтально залегающих осадочных палеозойских и мезозойских

отложений. Этот район является северной окраиной Русской платформы. По общему характеру рельефа он представляет покатую к Северному Ледовитому океану волнистую равнину, расчлененную широкими низинами, по которым протекают главнейшие реки – Онега, Северная Двина, Мезень. Мощность ледниковых отложений здесь значительна. Хорошо выраженные моренные холмы и гряды образуют ряд цепей. Глинистая морена, покрывающая Онего-Двинский водораздел, содержит много карбоната кальция. На плоских заболоченных водораздельных плато близко к поверхности подходят палеозойские породы, низины выполнены мощной толщей четвертичных отложений.

Заболоченность водосбра. Территория бассейна Белого моря изобилует болотами. Для Карелии площадь болот составляет 30%, а в наиболее заболоченной Приморской низменности нередко превышает площадь суходолов (50–70%). На Кольском полуострове наиболее крупные болотные массивы расположены в восточной части, имеющей более равнинный рельеф. В западной части болота, заполняющие межгорные понижения, встречаются часто, но не занимают больших площадей. Сильной заболоченностью отличается также Юго-Восточный район, особенно северная его часть.

Почвы водосборного бассейна

Почвы Кольско-Карельского района относятся, главным образом, к подзолистым и болотным (включая переходные типы). Значительная часть южной половины Кольского полуострова покрыта болотными почвами в сочетании с подзолистыми и песчаными (Рихтер, 1946, Марченко, 1962 и др.). Для всей восточной приморской полосы Карелии в основном характерно господство торфяников и преобладание полуболотных почв на глине (местами торфяники занимают до 80% площади). Зона подзолистых почв Карелии расположена в некотором отдалении от моря (в основном на расстоянии 50 км и более). Необходимо особо отметить заболоченные почвы беломорских террас, которые простираются в восточной части Карелии 30–50-километровой полосой вдоль побережья Белого моря. В составе ионно-солевого комплекса этих почв хлориды значительно преобладают над другими ионами, что объясняется влиянием морских засоленных глин, выстилающих почти все пространство беломорских террас (Марченко, 1962). Глины могут быть скрыты торфом или же выступать на поверхность, главным образом в районе рек, ручьев и морских бережий.

Почвенный покров Юго-Восточного района отличается значительным разнообразием. Северная его часть занята, главным образом, заболоченными почвами. Южнее этой зоны получили распространение, в основном подзолистые, местами подзолистые заболоченные почвы. Почвы приморской полосы этой зоны также находятся под влиянием морских глин, выстилающих террасы Лямецкого и юго-восточной части Поморского побережий, и отличаются повышенным содержанием хлора.

В Кольско-Карельском районе – большая раздробленность рельефа, близость к поверхности водонепроницаемых кристаллических пород при избыточном увлажнении обуславливает обилие поверхностных вод в виде озер, рек и болот. Реки здесь в основном небольшие, характерной особенностью их является ступенчатый продольный профиль и большая насыщенность озерами. Волнистая равнина Юго-Восточной части бассейна Белого моря, кристаллический фундамент которой глубоко погружен под мощной толщей осадочных пород, имеет более слабую гидрографическую сеть. Озера незначительны по размерам и почти не сказываются на режиме рек (Давыдов, 1951).

Питание рек бассейна Белого моря осуществляется в основном за счет талых вод, заметную роль играют также дожди. Доля питания рек подземными водами для Кольско-Карельского и Юго-Восточного районов, в силу разнообразия в геологическом строении и рельефе, различна.

Гидрогеологические условия

На территории Кольско-Карельского района избыточное увлажнение и близость к поверхности кристаллического фундамента способствует формированию грунтовых вод неглубокого залегания и переходу их в поверхностные и болотные. Водоносность пород незначительна и обусловлена их трещиноватостью. Мощных горизонтов грунтовых вод, которые обеспечивали бы питание рекам, здесь нет.

На Кольском п-ове бассейны трещинных, трещинно-жильных и напорных вод приурочены к породам кристаллического фундамента, поровые, пластово-поровые воды – к четвертичным осадкам. Наиболее значительные скопления грунтовых вод связаны с аллювиальными отложениями песчаного состава. Залегающие под ними или обнажающиеся на поверхности кристаллические породы обычно обводнены слабо из-за небольшой зоны экзогенной трещиноватости, воды – пресные и ультрапресные (Литосфера и гидросфера европейского Севера России, 2001).

Для большей части территории первый от поверхности водоносный горизонт залегает иногда сразу под торфяниками. Водоупорным ложем для него служат суглинки и глины морских микулинских и современных озерно-аллювиальных отложений.

Воды *СТС* относятся к верхней гидродинамической зоне свободного водообмена. Питание их осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, таяния снежного покрова. Разгрузка происходит в местные базисы эрозии – озера, реки, ручьи. По степени минерализации они относятся преимущественно к пресным водам с минерализацией 0.02–0.05 г·л⁻¹ (Литосфера и гидросфера европейского Севера России, 2001).

Как показали результаты гидрохимических исследований, на разных участках Карело-Кольского региона выявленный комплекс компонентов химического состава воды варьирует в зависимости от конкретных ландшафтно-геохимических особенностей каждого конкретного района.

С целью выяснения характера взаимодействия системы вода-грунт были поставлены эксперименты по изучению водно-растворимой, сорбированной и других форм нахождения элементов в горных породах при помощи анализа вытяжек разного состава из водовмещающих пород региона. Данные, полученные в экспериментальных условиях, показали полное соответствие результатам изучения химического состава природных вод в подземных горных выработках (Нежданова и др., 1978).

Климат гумидной зоны с преобладанием осадков над испарением, широкое развитие кристаллических, слабоактивных в химическом отношении горных пород, наличие хорошо промытых четвертичных отложений определяют весьма низкую минерализацию всех вод Карело-Кольского региона. Природные воды находятся в начальной стадии формирования своего химического состава. Общая сумма водно-растворимых солей чаще всего составляет от 20 до 40, редко до 50 мг·л⁻¹. По химическому составу преобладают воды гидрокарбонатные натриево-кальциевые, кальциево-натриевые. Общая жесткость составляет десятые доли миллиграмм-эквивалента на литр. Величины рН в интервале от 4 до 8 (чаще от 5.5 до 6.8) (Нежданова и др., 1978).

На побережье Белого моря наиболее широко распространены пресные гидрокарбонатно-кальциевые трещинные воды зоны выветривания и трещинно-жильные воды зон тектонических разломов, лишь местами встречаются хлоридные воды, образовавшиеся в результате эолового переноса морской соли. Местами на глубинах 70–150 м выявлены солоноватые и соленые воды, являющиеся реликтами Иольдиева моря, соединявшего Балтийское и Белое моря (Литосфера и гидросфера европейского Севера

России, 2001). Г.С. Бородулина с соавторами (2006) отмечают, что на территории Карелии в анионном составе подземных вод преобладают гидрокарбонаты, но с ростом минерализации возрастает роль хлора. На побережье Белого моря это объясняется морским влиянием.

Подземный сток с Балтийского щита направлен в основном к побережьям Баренцева и Белого морей (Каменский и др., 1959, Гидрогеологическая карта СССР, 1961, Богомолов и др., 1962; Гидрогеология СССР. Архангельская и Вологодская область. 1969).

Глубина зоны подземного стока в поверхностные водоотводы и водоемы Кольско-Карельского района небольшая, хотя глубина расчленения горной части территории значительна. Грунтовое питание рек в горных расчлененных районах или вовсе отсутствует, или носит характер верховодки. В общем водном балансе поверхностных водоотводов и водоемов Кольско-Карельского района подземное питание имеет подчиненное значение. Болотные воды, которые занимают промежуточное положение между поверхностными и грунтовыми водами, в зимнюю межень для многих рек являются основными источниками питания.

В Юго-Восточном районе бассейна Белого моря наряду с ведущей ролью снегового и дождевого питания, большое значение приобретает и подземное, так как на этой территории происходит разгрузка Северо-Двинского артезианского бассейна, его водоносные комплексы отличаются значительной водообильностью. Для них характерны порово-пластовые, трещинно-пластовые и трещинно-карстово-пластовые воды. В верхних слоях небольшой мощности (50–100 м) преобладают пресные, преимущественно гидрокарбонатные воды, глубже (примерно до 200 м) – зона солоноватых, сульфатных, кальциевых вод. Ниже залегают соленые хлоридные воды, сменяющиеся рассолами, степень минерализации которых обычно не превышает 270 г/л. Рассолы распространены почти по всей территории бассейна, вплоть до обрамляющего его с запада Балтийского щита. Подземный сток из Северо-Двинского артезианского бассейна направлен к Белому морю, о чем свидетельствует наличие многочисленных соленых и пресных источников на морском побережье и в долинах рек (Каменский и др., 1959, Гидрогеологическая карта..., 1961; Богомолов и др., 1962; Гидрогеология СССР, 1969; Литосфера и гидросфера европейского Севера России, 2001)

На севере, в условиях превышения осадков над испарением, основным фактором формирования химического состава природных вод становятся процессы растворения химических соединений горных пород, грунтов и почв, слагающих ложе и бассейны рек. В местностях, где отсутствуют

осадочные породы, а поверхность земли сформирована гранитами и гнейсами, еще большее значение приобретает почвенный покров площади водосбора. Обычно хорошо промытые болотные и подзолистые почвы севера мало способствуют повышению минерализации. Воды небольших рек формируются в основном как из болотной воды и воды, стекающей по поверхности склонов, так и из почвенногрунтовых вод (Воронков, 1951). Поэтому химический состав воды рек в условиях севера зависит, главным образом, от характера горных пород и почв, слагающих ложе и бассейны рек, и степени заболоченности водосбора. А.И. Дзенс-Литовский (1959) считает основным фактором, определяющим зональность природных вод в северных районах, геологический фактор, на который и будет обращено основное внимание.

Закономерности формирования химического состава воды рек

Несмотря на общую низкую минерализацию, воды рек, впадающих в Белое море, по химическому составу весьма неоднородны. Колебания в степени минерализации и в соотношении ионов, количестве и качестве органического вещества, содержании биогенных элементов и газовом режиме обусловлены составом горных пород и почв, слагающих ложе и водосборные бассейны рек, обилием и характером болот, озерностью и т. д.

Произведенное нами сопоставление степени и характера минерализации и солевого состава воды малых рек бассейна Белого моря с геологическими характеристиками их водосборных бассейнов выявило зависимость химизма воды рек от состава горных пород, слагающих территории их бассейнов.

Известно, что почвенно-геологические и климатические условия Европейского севера, в том числе и бассейна Белого моря, способствуют формированию маломинерализованных поверхностных вод (менее $100 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$), содержащих большое количество органических веществ гумусового происхождения, вымываемых из торфяников, лесной подстилки и поверхностных слоев почв (Воронков, 1954).

Минерализация исследованных нами рек, впадающих в Белое море, составляет в среднем около 30 мг/л , изменяясь в пределах от 10 до $60 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (табл. 5.2.), при среднем содержании органического вещества около $40 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ и цветности – 200° (табл. 5.3, рис. 5.2). Минерализация интразональных рек – Онеги, Северной Двины и Мезени – более высокая и превышает $100 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$.

Таблица 5.2.

Ионный состав воды рек, впадающих в Белое море (1961–1962 гг.)

Название рек	Дата отбора пробы	Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺ + K ⁺		HCO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		Cl ⁻		Fe ³⁺		Сумма ионов, мг/л
		мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	мг-экв/л	мг/л	
Реки Терского побережья																
1962																
Чапона	11.VIII	0.339	6.79	0.219	2.66	0.221	5.52	0.618	37.71	0.050	2.40	0.111	3.93	0.038	0.70	60.35
Чавальга	10.VIII	0.098	1.96	0.032	1.00	0.121	3.02	0.180	11.02	0.024	1.15	0.097	3.44	0.028	0.52	22.58
Варзуга	12.VIII	0.256	5.13	0.137	1.66	0.109	2.72	0.393	23.98	0.030	1.44	0.079	2.80	0.052	0.96	39.56
Оленяца	12.VIII	0.151	3.02	0.117	1.42	0.097	2.42	0.248	15.13	0.037	1.78	0.080	2.84	0.054	1.20	28.90
Реки Кандакского побережья																
1962																
Умба	3.VIII	0.142	2.84	0.103	1.25	0.097	2.42	0.260	15.90	0.037	1.78	0.045	1.59	0.003	0.05	25.78
Шомба	9.VIII	0.160	3.20	0.119	1.45	0.061	1.52	0.230	14.06	0.063	3.02	0.047	1.66	0.008	0.16	25.21
Колвица	8.VIII	0.170	3.41	0.090	1.03	0.065	1.62	0.236	14.37	0.054	2.612	0.035	1.24	нет	нет	24.35
Лувенга	8.VIII	0.191	3.83	0.050	0.61	0.050	1.25	0.213	13.00	0.046	2.24	0.032	1.13	нет	нет	22.06
Реки Карельского побережья																
1961																
Ковда	7.VIII	0.188	3.77	0.126	1.53	0.034	0.80	0.261	15.93	0.0519	2.83	0.028	0.99	0.005	0.01	25.85
Черная	4.VIII	0.169	3.39	0.035	1.03	0.073	1.82	0.160	9.76	0.075	3.60	0.092	3.26	0.025	0.47	23.76
Нильма	4.VIII	0.166	3.34	0.104	1.26	0.094	2.35	0.224	13.67	0.076	3.65	0.064	2.27	0.002	0.04	26.54
Пулонга	1.VIII	0.143	2.86	0.031	0.98	0.113	2.82	0.202	12.33	0.057	2.74	0.078	2.76	нет	нет	24.49
Кереть	9.VII	0.098	1.95	0.076	0.92	0.053	1.32	0.134	8.18	0.046	2.21	0.047	1.66	0.006	0.12	16.47
Сопрека	31.VII	0.110	2.20	0.038	0.83	0.026	0.66	0.064	3.90	0.047	2.26	0.093	3.30	0.011	0.20	13.62
Великая	29.VII	0.259	5.19	0.183	2.22	—	—	—	не определяли	—	—	0.131	4.64	0.033	0.62	не
Гридина	29.VII	0.083	1.66	0.056	0.68	0.098	2.45	0.091	5.55	0.063	3.02	0.083	2.94	0.010	0.18	16.64
Кятка	29.VII	0.121	2.42	0.079	0.96	—	—	0.048	2.93	0.057	2.74	0.089	3.15	0.052	0.97	14.05
Калга	27.VII	0.090	1.80	0.051	0.62	0.074	1.85	0.102	6.22	0.050	2.40	0.063	2.23	0.016	0.29	15.67
Ундукса	26.VII	0.196	3.93	0.064	0.78	—	—	0.1064	3.30	0.064	3.07	0.093	3.30	0.141	2.53	19.40
Воньга	26.VII	0.094	1.88	0.060	0.73	0.086	2.15	0.090	5.86	0.054	2.59	0.090	3.19	0.034	0.64	17.62

Названия рек	Дата отбора пробы	Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺ +K ⁺		HCO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		Cl ⁻		Fe ³⁺		Сумма ионов, ММг/л
		Мг-экв/л	Мг/л	Мг-экв/л	Мг/л	Мг-экв/л	Мг/л	Мг-экв/л	Мг/л	Мг-экв/л	Мг/л	Мг-экв/л	Мг/л	Мг-экв/л	Мг/л	
Кузема	24. VII	0.077	1.54	0.047	0.57	0.077	1.92	0.080	4.88	0.047	2.26	0.074	2.62	0.032	0.60	14.94
Поньгома	24. VII	0.082	1.64	0.053	0.64	0.088	2.20	0.096	5.86	0.058	2.78	0.039	2.44	0.027	0.50	16.62
Кемь	22. VII	0.128	2.56	0.053	0.77	0.033	0.082	0.160	9.76	0.035	1.68	0.029	1.03	0.011	0.21	17.02
Реки Поморского побережья																
1962																
Мягрека	10. VII	0.081	1.62	0.408	4.96	—	—	0.054	3.30	0.045	2.16	0.089	3.15	0.073	1.36	17.79
Шуя	16. VII	0.132	2.65	0.210	2.55	—	—	0.119	7.26	0.022	1.06	0.063	2.23	0.054	1.00	17.66
Выг	13. VII	0.136	2.72	0.122	1.48	0.016	0.40	0.166	10.16	0.056	2.66	0.052	1.84	0.021	0.40	20.02
Кузрека	17. VII	0.060	1.20	0.210	2.55	—	—	0.052	3.14	0.048	2.30	0.063	2.23	0.049	0.92	13.18
Вирма	17. VII	0.088	1.76	0.222	2.70	—	—	0.076	4.67	0.029	1.39	0.054	1.91	0.049	0.92	14.19
Сума	19. VII	0.135	2.70	0.224	2.72	—	—	0.124	7.57	0.050	2.40	0.061	2.16	0.014	0.26	18.05
Колежма	19. VII	0.133	2.66	0.209	2.54	—	—	0.104	6.34	0.048	2.30	0.035	2.30	0.054	1.00	18.05
Руйга	20. VII	0.106	2.13	0.468	5.69	—	—	0.096	5.58	0.046	2.21	0.065	2.30	0.039	1.28	20.35
Нюхча	20. VII	0.112	2.24	0.220	2.68	—	—	0.102	6.20	0.047	2.26	0.063	2.23	0.048	0.89	17.31
Унежма	20. VII	0.106	2.12	0.233	2.87	—	—	0.092	5.58	0.036	1.73	0.077	2.73	0.063	1.18	17.28
Куше-река	22. VII	0.120	2.40	0.266	3.23	—	—	0.154	9.40	0.048	2.30	0.079	2.80	0.056	1.04	22.12
Малолуйка	23. VII	0.153	3.07	0.253	3.08	—	—	0.192	23.37	0.039	1.87	0.067	2.37	0.057	1.05	35.78
Нименга	23. VII	0.193	3.88	0.274	3.33	—	—	0.242	14.74	0.052	2.50	0.107	3.79	0.058	1.08	30.30
Онега	25. VII	0.938	18.80	0.574	6.98	—	—	1.034	63.10	0.266	12.77	0.061	2.16	0.018	0.33	104.44
Реки Ляницкого побережья																
1962																
Тамиза	28. VII	0.300	6.01	0.282	3.43	0.120	3.00	0.544	36.20	0.070	3.38	0.088	3.12	0.042	0.78	56.63
Кянда	28. VII	0.223	4.47	0.157	1.91	0.156	3.90	0.239	14.58	0.187	8.98	0.110	3.90	0.024	0.45	38.60
Нижма	28. VII	0.230	4.61	0.172	2.09	0.252	6.30	0.284	17.33	0.49	2.36	0.321	11.38	0.012	0.22	44.48
Веига	27. VII	0.221	4.43	0.207	2.52	0.244	6.10	0.529	32.28	0.027	1.30	0.116	4.11	0.050	0.94	53.54
Лямца	30. VII	0.224	4.49	0.190	2.31	0.233	5.58	0.508	31.00	0.038	1.82	0.091	3.22	0.036	0.68	49.72
Золотица		0.093	1.86	0.121	1.47	0.166	4.15	0.138	8.42	0.081	3.89	0.161	5.70	0.043	0.80	27.02

Таблица 5.3

Органическое вещество, биогенные элементы и газовые условия воды рек, впадающих в Белое море (1961–1962 гг.)

Название рек	Дата отбора проб	t°С воды	pH	O ₂		CO ₂ мг/л	Цветность/градусов	Окисляемость		Органическое вещество мг/л	Минеральный азот (NH ₄) мг N/л	Органический азот мг N/л	Фосфорный мг/л	Органический углерод, мг/л	Si мг/л	Fe суммарное, мг/л	Жесткость, мг/л
				мг/л	% насыщения			перманганатная	бихроматная								
Реки Терского побережья																	
1962																	
Чапма	11.VIII	12.5	7.00	9.73	90	2.4	110	12.6	29.6	23.3	0.11	—	0.004	11.1	3.2	0.78	0.544
Чапанга	10.VIII	14.0	6.70	9.28	88	1.9	110	12.1	28.5	22.5	0.11	—	0.004	10.7	1.4	0.60	0.180
Варзуга	12.VIII	14.9	7.00	9.53	92	2.0	110	13.2	31.3	24.6	0.09	—	0.004	11.7	2.7	1.04	0.393
Оленяна	12.VIII	15.3	6.85	9.17	89	2.3	240	26.1	49.5	39.1	0.14	—	0.041	18.6	4.3	1.22	0.268
Реки Кандалакшского побережья																	
1962																	
Умба	3.VIII	13.4	6.70	9.64	90	2.2	31	7.1	18.3	14.5	0.08	—	0.003	6.9	1.4	0.08	0.245
Шомба	9.VIII	14.0	6.80	9.55	91	2.0	64	12.3	28.4	22.3	0.12	—	0.004	10.6	2.3	0.24	0.279
Ковлица	8.VIII	13.1	7.00	10.31	96	1.6	33	5.0	14.2	11.1	0.08	—	0.003	5.3	2.5	следы	0.260
Дувенга	8.VIII	14.1	6.80	10.10	96	1.6	32	3.6	10.1	8.0	0.07	—	0.003	3.8	3.3	следы	0.241
Реки Карельского побережья																	
Ковла	7.VIII	10.6	6.65	9.71	86	3.6	26	7.2	17.2	13.4	0.03	0.45	0.002	6.4	2.3	0.03	0.314
Черная	4.VIII	17.6	6.60	9.06	92	2.9	140	23.3	36.7	29.0	0.19	0.65	0.002	13.8	2.0	0.60	0.254
Нильма	4.VIII	16.9	6.80	9.59	96	1.2	29	7.7	20.1	15.8	0.07	0.48	0.002	7.5	1.8	0.06	0.270
Пулонга	1.VIII	17.6	7.00	9.29	95	1.4	44	10.6	21.9	17.2	0.04	0.51	0.003	8.2	1.1	0.07	0.224
Кереть	9.VIII	17.6	6.80	9.08	92	1.7	49	11.6	23.0	18.1	0.05	0.43	0.002	8.6	1.3	0.12	0.173
Сонрека	31.VII	17.4	6.65	8.91	90	2.0	85	15.9	33.8	26.7	0.06	0.84	0.001	12.7	2.4	0.28	0.178
Великая	29.VII	15.8	6.10	7.78	92	7.6	330	49.0	—	≈60	0.20	—	0.002	—	3.9	1.02	0.442
Гридина	29.VII	17.2	6.75	9.02	92	2.1	110	19.5	35.5	27.9	0.18	0.39	0.002	13.3	1.6	0.26	0.139
Кятка	29.VII	18.1	6.15	8.25	85	5.7	280	48.0	75.4	59.4	0.24	0.49	0.003	28.3	2.6	1.17	0.200
Калга	27.VII	19.6	6.45	8.63	90	2.4	75	14.7	27.7	21.8	0.18	0.47	0.003	10.4	1.3	0.37	0.141
Сиг	27.VII	21.2	6.15	7.78	85	6.0	390	52.9	93.2	73.5	0.48	0.68	0.006	35.0	3.5	2.15	0.502
Хлебная	27.VII	19.4	5.28	6.68	70	12.5	810	79.6	—	≈90	0.44	—	0.008	—	—	4.74	0.459
Ундукса	26.VII	18.9	5.18	7.08	74	10.3	550	67.4	107.0	84.2	0.48	0.71	0.004	40.1	4.2	2.67	0.260
Воньга	26.VII	19.2	6.40	8.50	89	3.2	150	23.7	38.8	30.7	0.24	0.50	0.002	14.6	1.6	0.72	0.154
Кузема	24.VII	18.1	6.40	8.84	91	2.4	110	24.6	—	≈40	0.20	0.49	0.006	—	2.1	0.75	0.124

Продолжение

Название рек	Дата отбора проб	t°С воды	рН	O ₂		CO ₂ мг/л	Цветность гра-дусов	Окисляемость мг О/л		Органическое вещество мг/л	Минеральный азот (NH ₄) мг/л	Органический азот мг/л	Фосфор-минеральный мг/л	Органический угле-род, мг/л	Si мг/л	Fe сум-мар-нос, мг/л	Жест-кость, мг/л
				мг/л	% насы-щения			пер-манга-натная	бихро-матная								
Поньлома	24.VII	17.7	6.40	8.75	89	2.4	130	26.1	54.6	43	0.20	0.42	0.006	20.5	2.2	0.63	0.135
Летняя	29.VII	19.3	6.10	6.89	72	6.8	430	68.1	112.6	88.6	0.27	1.03	0.013	42.2	4.7	2.79	1.479
Кемь	22.VII	20.8	6.60	8.84	92	2.9	42	14.0	26.1	20.6	0.12	0.73	0.009	9.8	1.7	0.28	0.191
Реки Поморского побережья																	
1962																	
Мягровка	10.VII	14.8	5.30	7.65	74	11.4	450	56.3	93.9	73.9	0.48	—	0.019	35.2	3.2	1.40	0.489
Шуя	16.VII	11.9	5.90	9.06	32	7.0	230	33.2	65.5	51.7	0.39	—	0.012	24.6	2.3	1.04	0.342
Выг	13.VII	13.6	6.60	9.79	92	3.6	90	18.3	40.1	31.5	0.22	—	0.008	15.0	1.3	0.40	0.258
Кузрезка	17.VII	11.3	5.20	8.75	78	9.5	340	40.5	68.6	54.0	0.21	—	0.012	25.7	2.2	1.17	0.270
Вирма	17.VII	11.6	5.50	8.54	77	8.1	290	39.4	68.1	53.6	0.27	—	0.013	25.5	2.0	1.14	0.304
Сума	19.VII	14.3	6.35	9.05	86	3.9	140	19.6	42.1	33.2	0.19	—	0.004	15.8	1.4	0.41	0.359
Колехма	19.VII	14.5	5.70	7.95	76	7.9	260	41.0	74.6	58.8	0.47	—	0.006	28.0	1.9	1.41	0.342
Руйга	20.VII	14.1	5.00	6.70	64	12.7	440	56.1	91.2	71.8	0.23	—	0.006	34.2	2.1	1.40	0.580
Нюхча	20.VII	14.6	5.60	7.96	76	8.1	280	44.8	78.2	61.5	0.38	—	0.007	27.3	0.6	1.12	0.332
Унежка	20.VII	15.2	5.20	7.69	75	8.8	400	55.8	89.2	70.1	0.20	—	0.008	33.4	3.7	1.56	0.342
Куше-река	22.VII	16.3	6.05	7.66	76	6.7	300	45.5	81.0	63.8	0.20	—	0.007	30.4	3.5	1.24	0.386
Мало-шуйка	23.VII	16.1	6.50	8.40	83	4.6	260	35.7	65.4	51.4	0.23	—	0.009	24.5	3.8	1.06	0.406
Нименга	23.VII	18.9	6.60	7.49	78	4.4	270	35.3	65.5	51.7	0.27	—	0.008	24.6	3.0	1.16	0.467
Онега	25.VII	18.3	7.20	7.39	76	4.4	160	24.9	55.6	43.7	0.15	—	0.010	20.8	2.2	0.34	1.512
Реки Лямьинского побережья																	
1962																	
Тамбца	28.VII	13.6	7.00	8.66	81	3.0	300	35.1	61.8	48.5	0.27	—	0.035	23.1	2.9	0.06	0.582
Кянда	28.VII	13.4	6.90	9.60	80	3.3	230	34.1	60.7	47.9	0.12	—	0.008	22.8	2.7	0.48	0.380
Нижма	28.VII	15.0	6.80	8.67	84	3.0	110	22.2	44.2	34.9	0.20	—	0.004	16.6	1.5	0.24	0.402
Веига	27.VII	14.6	6.90	9.13	88	3.5	230	45.5	52.6	41.4	0.30	—	0.074	19.7	4.0	1.00	0.428
Лямца	30.VII	10.8	7.15	10.10	90	1.8	220	27.0	49.5	39.1	0.26	—	0.042	18.6	3.2	0.72	0.414
Золотина	30.VII	14.2	6.60	8.77	84	4.2	340	36.3	64.8	51.0	0.27	—	0.016	24.3	3.2	0.72	0.214

Минеральный азот представлен аммонийным, нитриты и нитраты практически отсутствовали. Только в р. Колвица обнаружены следы количества NO₃⁺.

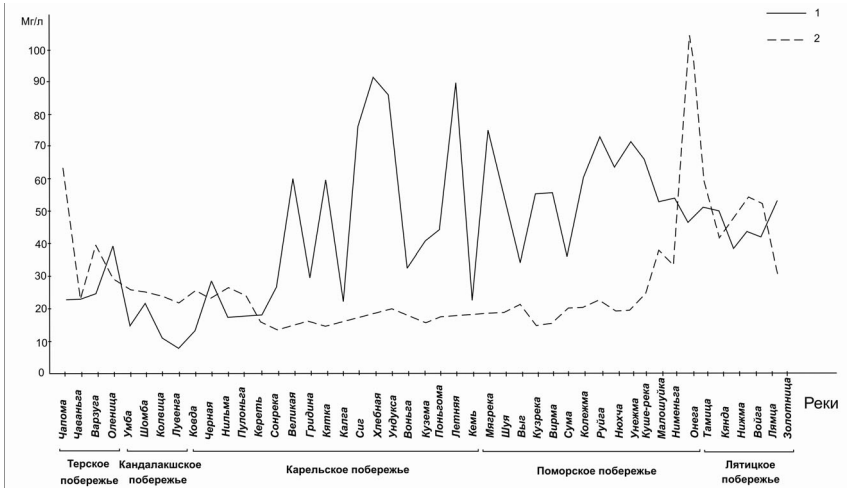


Рис. 5.2. Изменение минерализации (1) и содержания органического вещества (2) в реках Терского, Кандалакшского, Карельского, Поморского, Лямецкого побережий Белого моря

Формирование ионного состава

Наиболее низкой минерализацией отличаются реки Карельского, Поморского (за исключением юго-восточной его части) и Кандалакшского побережий (в среднем соответственно – 19 мг/л, 20 мг/л, 24 мг/л). Более значительна минерализация рек Терского побережья – в среднем около 40 мг/л. Наиболее высокая минерализация свойственна водам рек Лямецкого побережья – до 60 мг/л (см. рис. 5.2), (табл. 5.4).

Как уже отмечалось выше, различия в степени минерализации северных рек зависят, главным образом, от литологического состава и степени растворимости горных пород, слагающих ложе и бассейны рек.

К числу наиболее трудно выщелачиваемых горных пород относятся граниты, гранодиориты и гнейсы, в состав которых входят полевые шпаты – калиевый и кальциево-натриевый (плаггиоклаз), с небольшим количеством кальция, кварц и слюды. В габбро и амфиболитах, составляющих около 50% их состава, кальциево-натриевый полевой шпат содержит большое количество кальция и поэтому значительно легче подвергается выщелачиванию. Наиболее легко подвергаются растворению минералы осадочных пород: известняки, гипсы и др. (Геология СССР., 1958, 1960).

В таблицах 5.4 и 5.5 приводится химический состав ряда горных пород (обычно содержание различных окислов в однотипных породах варьирует в ограниченных пределах).

Т а б л и ц а 5.4

Химический состав горных пород Карелии и Кольского полуострова (осредненные данные). (Геология СССР..., 1958, 1960; Краткий справочник по геохимии, 1977)

Компонент	Граниты	Гнейсы	Амфиболиты	Габбро	Диабазы	Перидотит	Сланцы *)	Пески	Глины
SiO ₂	74.6	64.2	52.2	50.5	53.9	36.4	36.4	78.33	58.1
TiO	сл.	0.57	0.86	0.27	0.74	1.83	0.37	0.25	0.65
Al ₂ O ₃	12.2	15.9	15.4	24.6	14.4	1.27	9.43	4.77	15.4
Fe ₂ O ₃	1.22	1.53	3.12	1.02	2.31	10.65	1.01	1.07	4.02
FeO	1.35	4.83	6.96	3.08	7.11	6.49	8.37	0.30	2.45
MnO	0.12	0.07	0.21	0.07	0.17	0.20	0.13	–	–
MgO	нет	3.18	6.28	2.83	5.76	29.0	16.1	1.16	2.44
CaO	1.11	4.12	11.9	13.4	9.35	4.84	8.08	5.50	3.11
Na ₂ O	3.70	3.02	1.00	3.03	2.57	–	1.19	0.45	1.30
K ₂ O	4.78	1.74	0.82	0.29	1.22	0.04	1.09	1.31	3.24
P ₂ O ₅	0.025	0.21	0.08	нет	0.07	0.30	0.13	0.08	0.17
NiO	–	–	–	–	–	0.16	0.56	–	–
SO ₃	–	0.34	–	–	–	нет	–	0.07	0.64
H ₂ O _{гипр}	0.28	0.19	0.34	0.78	0.08	0.76	0.56	–	–
п.п.п.	0.52	0.84	1.00	–	2.48	8.40	4.18	–	–

*) Сланец тремолитохлоритовый.

Т а б л и ц а 5.5

Химический состав карбонатных пород Кольского полуострова (Геология СССР, т. XXVII, Мурманская обл., Гидрогеологическая карта СССР, 1961, Рихтер, 1946)

Порода	Доломиты			Известняки		
	минимум	среднее	максимум	минимум	среднее	максимум
Число анализов	4			4		
CaO	24.92	29.5	35.38	34.41	43.20	48.93
MgO	16.34	17.9	20.40	сл.	2.88	5.44
SiO ₂	2.00	8.74	19.22	6.60	12.0	21.74
R ₂ O ₃	0.40	0.81	1.62	2.96	6.17	11.36
п.п.п.	38.40	43.0	46.09	28.12	35.4	38.41

Водосборные бассейны наиболее низкоминерализованных рек Карельского и Поморского (за исключением рек северного склона возвышенности «Ветренный пояс») побережий полностью расположены в

пределах массива, сложенного трудно выщелачиваемыми гнейсами и амфиболитами, нередко интенсивно гранитизированными. Гнейсо-амфиболовый массив простирается сплошной четырехсоткилометровой полосой, вытянутой вдоль западного берега Белого моря и достигающей в ширину от 30 до 110 км. Гнейсы беломорской серии в основном состоят из олигоклаза, андезита и кварца, для них характерно высокое содержание Al_2O_3 , CaO, местами MgO. Главными породообразующими минералами амфиболитов являются роговая обманка и андезит.

С запада архейские гнейсы и амфиболиты Карелии охватываются протерозойскими осадочно-эффузивными образованиями. В зону протерозойских образований вдаются только верхние и средние части бассейнов больших рек – Ковды, Кеми, Выга. Непосредственным продолжением гнейсов и амфиболитов Карелии являются гнейсы и амфиболиты южного побережья Кольского полуострова, с севера обрамленные протерозойскими осадочно-эффузивными образованиями Южно-Кольского синклинария. В архейских образованиях Кольского полуострова среди гранитов, гранодиоритов и гнейсов очень часто встречаются мелкие тела основных более легко выщелачивающихся пород габбро и амфиболитов. В отдельных участках габбро и амфиболиты могут даже преобладать. Кроме того, на Кольском полуострове наряду с широким распространением архейских пород существенное место принадлежит протерозойским и палеозойским породам. Вулканогенно-осадочные породы, относимые по возрасту к протерозою, залегают в центральной части Кольского полуострова в виде узких полос – зон. В их состав входят метаморфизованные основные вулканогенные породы: диабазы, порфириты, мендельштейны, брекчии и туфы. В меньшем количестве осадочные породы: аркозы и кварциты, глинистые и другие сланцы, доломиты и известняки. Из этих осадочных пород по растворимости и распространению можно выделить сланцы и карбонатные породы. Карбонатные породы состоят из кальцита и доломита, иногда содержат много кварца. На долю карбонатных пород приходится небольшие участки (например, в среднем течении р. Варзуги и некоторых ее притоков). В этой свите встречаются также небольшие массивы ультраосновных пород - перидотитов.

На южной и юго-восточной окраинах Кольского полуострова, в пределах узкой прибрежной полосы Терского берега имеются отложения, условно относимые к девону. Они представлены красными кварц-полевошпатовыми песчаниками.

Таким образом, реки *Поморского побережья и Карельского (за исключением самой северной его части, примыкающей к Кандалакшскому)*, в

области питания которых преобладают гнейсы и амфиболиты, нередко интенсивно гранитизированные, отличаются наиболее низкой минерализацией – менее $20 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (табл. 5.2).

Наличие среди гнейсов и гранитов более легко выщелачивающихся основных пород габбро и диабазов, а также осадочно-протерозойских образований, способствует некоторому повышению минерализации рек *Кандалакшского побережья и северной части Карельского (примыкающего к Кандалакшскому)* – около $25 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (табл. 5.1.2).

Минерализация рек *северного склона возвышенности «Ветренный пояс» (юго-восточная часть Поморского побережья)*, сложенного древними кристаллическими сланцами, с интрузиями основных и ультраосновных пород (диабазов, габбро, перидотитов) и излияниями базальтов, также относимых по возрасту к протерозою, превышает $20 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ и составляет в среднем около $26 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (табл. 5.2).

Реки Терского побережья обладают еще более повышенной и в то же время более варьирующей минерализацией – до $60 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (р. Чапома), при среднем значении около $40 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. Значительные колебания минерализации рек, расположенных в сравнительной близости, объясняются более разнообразным геологическим строением юго-восточной части Кольского полуострова. В бассейнах наиболее минерализованных рек Терского побережья – Чапомы и Варзуги – значительное место занимают зеленокаменные породы (зеленые сланцы), глинистые сланцы и красноцветные песчаники. В то же время р. Чаваньга, бассейн которой почти весь сложен нерасчлененным комплексом слюдяных гнейсов, а в верхнем течении – микроклиновыми гранитами, обладает более низкой минерализацией – $22 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ (табл. 5.2).

Среди малых рек, впадающих в Белое море, наиболее высокой минерализацией отличаются *реки Лямецкого побережья* – в среднем около $50 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, бассейны которых сложены относительно более легкорастворимыми осадочными палеозойскими породами. Весь Онежский полуостров сложен горизонтально залегающими песчано-глинистыми палеозойскими породами (девонскими и кембрийскими). Кроме того, к области Онежского (Лямецкого) полуострова, представленной слоистыми глинами и песчаниками, приурочены выходы соляных ключей, которые являются результатом разгрузки нижнекембрийского и каменноугольного водоносных комплексов Восточно-Русского артезианского бассейна. Воды в этих источниках соленые и солоноватые сульфатно-хлоридные и кальциево-натриевые. Пониженная минерализация ($27 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) наблюдается только в водах р. Золотицы, бассейн которой, в отличие от других рек побережья, сложен мощной толщей четвертичных отложений (табл.5.2).

Особое положение среди рек впадающих в Белое море, занимают крупные реки: Северная Двина, Онега, Мезень, длина которых превышает 400 км, а площадь бассейна 50000 км². Реки эти, бассейны которых сложены различными геологическими формациями, являются интразональными. Химизм их достаточно изучен, поэтому подробно говорить о них нет необходимости. Бассейны Северной Двины, Онеги и Мезени сложены в основном осадочными палеозойскими и мезозойскими породами (известняки, доломиты, мергели, гипс), и в силу этого их воды обладают значительной минерализацией. На плоских заболоченных водораздельных плато эти породы подходят близко к поверхности, в то время как низины выполнены мощными толщами четвертичных наносов (морских, озерно-ледниковых и аллювиальных). В нижних течениях вышеупомянутых рек происходит разгрузка Северо-Двинского артезианского бассейна, также способствующая повышению минерализации речных вод.

Неисследованными остались только *малые реки Летнего* (северо-восточная половина Онежского полуострова) и *Зимнего побережья*. Как уже говорилось выше, Онежский полуостров сложен осадочными палеозойскими образованиями. Выход соленых и солоноватых источников приурочен как к Лямецкому, так и к Летнему побережью (например, в нижнем течении рек Солзы и Неноксы, Летнее побережье). Таким образом, формирование воды рек Лямецкого и Летнего побережий происходит в идентичных условиях и, следовательно, химический состав воды этих рек должен быть сходным. Минерализация рек Летнего побережья, очевидно, также составляет величину порядка 50 мг·л⁻¹.

С территории Зимнего берега впадает в Двинский залив множество небольших рек протяженностью в основном не более 50 км. Бассейны их сложены осадочными палеозойскими породами, представленными каменноугольными и девонскими песчаниками и известняками, перекрытыми сверху плащом суглинистой морены, почти исчезающей по краю плато. На Зимнем берегу Белого моря также выходит кембрийский водоносный комплекс песчаников с прослойками глины, к которому приурочен в нижнем течении рек особенно обильный для побережья Белого моря выход хлоридно-натриевых соляных источников, с минерализацией, превышающей иногда 100 г·л⁻¹. Учитывая вышесказанное, следует ожидать, что минерализация малых рек Зимнего побережья, очевидно, самая высокая среди малых рек, впадающих в Белое море.

В заключение этого раздела о минерализации рек, впадающих в Белое море, следует отметить, что химический состав воды рек в таблицах

приводится по результатам летних съемок 1961 и 1962 гг., как наиболее полно охватывающих реки Беломорья. Оба летних периода, как и полностью 1961 и 1962 годы, являются близкими по водности, следовательно, результаты обеих съемок вполне сопоставимы. Сезонные наблюдения, выполненные нами в 1961 и 1962 гг. по ряду наиболее типичных рек, позволяют сделать вывод, что минерализация в летний период 1961 и 1962 гг. близка к среднегодовой минерализации этих лет. Среднегодовая минерализация рек 1961, 1962 гг. составила около 80% от среднемноголетней. Следовательно, введя соответствующую поправку, можно считать, что среднемноголетняя минерализация исследованных рек, впадающих в Белое море, составит величину порядка 30 мг·л⁻¹.

Воды рек, впадающих в Белое море, не одинаковы не только по степени, но и по характеру минерализации (соотношению компонентов солевого состава). Преимущественно воды этих рек относятся к гидрокарбонатному классу, группе кальция, иногда – магния. В ряде рек эквивалентное содержание хлоридного иона близко эквивалентному содержанию гидрокарбонатного, а иногда и превышает его (соответственно содержание ионов $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ может превышать содержание Ca^{++}). Болотные реки, с низким содержанием гидрокарбонатного иона, в период весеннего паводка могут переходить в сульфатный класс.

Характеристику ионного состава, в виду значительного числа обследованных объектов целесообразно давать не по отдельным рекам, а в средних показателях по побережьям (табл. 5.6).

Гидрокарбонатные ионы. В воде рек, впадающих в Белое море, наиболее резкие колебания наблюдаются в содержании гидрокарбонатных ионов – от 3 до 40 мг/л, при среднем значении 12 мг/л, что составляет около 30%-экв. Основным источником иона HCO_3^- являются карбонатные породы, поэтому и более высокие концентрации гидрокарбонатного иона свойственны рекам Терского и Лямецкого побережий, а наиболее низкие – рекам Карельского и Поморского, особенно малым болотным. Низкое содержание ионов HCO_3^- в этих реках обуславливается также значительным содержанием органических кислот, вследствие чего, при высокой концентрации ионов водорода реакция $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H}_2\text{CO}_3 \rightleftharpoons \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$ сдвигается влево (при $\text{pH} = 4$ концентрация HCO_3^- может составлять всего лишь 0,3% от молярной концентрации H_2CO_3). Таким образом, в болотных реках ионы HCO_3^- , попавшие со склоновым стоком и атмосферной водой, переходят в основном в недиссоциированную форму H_2CO_3 и далее в CO_2 (табл. 5.2, 5.6).

Таблица 5.6

Ионный состав воды рек, впадающих в Белое море (данные, усредненные в пределах побережий)

Название побережья	Ca ²⁺		Mg ²⁺		Na ⁺ + K ⁺		HCO ₃ ⁻		SO ₄ ²⁻		Cl ⁻		Сум- ма ио- нов, мг/л						
	мг- экв/л	% мп- -экв/л	мг- экв/л	% мп- -экв/л	мг- экв/л	% мп- -экв/л	мг- экв/л	% мп- -экв/л	мг- экв/л	% мп- -экв/л	мг- экв/л	% мп- -экв/л							
Терское	4.22	0.211	21.7	1.68	0.139	14.3	3.42	0.137	14.1	21.96	0.360	36.9	1.69	0.035	3.6	3.25	0.092	9.4	37.85
Кандалакш- ское	3.32	0.166	25.5	1.10	0.091	14.0	1.70	0.038	10.5	14.33	0.235	36.1	2.42	0.050	7.7	1.40	0.040	6.2	24.35
Карельское	2.68	0.124	24.2	0.97	0.072	14.1	1.51	0.030	11.7	7.72	0.128	25.0	2.70	0.057	11.1	2.65	0.071	13.9	18.75
Поморское	2.40	0.120	15.9	3.11	0.255	34.0	0.03	0.001	0.1	8.25	0.121	25.7	2.09	0.044	9.4	2.44	0.070	14.9	20.16
Лямбцкое	4.31	0.215	18.0	2.29	0.188	15.7	4.88	0.114	16.3	23.30	0.374	31.3	3.62	0.075	6.3	5.24	0.148	12.4	44.83
Среднее для всех рек, впадающих в Белое море	3.03	0.173	21.1	1.90	0.156	18.4	1.74	0.070	10.5	12.21	0.194	31.0	2.52	0.052	7.6	2.88	0.081	11.4	25.42

Сульфатные ионы. Основным источником иона SO_4^{2-} в реках, впадающих в Белое море, являются болотные воды, которые играют значительную роль в питании рек. Отмечено некоторое увеличение содержания иона SO_4^{2-} в период паводка, когда возрастает доля болотного питания (в болотных водах ионы SO_4^{2-} обнаружены в количестве от 2.5 до 12.4 мг/л). Некоторую роль в обогащении поверхностных вод ионом SO_4^{2-} играют атмосферные осадки. У побережья морей главным фактором загрязнения атмосферных вод ионами SO_4^{2-} и Cl^- является морская вода (эоловый перенос). В атмосферных осадках Карельского побережья ион SO_4^{2-} присутствует в количестве 1,6 мг/л [Воронков, 1951]. В реках впадающих в Белое море, содержание иона SO_4^{2-} обнаружено в пределах от 1 до 9 мг/л, при среднем значении около 4 мг/л. Таким образом, содержание иона SO_4^{2-} в реках Беломорья незначительно превышает таковое атмосферных осадков и близко к содержанию SO_4^{2-} болотных вод. Относительно повышенное содержание сульфатов в реках Лямецкого побережья объясняется выходом соленых сульфатно-хлоридных источников в районе этого побережья и в нижнем течении р. Онеги (табл. 5.2, 5.6).

Хлоридные ионы. Среди анионов воды беломорских рек на втором месте по содержанию – ион хлора – в среднем около $3 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ (11.5% экв), при предельных значениях от 1 до $11 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Источником хлора являются осадочные породы и продукты выветривания магматических пород, в которых хлор присутствует в рассеянном состоянии. В обогащении прибрежных поверхностных вод ионами Cl^- играет роль засоление эоловым путем со стороны моря, а также «засоленные» почвы беломорских террас (табл. 5.2, 5.6, 5.7).

Фактору эолового засоления приморских пресноводных водоемов исследователями придается разное значение, что связано, видимо, с большой ролью фонового фактора. При формировании рек в условиях легкорастворимых горных пород и почв и значительной их минерализации, фактор засоления со стороны моря мало заметен (Лямецкое побережье). Но если бассейн рек сложен малорастворимыми горными породами и минерализация рек не велика, засоление эоловым путем со стороны моря на этом фоне становится значительным (Карельское, Поморское побережья).

Существенная роль фактора эолового засоления (за счет привноса морских солей атмосферными осадками) в формировании химического состава поверхностных и подземных вод в районах Кольского п-ова, расположенных вдоль побережья вблизи Баренцева и Белого морей, отмечена в работе (Нежданова и др., 1978).

Содержание Cl^- в воде малых рек Карельского перешейка в течение всего года небольшое – около $1.5 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. В болотных водах и атмосферных осадках этого района соответственно $0.0\text{--}0.8$ и $0.5 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ Cl^- (Воронков, 1951, 1959). Таким образом, содержание Cl^- в воде малых рек, впадающих в Белое море, существенно выше, чем в аналогичных реках Карельского перешейка, расположенного в этой же климатической зоне, но удаленных от моря. Содержание ионов Cl^- в болотных водах и атмосферных осадках приморской зоны также более высокое. Повышенное содержание ионов Cl^- и Na^+ в болотах, расположенных вблизи океана, по сравнению с флористически аналогичными болотами, удаленными от него, отмечают Tolpa и Yorham (1961). Повышенное содержание ионов Cl^- и Na^+ , особенно в период штормовых ветров, отмечал в малых реках Японии Kobayashi (1960), объясняя это явление переносом брызг морской воды сильными ветрами; он оценил годовое поступление Cl^- с моря за счет муссона в 968 тыс. тонн.

Заметное влияние моря на химический состав атмосферных осадков распространяется в основном на прибрежную полосу шириной около 50–60 км и возрастает в период зимних штормов; за пределами этого расстояния кривая концентрации хлора идет резко на убыль (Матвеев, 1961; Зверев, 1962).

Влияние моря на концентрацию Cl^- в малых реках Беломорья можно проследить на примере рек Карельского и Поморского побережья, формирующихся примерно в одинаковых геологических и климатических условиях. Низкая минерализация этих рек не затухивает фактора влияния моря. При длине рек до 50–60 км содержание иона Cl^- наиболее высокое – свыше $3 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. При длине рек свыше 50 км, но не более 100 км, хлор содержится около $3 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ и, наконец, в реках протяженностью свыше 100 км содержание ионов хлора приближается к таковому в реках Карельского перешейка, удаленных от моря (около $1.5 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$).

На повышение содержания хлора в воде малых рек, протекающих по Беломорской низменности, оказывают влияние засоленные почвы беломорских террас (содержание Cl^- достигает в них 13 мг-экв. на 100 г почвы (табл. 5.7) и морские засоленные глины, выстилающие почти все пространство беломорских террас, простирающихся на 30–50 км в глубь материка.

Таблица 5.7

Анализ водных вытяжек почв беломорских террас (Марченко, 1962)

Глубина отбора образца	Содержание, мг-экв/100 г почвы				
	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺
6–16	13.25	0.18	8.35	2.76	5.51
16–35	3.15	0.18	1.91	0.38	0.61
70–90	7.98	0.28	1.60	0.38	0.57

Таким образом, в повышении содержания ионов Cl⁻ и Na⁺ в воде малых рек, формирующихся в условиях беломорских террас, играют роль два фактора – воздействие морских засоленных глин и эоловое засоление со стороны моря. Крупные реки, бассейны которых выходят за пределы воздействия обоих вышеуказанных факторов, имеют пониженное содержание Cl⁻, по сравнению с малыми реками, бассейны которых полностью находятся в зоне влияния моря на увеличение количества Cl⁻.

Наименьшее содержание хлора отмечено в реках Кандалакшского побережья (1.4 мг·л⁻¹), наиболее защищенного от воздействия морских ветров. В его пределах отсутствуют и морские отложения.

Наиболее высокое содержание ионов Cl⁻ и Na⁺ наблюдается в реках Лямецкого побережья (Cl⁻ – 5.2 мг·л⁻¹ и Na⁺ + K⁺ – 4.9 мг·л⁻¹), что объясняется влиянием соленых хлоридно-натриевых источников в бассейнах рек. Кроме того, в пределах прибрежной полосы Летнего и Зимнего берегов имеются морские отложения послеледникового времени. Влияние моря на увеличение количества ионов Cl⁻ и Na⁺ в реках Лямецкого побережья стирается под влиянием этого более мощного фактора.

Самое высокое содержание ионов Cl⁻ и Na⁺ можно ожидать в малых реках Летнего и Зимнего побережья, так как к его прибрежной полосе приурочен выход большого количества соленых источников. Кроме того, в пределах прибрежной полосы Летнего и Зимнего берегов имеются морские отложения послеледникового времени.

Ионы кальция. Среди катионов в воде рек, впадающих в Белое море, доминирующее положение занимает кальций, среднее содержание которого для исследованных рек – 3 мг·л⁻¹ (около 20%-экв.) при предельных значениях 1.5–7 мг·л⁻¹. Основным источником Ca являются карбонатные породы, наличием последних и объясняется повышенное содержание его в воде рек Лямецкого и Терского побережий. Наименьшее количество кальция (менее 3 мг·л⁻¹) отмечено в воде рек, бассейн которых сложен гранитами и гнейсами – Карельское и Поморское побережья. В условиях гранитов и гнейсов источником кальция являются алюмосиликаты.

Источником катионов Ca и Mg является также минерализующаяся растительность болот (табл. 5.2, 5.6).

Ионы магния. Содержание магния в реках Беломорья варьирует в пределах от 0.6 до 5.7 мг·л⁻¹ при среднем значении 1.9 мг·л⁻¹ (около 18% экв). Источником Mg являются доломиты и мергели, а также продукты выветривания коренных горных пород (перидотит, в котором на долю MgO приходится около 29%, а также минералы биотит, амфибол и др.). Наиболее высокое содержание Mg обнаружено в реках Поморского побережья, а среди них особенно в реках северного склона возвышенности «Ветренный пояс», среди кристаллических сланцев которого значительное место принадлежит интрузиям перидотитов (табл. 5.2, 5.6).

Ионы натрия и калия. Источником натрия являются в основном хлористые соли осадочных пород морского происхождения. Другим источником являются продукты выветривания коренных пород. Широко распространены алюмосиликаты, содержащие натрия (альбит, нефелин и др.). K⁺ содержится, главным образом, в минералах кислых изверженных пород (ортоклаз, мусковит, а также плагиоклаз, биотит и др.). Несмотря на обилие в районе формирования беломорских рек минералов, содержащих Na⁺ и K⁺, количество этих ионов в реках незначительно, т. к. коренные породы, содержащие Na⁺ и K⁺, плохо поддаются выветриванию. Среднее содержание Na⁺ и K⁺ в реках, впадающих в Белое море, порядка 3 мг·л⁻¹, при максимальном – 7 мг·л⁻¹ (табл. 5.2, 5.6).

В природных водах обычно повышенное содержание иона Cl⁻ сопровождается и повышенным содержанием ионов Na⁺ и K⁺. Однако, в реках Кандалякшского побережья при более низком содержании Cl⁻, сравнительно с реками Карельского и Поморского побережья, мы получили более высокое содержание ионов Na⁺ и K⁺. Это несоответствие вероятно объясняется определением ионов Na⁺ и K⁺ по разности – между анионами (HCO₃⁻, SO₄²⁻, Cl⁻) и катионами (Ca²⁺ и Mg²⁺), поскольку, как отмечает П.П. Воронков (1951), в воде рек, содержащих большое количество болотного гумуса, щелочноземельные катионы в эквивалентном отношении обычно превышают сумму анионов кислот HCO₃⁻, SO₄²⁻ и Cl⁻, так как часть эквивалентов Ca²⁺ и Mg²⁺ приходится на эквиваленты органических кислот. Это явление отмечал и П.П. Воронков (1951). Содержание Na⁺ и K⁺, определенное по разности, в водах с высокой цветностью (Карельское, Поморское и Лямецкое побережья) следует считать явно заниженным даже в том случае, если количество анионов HCO₃⁻, SO₄²⁻ и Cl⁻ несколько превышает сумму катионов Ca²⁺ и Mg²⁺. Причина заниженного результата аналитического определения анионов может заключаться в

том, что при титровании общей щелочности определяются лишь анионы слабых кислот, в то время как в природных водах присутствуют и такие достаточно сильные органические кислоты, как креновая и апокреновая, которые при этом аналитически не учитываются (табл. 5.2, 5.6).

В реках Поморского побережья в среднем сумма катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} на 0.14 мг-экв/л превышает сумму анионов HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- . Эту разницу можно отнести за счет органических кислот, на долю которых, очевидно, приходится не менее 0.20 мг-экв·л⁻¹. В болотной воде концентрация органических кислот по П.П. Воронкову может достигать 0.55 мг-экв·л⁻¹.

Наиболее низкое содержание иона Cl^- (1.40 мг·л⁻¹) обнаружено в реках Кандалакшского побережья, соответствует ему и наиболее низкое содержание ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) (1.79 мг·л⁻¹). Заниженной, вследствие определения по разности, эта цифра быть не может, т. к. в реках Кандалакшского побережья почти отсутствуют гуминовые вещества (цветность около 40°).

Максимальное содержание ионов $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, как и Cl^- , обнаружено в реках Лямецкого побережья, что обусловлено выходом соляных источников в области питания рек .

Органическое вещество, биогенные элементы и газовый режим

Значительная заболоченность бассейнов беломорских рек обуславливает поступление в реки большого количества гуминовых веществ. По П.П. Воронкову (1951), в болотных водах Карельского перешейка растворено 50–100 мг·л⁻¹ органических веществ гумусового происхождения (перманганатная окисляемость составляет от 30 до 70 мг О·л⁻¹).

В воде рек, впадающих в Белое море, среднее содержание органического вещества составляет 41 мг·л⁻¹. Обилие органического вещества в воде рек возрастает с увеличением заболоченности площади водосбора и может достигать 90 мг·л⁻¹, с цветностью до 800° и перманганатной окисляемостью до 80 мг О·л⁻¹. Наиболее высокие показатели содержания органического вещества (в среднем 55 мг·л⁻¹) и цветности (в среднем 280°) наблюдаются в реках Поморского побережья, где площадь болот в бассейнах рек нередко превышает площадь суходолов (рис. 5.2, табл. 5.3, 5.8).

Цветность. Органическое вещество. Особенно высокой цветностью (до 800°) отличаются малые реки Поморского и Карельского (за исключением его северной части) побережий, бассейны которых полностью расположены в зоне сильно заболоченной Приморской низменности, чем и объясняется обилие в их водах гуминовых веществ (табл. 5.3, 5.8).

Много органических веществ также в воде рек Карельского и Лямецкого побережий (соответственно 38 и 44 мг/л); умеренное содержание ОВ – в реках Терского побережья (27 мг/л) (табл. 5.3, 5.8). Незначительное количество органического вещества (в среднем 14 мг/л) и низкая цветность (соответственно 40°) свойственны только рекам Кандалакшского побережья, где болота не занимают значительных площадей.

pH. Обилие гуминовых веществ в воде обычно является причиной низких величин pH (за счет диссоциации органических кислот). В реках Поморского и Карельского побережий pH варьирует от кислой до слабокислой и лишь в отдельных случаях приближается к нейтральной. В реках Терского, Кандалакшского и Лямецкого побережий реакция среды близка к нейтральной (слабощелочная отмечена только в воде рек Онеги и Лямцы). Сравнительно высокие величины pH в воде Лямецкого побережья, несмотря на обилие гумусовых веществ (средняя цветность – 240°) объясняются буферностью вод (табл. 5.3, 5.8).

Растворенный кислород. Наиболее низкое содержание растворенного кислорода, как абсолютное, так и в процентах насыщения, наблюдается в реках наиболее заболоченного Поморского побережья (в среднем летом $8.1 \text{ мг } \text{O}_2 \cdot \text{л}^{-1}$ – 78% насыщения). Наиболее низкий показатель насыщения вод кислородом отмечен в р. Руйге (64%), при содержании $6.7 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$. Заморные явления в исследованных реках, очевидно, не наблюдаются, т. к. зимой в подледный период содержание растворенного кислорода в воде обычно довольно высокое, даже в реках, изобилующих органическим веществом. Это можно объяснить низкими температурами воды, не способствующими окислению органического вещества зимой, а также аэрацией воды на незамерзающих порогах. Наиболее благоприятны в отношении газового режима реки Кандалакшского, Терского и северной части Карельского побережья (обычно около $10 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$ и не менее 90% насыщения) (табл. 5.3, 5.8).

Свободная углекислота. Количество растворенной CO_2 может достигать значительных величин – до $13 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$, приближаясь к таковым в болотных водах ($14 \text{ мг} \cdot \text{л}^{-1}$)⁴.

⁴ Примечание: Двуокись углерода определялась общепринятым объемным методом. Недостатком этого метода является то, что одновременно с CO_2 титруются органические кислоты преимущественно гумусового происхождения, а также другие слабые кислоты (борная, кремниевая). Однако для большинства природных вод содержание CO_2 является основной составной частью, что позволяет с некоторой (общепринятой) условностью выражать результат определения в виде CO_2 [Руководство по химическому анализу..., 1973]. Газометрический и весовой методы определения CO_2 применимы только при высоком содержании CO_2 .

Таблица 5.8

**Органическое вещество, биогенные элементы и газовые условия воды рек, впадающих в Белое море
(данные, средненные в пределах побережий)**

Название побережья	t° воды	pH	O ₂		CO ₂ мг/л	Цветность	Окисляемость, мг O ₂ /л		Органическое вещество, мг/л	Азот минеральный, мг/л				Азот органический, мг N/л	P минеральный, мг/л	Si мг/л	Fe суммарное, мг/л	Жесткость, мг-экв/л
			мг/л сыщени	% насыщения			перманганатная	бихроматная		NH ₄	NO ₂	NO ₃	суммарный					
Терское	14.2	6.89	9.43	90	22	140	16.0	34.7	27.4	0.11	нет	нет	0.11	0.013	2.9	0.91	0.346	
Кандалакшское	13.6	6.82	9.90	93	18	40	7.0	17.8	14.0	0.09	нет	0.002	0.09	0.003	24	0.08	0.256	
Карельское	17.9	6.36	8.46	86	43	210	31.2	48.2	38.0	0.20	нет	нет	0.20	0.004	2.1	1.04	0.229	
Поморское	14.7	5.91	8.15	78	72	280	39.3	69.9	55.0	0.28	нет	нет	0.28	0.009	24	1.06	0.376	
Лямницкое	13.6	6.89	9.16	86	30	240	33.5	55.6	43.8	0.24	нет	нет	0.24	0.030	29	0.71	0.403	
Среднее для всех рек, впадающих в Белое море	15.7	6.38	8.67	87	4.6	210	30.6	52.2	41.1	0.21	нет	нет	0.21	0.010	24	0.91	0.311	

Максимальные значения CO_2 характерны для болотных рек (Хлебная, Ундукса, Мягрека и др.). Наименьшее количество CO_2 наблюдается в реках со светлой водой (низкой цветностью) Кандалакшского побережья, в среднем CO_2 – 1.8 мг/л. Среднее значение для всех исследованных рек в летний период составляет – 4,6 мг/л CO_2 . Максимальное содержание двуокиси углерода в воде рек наблюдается в зимний период (табл. 5. 3, 5.8).

Биогенные элементы. В реках, наиболее богатых органическим веществом, наблюдается повышенное содержание биогенных элементов. Биогенные элементы представлены в основном в форме органических соединений. Неорганический азот представлен в основном формой NH_4^+ и содержится летом в воде исследованных рек в количестве 0.21 мг $\text{N}\cdot\text{л}^{-1}$ (обычно не превышает 0.5 мг $\text{N}\cdot\text{л}^{-1}$). Нитритный и нитратный азот в летний период, как правило, отсутствуют и появляются только в период ледостава, не достигая значительных количеств и зимой. Содержание органического азота в летний период в 3.5 раза превышает сумму минерального (табл. 5.3, 5.8).

Минеральный фосфор в воде исследованных рек присутствует в течение круглого года, но в весьма умеренных количествах. В летний период его среднее значение для всех беломорских рек составляет 0.01 мг $\text{P}\cdot\text{л}^{-1}$, но в отдельных реках содержание минерального фосфора даже летом возрастает до 0.04–0.07 мг $\text{P}\cdot\text{л}^{-1}$. Причина, очевидно, в наличии фосфорсодержащих пород в бассейнах этих рек (Оленица, Вейга, Лямца). Органический фосфор в воде рек впадающих в Белое море, в летний период составляет величину порядка 0,04 мг $\text{P}\cdot\text{л}^{-1}$ (табл. 5.3, 5.8).

Железо. В ряде рек много растворенного железа, при варьировании его концентраций в довольно широких пределах от 0.01 до 4 мг·л⁻¹, при этом концентрация $F_{\text{сум}}$ варьирует в пределах от 0.03 до 4.7 мг·л⁻¹ (табл. 5.2, 5.3, 5.6, 5.8). В исследованных нами реках уровень концентрации железа проявил жесткую положительную корреляцию с цветностью и содержанием органического вещества. Особенно много растворенного железа в сильно гумифицированных водах, поскольку оно может удерживаться природной водой в растворенном виде, в зависимости прежде всего, от концентрации гумусового органического вещества. Положительная корреляция концентрации растворенного железа с цветностью отмечается в работе (Лозовик и др., 2006).

Наши исследования показали, что высокие концентрации как суммарного, так и растворенного железа (более 1 мг·л⁻¹) свойственны рекам Поморского и южной части Карельского побережья, для которых характерны пониженная минерализация (менее 20 мг·л⁻¹), высокая цветность

(свыше 200°) и высокое содержание органического вещества (свыше 50 мг·л⁻¹). Наиболее высокое содержание железа (свыше 2 мг·л⁻¹) наблюдалось в реках Сиг, Хлебная, Ундукса, Летняя (с цветностью от 400° и содержанием органического вещества в пределах 70–90 мг·л⁻¹), при этом максимальная концентрация железа (около 5 мг·л⁻¹) отмечена в р. Хлебная (цветность 800°, содержание органического вещества достигало 90 мг·л⁻¹). В реках с очень высоким содержанием гуминовых веществ практически все железо находится в растворенной форме (до 90% и более) (табл. 5.2, 5.3, 5.6, 5.8).

Кремнекислота. Наибольшей стабильностью распределения в водах исследованных рек отличается растворенная кремнекислота. Минимальное среднее значение для рек Карельского побережья составляет 2.1 мг Si·л⁻¹, а максимальное среднее – для Терского и Лямецкого – 2.9 мг Si·л⁻¹ (табл. 5.3, 5.8).

* * *

Характерным показателем типизации малых рек, впадающих в Белое море, и, очевидно, для водотоков и водоемов Карельско-Кольского региона, может служить соотношение содержания органического вещества и минерализации, находящихся в противофазе (рис. 5.2), генетически обусловленное в первую очередь степенью заболоченности водосборного бассейна рек (на общем фоне низкой минерализации). При этом индивидуально по рекам минерализация варьирует в пределах 13.16–60.35 (табл. 5.2), содержание органического вещества – в более широких пределах 11.1–90 (табл. 5.3).

Противофаза минерализации и концентрации органического вещества вероятно объясняется тем, что на водосборном бассейне тех рек, где торфяники перекрывают выходы на поверхность горных пород фенно-скандинавского кристаллического щита, затруднено поступление продуктов выщелачивания и без того трудно выщелачиваемых горных пород в речные воды. Таким образом, низкая минерализация вод рек районов побережья, где коренные породы перекрыты торфяниками, может быть обусловлена, с одной стороны, восстановительными условиями среды (высокие содержания органических кислот – гуминовые, фульвокислоты), а с другой – теплоизоляционными свойствами торфа, снижающими влияние резких перепадов температуры на интенсивность температурного выветривания пород.

Средненные величины отношения ОВ/минерализация в реках по побережьям составляют: Терское – 0.72; Кандалакшское – 0.57; Карельское – 2.02; Поморское – 2.73; Лямецкое – 0.98.

Важным генетически обусловленным показателем гидрохимической типизации малых рек рассматриваемого региона является плеяда совокупности показателей, связанных жесткой корреляцией с содержанием органического вещества: цветность, рН, концентрация растворенной углекислоты, железо (суммарное и растворенное).

Таким образом, если взять за основу генетической типизации малых рек, впадающих в Белое море, вышеуказанные показатели, то очевидно граница типовых различий, как наглядно показывает рисунок (рис. 5.2), подтверждается статистическими критериями значимости отличия распределений основных классификационных признаков (ОВ, минерализация и их соотношения) на основе сопоставления параметров распределения – средних значений и дисперсии (табл. 5.10). Как видно из параметров распределения этих величин, отношение ОВ/МВ обеспечивает более четкое разделение типов вод, чем каждый индивидуальный показатель.

Таблица 5.10

Статистические характеристики типобразующих гидрохимических показателей малых рек, впадающих в Белое море (x_{cp} – среднееарифметическое, σ – среднееквадратичное отклонение, v – коэффициент вариации, n – число рек)

Тип реки	Σ_{II} , мг/л				ОВ, мг/л				ОВ/ Σ_{II}			
	x_{cp}	σ	v %	n	x_{cp}	σ	v %	n	x_{cp}	σ	v %	n
I	24.9	1.88	7.5	10	19.9	7.93	40	13	0.75	0.316	23.7	13
II	30.3	2.36	13.8	20	53.6	20.8	39	26	2.8	1.08	38.5	22
III	44.8	9.7	21.6	6	43.8	5.7	12	6	0.89	0.35	39.7	5

Примечание. При расчете показателей (уровень значимости $\alpha = 0,01$) для Σ_{II} исключены как атипичные реки: I тип – Чалома, Варзуга (вследствие некоторых особенностей геологических условий водосбора).

Выводы

1. В результате проведенных исследований 44 малых рек (средняя длина менее 70 км), впадающих в Белое море в пределах Терского, Кандакшского, Карельского, Поморского, Лямецкого побережий, выявилось значительное разнообразие в химическом составе воды этих рек в пределах различных участков побережья. Показано, что обнаруженный особенностями химического состава речных вод генетически связаны с составом горных пород, слагающих бассейны рек, различием в составе почв, обилием и характером болот, озерностью.

2. Почвенно-геологические и климатические условия исследованной области способствуют формированию лишь маломинерализованных поверхностных вод. В среднем минерализация воды исследованных рек составляет около $30 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. При общей низкой минерализации речных вод, относимых к гидрокарбонатно-кальциевым, выявлены микрозоны повышенной и пониженной минерализации и различие ионного состава, связанные с локальными особенностями геологических формаций бассейнов рек.

3. Значительная заболоченность водосборных бассейнов рек Поморского и южной части Карельского побережий обуславливает поступление в реки большого количества органического вещества гуминового происхождения – при среднем содержании в речных водах ОВ – около $40 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, средней цветности около 210° (максимальные значения: ОВ около $90 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, цветности около 800° – в р.Хлебная).

4. Наиболее низкой минерализацией отличаются реки Карельского, Поморского и Кандалакшского побережий (в среднем соответственно – $19 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, $29 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, $24 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$), бассейны которых, в основном, сложены трудновыщелачиваемыми кристаллическими архейскими образованиями (гнейсы и амфиболиты, нередко интенсивно гранитизированные).

5. Более значительная минерализация рек Терского побережья (в среднем около $40 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) обусловлена наличием более легкорастворимых вулканогенно-осадочных пород, относящихся к протерозою, хотя они и занимают подчиненное, по сравнению с архейскими породами, распространение.

6. Наиболее высокая минерализация (в среднем около $50 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) свойственна рекам Лямецкого побережья, бассейны которых сложены осадочными палеозойскими породами. Известную роль в повышении минерализации воды этих рек играют соляные источники, выходящие на поверхность Онежского (Лямецкого) полуострова в результате разгрузки нижнекембрийского и каменноугольного комплексов Восточно-Русского артезианского бассейна.

7. По химическому составу воды исследованных рек преимущественно относятся к гидрокарбонатному классу группы кальция, иногда – магния. В ряде рек эквивалентное содержание хлоридного иона близко гидрокарбонатному, а иногда и превышает его, что обусловлено эоловым засолением со стороны моря и наличием в водосборном бассейне засоленных ленточных глин. Соответственно содержание ионов $\text{Na}^+\text{+K}^+$ может превышать содержание ионов Ca^{2+} . Болотные реки, с низким содержанием гидрокарбонатного иона, в период весеннего паводка могут переходить в сульфатный класс.

8. В реках, богатых органическим веществом, отмечено повышенное содержание биогенных элементов, представленных в основном в форме органических соединений.

9. На основе анализа комплексных материалов исследований малых рек, впадающих в Белое море, выявлена и обоснована их гидрохимическая типизация.

10. Показано, что воды малых рек водосбора Белого моря мало подвержены антропогенному воздействию.

5.2. Гидробиология

Введение

Малые реки, как правило, являются наименее изученными водными объектами в пределах большинства регионов, что неправомерно, учитывая их роль в формировании водного баланса. Кроме того, они широко используются как рыбохозяйственные водоемы, как источники водоснабжения и рекреационные зоны. Исследуемые притоки Карельского, Терского и Архангельского побережий Белого моря имеют важное рыбохозяйственное значение (Веселов, Казаков, 1998; Калюжин, 2003). Выбор данных рек в качестве объекта исследований обусловлен, в первую очередь, их недостаточной изученностью и отсутствием активного антропогенного воздействия. Инвентаризация гидрофауны водотоков бассейна Белого моря, не подвергаемых в настоящее время заметному антропогенному влиянию, позволит получить ценный материал для познания структуры и динамики естественных биоценозов и биогеографии населяющих их организмов. В условиях антропогенной нагрузки сообщества гидробионтов могут служить объектами для диагностирования признаков изменений водных экосистем и использоваться для контроля за их состоянием (Андроникова, 1996; Комулайнен, 2004).

Цель работы — обобщение имеющихся данных, характеризующих состояние сообществ фитоперифитона, зоопланктона и зообентоса в реках бассейна Белого моря.

Характеристика исследованных рек

Исследованные реки побережья Белого моря представляют собой сложные озерно-речные системы, имеют незначительную протяженность (не более 250 км), состоят из чередующихся порожистых участков и озеровидных расширений или озер. Озера, входящие в состав таких систем,

оказывают значительное влияние на биологический режим ниже расположенных русловых участков рек. Озерность притоков Белого моря изменяется от 1 до 20%. Водосборы многих рек отличаются высокой (60-80%) степенью заболоченности (Кузнецов, 1999). Воды рек характеризуются низкой минерализацией (13—124 мг/л) и незначительным содержанием биогенных и органических веществ. Нижнее течение притоков Белого моря находится под влиянием приливно-отливных явлений, средняя амплитуда которых составляет 2 м. По характеру питания реки принадлежат к смешанному типу, получают до 75% воды за счет талых, снеговых, дождевых, а также болотных и грунтовых вод (Ресурсы поверхностных вод СССР..., 1974).

Материалы и методы

Материалом для настоящей работы послужили результаты исследований авторов, выполненных на реках бассейна Белого моря (Карельское, Терское побережье, частично Архангельское) в течение разных лет (1973-2003 гг.). Наблюдения проводили, в основном, в период летней межени (июль - начало сентября). Станции для отбора гидробиологических проб (фитоперифитон, зоопланктон, зообентос) располагались на порожистых участках рек. Сбор и камеральная обработка материала выполнялись по общепринятым стандартным методам (Киселев, 1969; Руководство по методам гидробиологического анализа..., 1983; Комулайнен и др., 1989; Комулайнен, 2003).

Результаты и их обсуждение

Фитоперифитон. Состав фитоперифитона исследованных рек включает 336 таксонов водорослей рангом ниже рода, относящихся к 6 отделам: *Raphidophyta* – 1, *Cyanophyta* – 42, *Chrysophyta* – 1, *Dinophyta* – 1, *Vacillariophyta* – 238, *Chlorophyta* – 49, *Rhodophyta* – 5 (Комулайнен, 1994, 1996, 1999, 2004, 2004а; Рябинкин и др., 1999; Комулайнен, Круглова, Барышев, 2005, 2007). Основу списка во всех реках (>90 %) составляют диатомовые, зеленые и синезеленые водоросли. Видовое богатство альгофлоры перифитона рек в целом, а также отдельных водотоков и их участков определяют диатомовые водоросли. На их долю приходится более половины списка, что характерно для всех типов водоемов Арктики и Субарктики. Среди диатомей доминируют типичные для олиготрофных водоемов Европейского Севера виды: *Tabellaria flocculosa*, *Eunotia pectinalis*, *Frustulia rhomboides* и *Cymbella affinis*. Исследования,

проведенные с использованием современных методов (Генкал, Комулайнен, 2007), позволили дополнить имеющиеся сведения о *Vaccillariophyta* водотоков и выявить новые для альгофлоры России таксоны: *Achnanthes saccula* Carter, *Cocconeis stauroneiformis* (W. Smith) Okuno, *Eunotia serra* var. *diadema* (Ehrenberg) Patrick, *Pinnularia subgibba* Krammer, *Rhopalodia* cf. *gibba* var. *minuta* Krammer, *Tabellaria* cf. *binalis* var. *elliptica* Flower.

Достаточно разнообразно представлены в перифитоне синезеленые водоросли, максимального обилия среди которых достигают *Capsosira brebissonii*, *Tolypothrix saviczii*, *Stigonema mamillosum* и *Calothrix gypsophylla*. Видовое богатство зеленых водорослей формируется практически представителями одного семейства – *Desmidiaceae*, многие из которых имеют арктическое или преимущественно арктическое распространение. Однако наиболее постоянны среди зеленых водорослей нитчатые эдогониевые, зигнемовые и улотриковские водоросли. Красные водоросли представлены всего 5 видами, из которых *Batrachospermum moniliforme* постоянно входит в доминирующий комплекс и является одним из самых постоянных видов в перифитоне рек.

Зонально-климатические черты, свойственные альгофлоре перифитона исследованных рек, проявляются на различных уровнях таксономического анализа. Во-первых, в ее составе отмечено доминирование диатомовых и зеленых водорослей и практически полное отсутствие представителей отделов *Euglenophyta* и *Dinophyta*. При оценке «географических» особенностей видового состава используется также отношение *Cyanophyta/Chlorophyta*. Для фитоперифитона исследованных водотоков оно составляет 1.1:1.0, что отражает его специфику в северных реках (Комулайнен, 2004). Это соотношение особенно близко к результатам, полученным для донных альгоценозов рек Швеции: 1.0-1.1 и горных рек центральной Европы: 1.0-0.9. Показательным является также отношение числа таксонов в порядках *Nostocales* и *Oscillatoriales*. В перифитоне исследованных рек явно преобладают ностоковые водоросли, ценозообразующая роль которых заметно выше, чем в водотоках Карелии (Комулайнен, 2004). На северное положение рек указывают также набор и порядок расположения семейств. Самые высокие позиции принадлежат семействам, видовое разнообразие которых отражает голарктические черты флор северного полушария (*Naviculaceae* и *Desmidiaceae*). Характерным, как и для других водоемов Европейского Севера, является также высокая видовая насыщенность семейств *Fragilariaceae* и *Eunotiaceae*. Сравнительная

оценка роли отдельных родов в формировании таксономического разнообразия фитоперифитона показала, что оно определяется в первую очередь родами, в которых преобладают типичные прикрепленные формы. Основными по фитоценоотическому значению родами в альгофлоре исследованных рек являются пеннатные диатомеи: *Fragilaria*, *Eunotia*, *Achnanthes*, *Navicula*, *Cymbella* и *Gomphonema*, соответственно 16, 30, 20, 19, 18 и 16 видов или 50% от общего числа определенных диатомовых водорослей. Наблюдается также свойственное северным флорам преобладание числа родов с одним таксоном и значительная роль одновидовых семейств. Сокращение числа видов в семействах и родах объясняется и низкой минерализацией поверхностных вод. При этом роль маловидовых родов и семейств увеличивается к северу (Комулайнен, 2004).

Особенностью альгофлоры исследованных водоемов является относительная однородность группировок водорослей в систематическом отношении. Основное фитоценоотическое значение имеет небольшое число представителей маловидовых родов при значительной выравненности структуры альгоценозов. Набор руководящих форм и выявленных комплексов почти идентичен во всех водоемах. К доминирующим по численности отнесены 45 видов, или 13,4%, из определенных в количественных пробах. Однако реально структуру фитоперифитона в реках формирует еще более ограниченное число видов. Это: *Tabellaria flocculosa*, *Synedra ulna*, *Achnanthes minutissima*, *Frustulia rhomboides*, *Eunotia pectinalis*, *Didymosphenia geminata*, *Gomphonema constrictum*, *Ulothrix zonata*, *Bulbochaete* sp., *Oedogonium* sp., *Zygnema* sp., *Mougeotia* sp., *Draparnaldia plumosa*, *Cladophora glomerata*, *Batrachospermum moniliforme*, *Chantransia chalybea*.

Сравнение видового состава перифитона позволило выделить несколько групп рек, которые достаточно четко объединились по «географическому» признаку. Кроме того, специфичность альгофлоры в выделенных группах определяется влиянием в формировании альгоценозов аллохтонной флоры – планктонных видов, сносимых из проточных озер. Первая группа объединяет реки Карельского побережья Белого моря, для которых характерна высокая цветность. Обращает на себя внимание разнообразие ацидофильных и широко распространенных видов. Их относительная численность в перифитоне водотоков достигает 70%, что может быть объяснено поступлением с заболоченных водосборов кислых, низкопродуктивных вод. Комплекс, включающий *Tabellaria flocculosa* + *Eunotia* spp., является определяющим для альгофлоры. Это усиливает

однородность альгофлоры, ограничивает распространение многих видов и заметно нивелирует различия в структуре альгофлоры в исследованных водотоках. В фитоперифитоне этой группы рек, благодаря более высокой озерности, кроме типичных реофильных форм в альгоценозах обрастаний довольно разнообразны и планктонные водоросли (*Aulacosira* spp. и *Cyclotella* spp.). Во вторую группу включены реки западной части Терского побережья Белого моря (Лувеньга, Пила, Умба и Варзуга), характеризующиеся значительной разветвленностью речных систем, озерностью и залесенностью водосборов. Перифитон этих рек отличается более высоким видовым богатством, видовым разнообразием и количеством доминирующих видов. В его составе отмечено четкое доминирование *Tabellaria flocculosa* и *Achnanthes minutissima* и, благодаря более высокой озерности, постоянное присутствие планктонных центральных диатомей (*Aulacosira* spp. и *Cyclotella* spp.). Среди нитчатых водорослей в перифитоне рек доминируют – *Mougeotia* spp и *Ulothrix zonata*. Заметную роль в формировании биомассы наряду с нитчатыми водорослями играют диатомеи. Размах колебаний численности водорослей в конце биологического лета (июль—август) достигал нескольких порядков – от 0.6×10^4 до 1620×10^4 кл/см², а биомасса изменялась от 0.1 до 36.7 мг/см² субстрата. В целом во всех исследованных реках в конце биологического лета отмечены достаточно близкие средние значения биомассы (табл. 5.11).

Очень сходно и соотношение экологических групп водорослей в перифитоне исследованных рек. Большая часть выявленных видов – эпилиты и эпифиты. Относительное обилие планктонных форм только на отдельных станциях в реках Кереть, Умба, Варзуга и Стрельна превышало 10%. Синезеленые планктонные водоросли родов *Aphanizomenon*, *Microcystis*, *Anabaena* и *Oscillatoria*, вызывающие цветение в водоемах умеренной зоны, лишь спорадически присутствовали в пробах.

По отношению к солености виды, определенные в перифитоне, относятся к олигогалобам. Вместе с тем обращает на себя внимание разнообразие галофильных форм, причем в перифитоне рек Карельского побережья встречены морские формы диатомовых (*Melosira nummuloides* *Brebissonia* sp., *Cyclotella* cf. *striata* (Kützing) Grunow, *Grammatophora* sp., *Hyalodiscus scoticus* (Kützing) Grunow, *Paralia sulcata* (Ehrenberg) Cleve) и зеленых (*Percursaria percursa*) водорослей.

Таблица 5.111.

Численность (N), биомасса (B) водорослей перифитона и содержание хлорофилла *a* (Chl) в прикрепленных сообществах исследованных рек (конец июля — конец августа)

Реки	Mean (min–max)		
	N	B	Chl
	10 ⁴ кл./см ²	мг/см ²	мкг/см ²
Летняя	43.6 (7.1–472.6)	1.8 (0.2–22.3)	8.2 (0.5–48.2)
Шуя БМ	5.6 (9.8–203.0)	0.9 (0.2–22.3)	8.0 (0.5–48.3)
Поньгома	52.6 (11.1–385.6)	2.1 (0.3–12.3)	5.2 (0.6–52.2)
Воньга	14.1 (3.0–280.0)	1.3 (0.1–16.1)	4.0 (0.3–90.3)
Кузема	38.8 (4.0–160.0)	1.8 (0.1–28.9)	3.2 (0.4–68.6)
Ундукса	34.5 (2.3–28.6)	2.4 (0.4–23.7)	1.2 (0.2–87.2)
Хлебная	28.1 (4.2–340.0)	1.9 (0.1–15.3)	3.8 (0.2–8.4)
Кереть	17.1 (0.6–520.0)	2.1 (0.4–28.7)	11.0 (3.2–41.6)
Пулоньга Кар.	38.5 (12.0–218.0)	2.0 (0.4–17.3)	9.8 (0.1–37.5)
Лувеньга	19.8 (9.2–240.2)	2.5 (0.4–28.4)	–
Пила	14.8 (1.2–540.2)	1.5 (0.2–18.9)	–
Умба	21.2 (6.5–1301.5)	4.4 (0.3–36.7)	15.1 (0.1–51.3)
Варзуга	21.5 (0.8–1620.0)	0.7 (0.4–18.1)	3.8 (0.2–142.0)
Чапома	28.0 (2.8–320.0)	3.2 (0.1–11.3)	–
Югина	15.0 (7.4–443.7)	1.1 (0.2–23.5)	–
Стрельна	34.2 (8.3–1080.0)	1.8 (0.4–34.5)	–
Пулоньга (Тер.)	11.5 (4.7–160.0)	2.4 (0.3–27.6)	–
Лиходеевка	16.2 (6.5–148.0)	1.7 (0.4–24.1)	–

В перифитоне исследованных рек наиболее разнообразно представлены β-мезосапробы. Основу доминирующего комплекса на большинстве станций составляют χ-, χ- олиго, и олигосапробные виды. Значения индекса Сладечека и Трофического Диатомового Индекса (TDI), рассчитанные для альгофлоры рек в целом, изменяются соответственно от 0.76 до 2.21 и от 1.1 до 2.7. Это позволяет отнести воды исследованных рек к олигосапробной зоне, характеризующейся как условно чистая.

Зоопланктон. В составе планктофауны исследованных рек бассейна Белого моря установлено 98 видов, из которых: 42 – Rotatoria (43%), 42 – Cladocera (43%), 14 – Copepoda (14%) (Круглова, 1983, 2003, 2005; Комулайн и др., 2004). Количество видов зоопланктона по рекам колебалось от 1 (В. Юзия) до 52 (Вяля). Основу видового разнообразия планктофауны рек составляли коловратки и ветвистоусые ракообразные (по 42 вида, 43% каждая группа). Среди коловраток преобладали представители сем. Euchlanidae, Synchaetidae, Trichocercidae, среди клadoцер – Chydoridae, Bosminidae, Daphnidae. Копеподы (14 видов, 14%) наиболее многообразно представлены видами из подсем. Cycloporinae, Eucycloporinae. Как известно, в формировании планктонной фауны текущих вод коловратки играют

первостепенную роль (Кутикова, 1970). Широкое распространение кладоцер обусловлено их способностью к партеногенетическому размножению и краткому периоду индивидуального развития (Мануйлова, 1964). Веслоногие ракообразные – самая малочисленная группа речного зоопланктона, вследствие значительной продолжительности метаморфоза и механического воздействия течения (Рылов, 1948) их роль повышалась лишь на участках рек, расположенных в непосредственной близости от озер. Разнообразие экологических условий обусловило относительное богатство фауны планктонных беспозвоночных рек, в ее составе присутствуют эврибионты, озерные, болотные и зарослево-прибрежные виды. Зоопланктон каждой из исследованных рек содержит озерные виды. Наиболее разнообразно представлены обитатели прибрежья и прибрежно-бентические виды, составляющие около 60% от общего состава зоопланктона, эвритопные и истинно планктонные виды – примерно по 20%. Количество видов и соотношение таксономических групп зоопланктона в реках различно. Наибольшее видовое разнообразие (33–52 вида) планктонной фауны наблюдается в реках, характеризующихся относительно высокой озерностью и большей площадью водосбора (Вяля, Кереть, Умба, Поньгома, Кузема, Лямукса), и частично объясняется более детальной их изученностью. В таких водотоках значительная часть планктоценозов создается представителями озерного комплекса (*Kellicottia longispina* (Kell.), *Asplanchna priodonta* Gosse, *Conochilus unicornis* Rousset, *Keratella cochlearis* (Gosse), *Bipalpus hudsoni* (Imhof), *Polyarthra* sp., *Heterocope appendiculata* Sars, *Eudiaptomus gracilis* Sars, *Holopedium gibberum* Zaddach, *Bosmina obtusirostris* Sars, *Leptodora kindtii* (Focke), *Daphnia cristata* Sars). Второй составляющей планктофауны рек являются многочисленные обитатели зарослевого прибрежья: коловратки (*Euchlanis*, *Lecane*, *Ascomorpha*, *Trichocerca*, *Notommata*) и ракообразные (*Chydorus*, *Alona*, *Alonella*, *Alonopsis*, *Acroperus*, *Eurycercus*, *Polyphemus*, *Sida*, *Macrocylops*, *Paracyclops*, *Acanthocyclus*), доминирующие чаще в реках с меньшим влиянием озер и на речных участках, удаленных от озер. Вследствие значительной заболоченности речных бассейнов в планктоне рек присутствуют (до 40% от общего состава зоопланктона) обитатели болотных вод (*Alona rectangula* Sars, *Alonella excisa* (Fischer), *Chydorus sphaericus* (O.F. Müller), *Bosmina longirostris* (O.F. Müller), *Polyphemus pediculus* Linne, *Paracyclops fimbriatus* (Fischer), *Mesocyclus leuckarti* Claus и другие).

Показатели количественного развития планктонной фауны рек относительно невысоки. Средняя численность летнего зоопланктона в реках варьировала от 0.01 (Кузрека) до 5.4 тыс. экз./м³ (Вяля); биомасса – от

0.0001 (Канда) до 0.21 г/м³ (Вяля) – табл.5.12. Основу численности и биомассы планктофауны в большинстве водотоков создавали ракообразные, главным образом, ветвистоусые (*Bosmina*, *Alonopsis*, *Alona*, *Alonella*, *Alonopsis*, *Holopedium*, *Polyphemus*). Максимальные значения количественных показателей зоопланктона (численность – более 17 тыс.экз./м³; биомасса – 0.73 г/м³) отмечены в реке Вяля, характеризующихся наиболее высокой озерностью (20%) и значительной площадью водосбора. Большая часть зоопланктона таких рек формируется за счет ракообразных и коловраток, поступающих из истоковых и русловых озер. В реках с меньшим озерным влиянием (Канда, Кузрека и др.) как по численности, так и по биомассе доминировали ракообразные и коловратки, обитающие в зарослевом прибрежье. В речном зоопланктоне среди отмеченных видов - индикаторов сапробности доминируют (более 80%) планктонные организмы, являющиеся ксено-, олиго- и олигобетта мезосапробами. Величина индексов сапробности для большинства рек не превышала 1.50, что указывает на принадлежность исследованных участков рек к олигосапробной зоне (чистые воды).

Т а б л и ц а 5 . 1 2

Средние количественные показатели зоопланктона исследованных рек

Реки	Численность, тыс. экз./м ³	Биомасса, г/м ³
Канда	0.02	0.0001
Лувеньга	0.07	0.003
Колвица	1.52	0.052
Порья	0.09	0.001
Умба	0.90	0.014
Вяля	6.30	0.211
Лямукса	2.78	0.037
Пила	0.37	0.012
Кузрека	0.01	0.003
Варзуга	0.06	0.001
Индель	0.81	0.005
Пана	0.23	0.002
В. Юзия	0.04	0.0002
Япома	0.03	0.0009
Ареньга	0.80	0.007
Кица	3.2	0.09
Пулоньга (Кар.)	0.66	0.05
Кереть	1.1	0.05
Хлебная	0.43	0.01
Ундукса	1.05	0.02
Кузема	4.7	0.17
Поньгома	0.05	0.002

В заключение следует отметить, что планктофауна исследованных рек характеризуется значительным разнообразием (98 видов), в основном, представлена видами, имеющими космополитное, палеарктическое и голарктическое распространение. Ее характеристики обычны для планктофауны северных рек (Круглова, 1991; Куликова, 1998; Рябинкин и др., 1999; Куликова, Власова, 2003).

Зообентос. Бентофауна пороговых участков исследованных притоков Белого моря включает представителей 14 групп (Nematoda, Oligochaeta, Hirudinea, Gastropoda, Bivalvia, Acari, Ephemeroptera, Plecoptera, Trichoptera, Coleoptera, Simuliidae, Chironomidae, Limoniidae, Hemiptera). Основу численности и биомассы зообентоса составляли личинки хирономид, поденок, ручейников, мошек и малощетинковые черви. В составе отрядов Ephemeroptera, Plecoptera и Trichoptera, представители которых определялись до вида, выявлен 61 вид (Барышев, Веселов, 2006). В большей части рек количественные характеристики бентоса изменялись в пределах от 1.5 до 6.5 тыс.экз./м² и от 2 до 8 г/м² (табл. 5.13). Это близко к величине численности и биомассы бентоса других рек рассматриваемого региона (Хренников, 1987). По классификации Ю.А. Шустова (1983) кормовую базу этих рек для рыб можно оценить как среднюю. Сравнение средних значений численности и биомассы бентофауны рек различных берегов Белого моря показывает, что наиболее скудные кормовые ресурсы рыб находятся в реках Терского берега. В составе зообентоса рек Белого моря из отрядов Ephemeroptera, Plecoptera и Trichoptera нами обнаружен 61 вид. Поскольку большинство донных беспозвоночных – это амфибиотические насекомые, то во всех обследованных реках отмечаются благоприятные кормовые условия для питания молоди лососевых рыб. В целом, средние количественные характеристики зообентоса обследованных рек сопоставимы и свидетельствуют о средней кормовой базе для рыб, однако выявленные отличия могут формировать разницу в кормовых условиях и сказываться на численности рыб.

Выводы

Исследованные притоки Белого моря по составу массовых видов фитоперифитона, зоопланктона и зообентоса имеют большое сходство с холодноводными, олиготрофными водотоками бореальной и субарктической зон. Различия в таксономическом составе фитоперифитона и водных беспозвоночных рек определяются их морфометрией, наличием проточных озер, степенью заболоченности водосборов и гидрологическим режимом конкретных участков. Присутствие морских галофильных форм в

Таблица 5.13

Средние количественные характеристики бентоса рек бассейна Белого моря

Группа	Плуньбга	Нильма	Сума	Поньтома	Куэзма	Кереть	Варуга	В. Юэня	Пана	Пятка	Фалатей	Ялома	Ареньга	Индра	Мера	Торожма	Золотипа	Куя	Софьяна
Nematoda	0,1*	2	50	25	25	17	208	200	17	125	0	258	133	8	0	37,5	0	0	0
	1	8	6	4	5	3	15	9	188	1148	0	24	6	8	0	2,5	0	0	0
Oligochaeta	58	17	25	375	63	117	540	83	533	900	33	375	508	8	62,5	0	0	25	62,5
	1617	3	4	237	104	699	830	225	883	639	43	523	1301	9	96,2	0	0	130	43,7
Hirudinea	8	0	0	4	88	33	10	0	0	0	0	0	8	0	0	0	25	0	0
	265	0	0	438	915	157	70	0	0	0	0	0	17	0	0	0	2487	0	0
Gastropoda	54	8	163	25	63	0	13	33	25	33	0	0	8	0	0	0	25	25	0
	30	586	318	34	125	0	33	82	220	81	0	0	20	0	0	0	225	12,5	0
Bivalvia	996	158	25	54	1063	92	2	0	0	0	8	0	8	0	0	0	0	0	0
	1588	87	83	11	573	148	01	0	0	0	1	0	7	0	0	0	0	0	0
Acari	0	17	325	121	13	7	18	200	108	67	100	217	117	50	0	162,5	2300	400	0
	517	283	3900	121	375	958	527	200	583	1317	225	3092	1558	100	25	0	1050	50	0
Ephemeroptera	598	233	3468	434	170	430	514	160	320	490	72	1545	909	38	2,5	0	2477,5	217,5	0
	92	75	338	88	175	83	58	392	133	375	133	742	1150	58	0	12,5	250	0	62,5
Plecoptera	292	44	583	98	455	88	172	43	98	58	41	133	265	9	0	2,5	282,5	0	10
	392	200	838	425	650	1517	173	167	117	108	50	175	233	25	12,5	87,5	2475	75	12,5
Trichoptera	2849	1257	1179	1777	2988	5449	199	584	248	260	13	431	1160	87	8,75	105	7062	105	3,75
	54	33	63	604	88	17	69	58	100	125	8	300	117	8	12,5	350	1337,5	177,5	2,5
Coleoptera	58	34	23	305	43	14	45	100	36	38	2	104	75	4	3,75	155	6237	445	2,5
	233	17	138	663	413	8	83	333	58	142	725	275	217	117	100	0	600	175	212,5
Simuliidae	113	25	98	523	389	2	86	98	62	158	804	58	188	100	17,5	0	312,5	112,5	61,2
	1408	608	1963	2196	1200	492	988	3492	700	1483	1508	1667	2392	2108	150	62,5	22725	2675	125
Chironomidae	465	223	344	457	264	81	163	452	165	266	296	253	651	261	12,5	20	1790	1300	17,5
	4	58	125	71	13	425	46	8	17	108	0	17	75	25	0	0	75	100	37,5
Limoniidae	2	42	256	3302	10	1041	102	123	63	506	0	8	311	122	0	0	1337	252	37,5
	3829	1492	7950	4792	4225	3767	2810	5167	2392	4783	2808	7117	6525	2508	375	713	42900	5300	538
Всего, экз.	7877	2523	6419	7648	6051	8118	2234	1924	2296	3664	1305	3108	4928	647	143	329	22638	2628	201

Примечание: в числителе указана численность, экз./м²; в знаменателе — биомасса, мг/м².

альгоценозах устьевых участков рек объясняется влиянием приливов. Исследованные реки находятся в естественном состоянии, что определяет таксономический состав гидробиоценозов, в которых преобладают виды, указывающие на отсутствие антропогенной нагрузки. Вода водоемов, судя по составу индикаторных видов, условно чистая, β -мезосапробная. Можно считать, что все исследованные водотоки имеют значительный очистной потенциал.

Полученные результаты являются оригинальными, поскольку ранее на этих реках специальных исследований в данном направлении не проводилось. Они могут быть использованы в качестве эталона при мониторинге малых рек и для дальнейшей ориентации природоохранной и рыбохозяйственной деятельности региона.

Глава 6

ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПОЛЕЙ

Нами не ставилась задача описать здесь все гидрофизические процессы и явления, т. к. их невозможно изложить в одной главе книги. Остановимся лишь на тех процессах, которые позволяют оценить современное состояние моря с точки зрения гидрофизики, показать изменчивость основных характеристик, использовать собранные сведения для моделирования термогидродинамики и экосистемы моря.

Белое море с точки зрения геофизической гидродинамики является одним из уникальнейших водоемов в мире. По запасам потенциальной энергии оно на два порядка превышает запасы потенциальной энергии открытого океана (Семенов, 2004). В Белом море присутствуют практически все физические явления, существующие в Мировом океане: приливы высотой до 10 м, сильные течения со скоростью до 2 м/с, сулои, боры, вихри, фронты и апвеллинги разного генезиса, волны Кельвина и Пуанкаре, захваченные волны и другие явления, – что делает его уникальным полигоном для экспедиционных и модельных геофизических исследований.

Наиболее яркая особенность Белого моря заключается в том, что оно имеет сильные индуцированные приливы, приходящие из Баренцева моря, при достаточно слабых собственных приливах. Большой объем пресного стока при высокой солености вод моря приводит к формированию такого явления, как маргинальные фильтры (Лисицын, 1994) в основных заливах и губах моря. Существенным для гидрологии Белого моря является наличие узкого и мелкого в смысле, который будет указан ниже, пролива, называемого Горлом Белого моря. Особенности расположения моря, связь с Баренцевым морем, большой объем речного стока, формирование маргинальных фильтров определяют особенности функционирования его экосистемы.

6.1. Течения, водообмен

Одним из первых особенности океанографии Белого моря описал в 1850 г. М.Ф. Рейнеке. В 90-х гг. XIX века гидрологический режим моря, его циркуляцию изучал известный русский ученый Н.М. Книпович, который выдвинул концепцию о двухслойной структуре беломорских вод. В

начале XX века другой исследователь моря – К.М. Дерюгин – выполнил определение границ Белого моря и его районов. Он определил водные массы Белого моря по южной границе Горла, не включая в состав моря Воронку и само Горло.

В.В. Тимонов (1925) и В.А. Березкин (1929), которые продолжили работы К.М. Дерюгина, показали, что глубинные воды Бассейна представляют собой водные массы, сформированные в Горле в зимний период. В Горле смешиваются потоки «питающего» течения, поступающего из Баренцева моря, и «стокового» течения с более пресными водами – из Белого моря. Впоследствии эти течения были названы именами Дерюгина и Тимонова (рис. 6.1). В Горле при интенсивном приливо-отливном перемешивании смешиваются большие массы воды, поступающие из Баренцева и Белого морей. В результате в Горле температура и соленость вод от поверхности до дна почти одинаковы, а на границе Горла с Бассейном формируется фронт. Летом течение Тимонова довольно интенсивно и препятствует проникновению горловских вод в Бассейн. Зимой же сток рек уменьшается и, как результат, несколько ослабевает течение Тимонова, водные массы из Горла попадают в Бассейн. Зимой водные массы Горла охлаждены до отрицательных температур и, как более тяжелые, стекают на большие глубины Бассейна. А.Д. Наумов и В.В. Федяков (Наумов и др., 1993) на основании обобщения ряда работ предложили схему течений Белого моря в следующем виде (рис. 6.1).

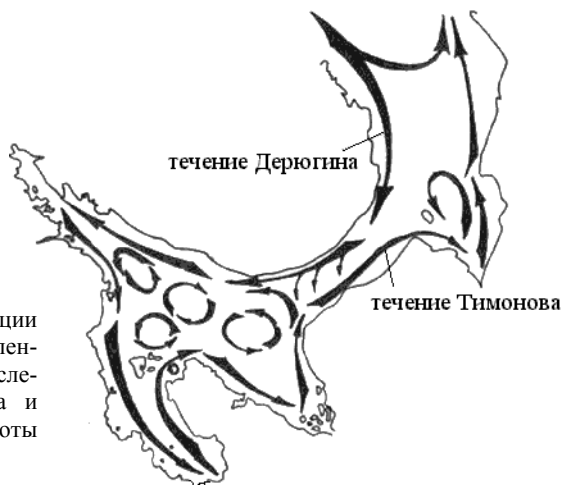


Рис. 6.1. Схема циркуляции вод Белого моря, составленная по результатам исследований К.М. Дерюгина и В.В. Тимонова (из работы Наумов и др., 1993)

Общая циркуляция вод Белого моря формируется за счет стока рек, атмосферных процессов, водообмена с Баренцевым морем, а также под влиянием приливов и неоднородностей рельефа дна и берегов.

По данным многолетних стандартных измерений Севгидромета, а также подробных гидрологических съемок, выполненных ВНИРО на НИС “Иван Петров” летом 1991 г., были выявлены особенности полей плотности моря. Схемы течений по данным этих съемок была построены в работе (Комплексные..., 1994). Эти схемы демонстрируют наличие устойчивого течения вдоль Зимнего берега, обусловленного стоком р. Сев. Двины, и циклонической циркуляции в Кандалакшском и Онежском заливах. Основное отличие от указанных выше схем – в существовании антициклонического круговорота в Бассейне Белого моря. Придонное, питающее течение в Горле Белого моря, поставляющее сюда соленую баренцево-морскую воду, имеет четко выраженную сезонную изменчивость. Если в марте оно при выходе из Горла поворачивает на запад в Кандалакшский залив, то в летний период основной поток проникает в Двинский залив. Это связано с сезонной изменчивостью стока р. Северная Двина, с максимумом в мае-июне и минимумом в феврале-марте. Четко прослеживается стоковое течение вдоль Зимнего берега, а также антициклонический вихрь у Летнего берега в июле. В марте, в период минимального стока Северной Двины, этот вихрь не наблюдается. Следует также заметить, что течение из Двинского залива в летнее время разделяется на две ветви, первая из которых следует в Горло вдоль Зимнего Берега, а вторая проникает в Бассейн, включаясь в циклонический круговорот. При этом придонные течения в марте и июле имеют компенсационную природу, т. е. направлены в сторону, противоположную поверхностному течению. Особенно наглядно это проявляется в Двинском, а также в Онежском заливе восточнее Соловецкого архипелага.

По результатам многолетних исследований А.И. Бабкова была построена схема течений Белого моря, напоминающая рассмотренные выше (Бабков, 1998). Общим является наличие питающего и стокового течений, циркулирующий циклонического и антициклонического вращения в Бассейне.

Важным фактором, определяющим циркуляцию вод Белого моря, являются приливные движения. Доминируют среди них полусуточные и суточные приливы (Инжебейкин, 2003). Разумеется, влияние приливной составляющей сказывается и на водообмене с Баренцевым морем. В случае учета приливных движений расход баренцево-морских вод существенно меньше, чем без их учета (Отчет..., 2003), что естественно, т. к. формирование

приливного придонного пограничного слоя приводит к существенному увеличению диссипации энергии. В период полной воды течения направлены из Горла в Бассейн, отмечается отток из Онежского залива в Бассейн и вдольбереговая циркуляция в Двинском заливе циклонического характера. В бассейне в это время заметна тенденция к циклоническому круговороту. Скорости постоянных течений в море составляют $10\text{--}15\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$, в узких акваториях и в районе мысов они выше ($30\text{--}40\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$). Скорости приливных течений существенно выше: в Горле и Мезенском заливе их величины достигают 250 , в Онежском заливе – $80\text{--}100$, в Кандалакшском заливе – $30\text{--}35\text{ см}\cdot\text{с}^{-1}$. В Бассейне скорости приливных течений в целом невелики и сопоставимы со скоростями постоянных течений (Гидрометеорология..., Вып. 1, 1991; Добровольский и др., 1982).

Все указанные выше схемы течений были разработаны на основе косвенных наблюдений (температуры, солёности воды, химических и биологических параметров), отдельных съёмок с использованием автономных буйковых станций и измерителей течений с борта научно-исследовательских судов. Длительных наблюдений (несколько месяцев) для построения надежных схем течений до сих пор проведено не достаточно. Кроме того, не хватает данных для оценки водообмена между Воронкой Белого моря и Баренцевым морем, между Бассейном, Горлом и Воронкой. Поэтому для изучения течений и водообмена с Баренцевым морем в широком диапазоне временных масштабов были разработаны и внедрены математические модели (Дианов и др., 1990, Семенов, 2004; Neelov, 2005). Новые разработки математических моделей термогидродинамики моря будут даны в следующих главах.

В работах Р.И. Мая и В.Р. Фукса (Май и др., 2004; Май и др., 2005) были описаны особенности динамики вод моря с учетом нелинейных эффектов приливных явлений в Белом море. Авторами было показано, что в результате нелинейности приливных явлений и нелинейного взаимодействия основных волн прилива возникает множество дополнительных гармоник с высокими и низкими частотами, а также остаточные течения. При этом, остаточная приливная циркуляция, хотя и имеет меньшие скорости по сравнению с приливными и непериодическими течениями, из-за непрерывности воздействия во многом формирует общую циркуляцию бассейна и влияет на перенос тепла, соли, планктонных организмов, биогенных элементов, загрязнителей, льда и прочих консервативных и неконсервативных примесей. Авторами были изучены механизмы генерации нелинейных приливных явлений. Показано, что существуют три основных типа нелинейности: мелководная, конвективная, фрикционная.

Установлено, что основные особенности термохалинной структуры вод Белого моря определяются приливным перемешиванием, приливной адвекцией, баротропной и бароклинной остаточной приливной циркуляцией. Вклад конвективной нелинейности в формирование нелинейных волн несколько уступает вкладу мелководной нелинейности. Фрикционная нелинейность вносит больший вклад, чем мелководная и, тем более, конвективная нелинейность, в формирование нелинейных приливных гармоник. При удалении мелководной, конвективной и фрикционной нелинейности, но при учете осушки, генерируются нелинейные приливные волны: в вершине Мезенского залива амплитуды нелинейных гармоник, вызванных приливной осушкой, составляют около 10% от амплитуд основных волн.

Существенный вклад сделан этими же авторами в изучение долгопериодных нелинейных приливных волн. По результатам моделирования Ф.Р.Фукс и Р.И.Май (Май и др., 2004) показали, что наибольшие амплитуды для всех нелинейных низкочастотных волн в морях Арктического бассейна отмечаются в Белом море, где вклад нелинейных эффектов максимален. Доказано, что приливы очень сильно влияют, а зачастую, и формируют термохалинную структуру вод Белого моря.

В работах Семенова (2004), а также Ф.Р. Фукса и Р.И. Мая (Май и др., 2005) показано, что в целом, бароклиная циркуляция Белого моря в приповерхностных слоях совпадает с баротропной, но модули остаточного течения поверхностного слоя несколько больше течений баротропной циркуляции. С глубиной схема циркуляции сохраняется, что объясняется интенсивным перемешиванием в мелководных частях моря, где наблюдаются существенные остаточные течения, а модуль скорости остаточных течений уменьшается с глубиной. Было доказано, что долгопериодные приливные волны S_{sa} , M_m , M_f , MS_f , существующие в разложении потенциала приливообразующей силы, значительно трансформируются в результате нелинейного взаимодействия основных волн.

Интересный вид нелинейности описан в работе Фукса и Мая (Май и др., 2004): показано, что существует еще один тип нелинейности – «нестационарность береговой линии», когда приливная осушка генерирует остаточные течения и нелинейные волны.

Пример изучения течений и водообмена через Горло по данным ADCP⁵

Новые данные о течениях и водообмене по натурным измерениям были получены в исследованиях ИО РАН в последние годы. Оригинальные

⁵ Авторы этого подраздела: к.ф.-м.н. В.Т.Пака, А.Н. Серебряный (Атлантическое отделение Института океанологии РАН).

измерения течений были сделаны на разрезе длиной 55 км через Горло Белого моря от м. Вепринского до м. Никодимского с помощью буксируемого ADCP Rio Grande 600 кН в августе 2006 г. с борта НИС «Профессор Штокман».

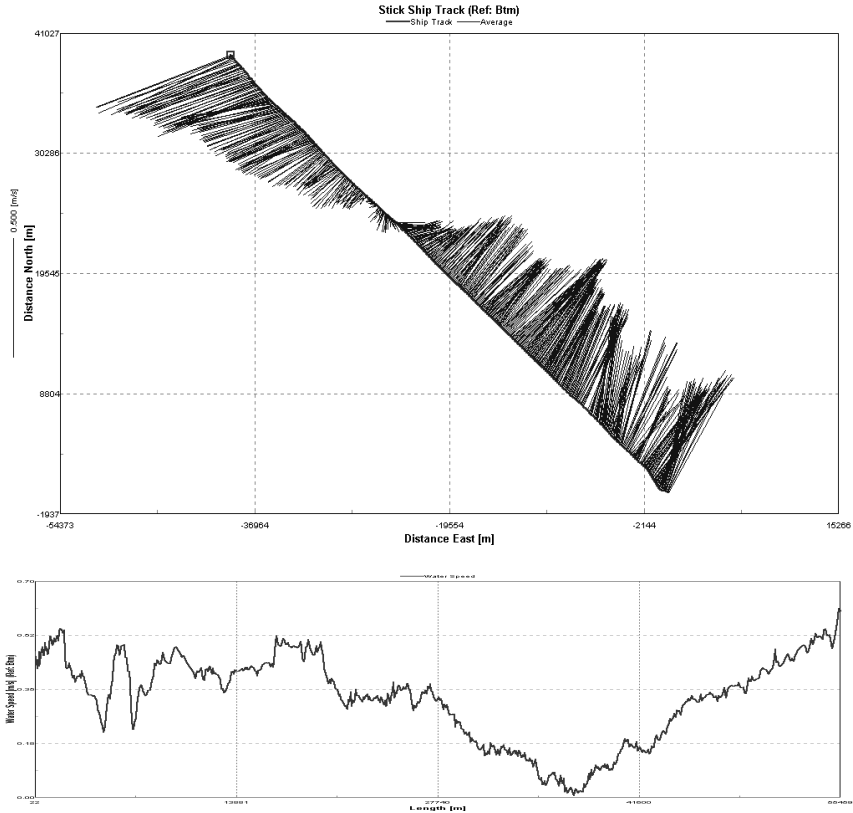


Рис. 6.2. Траектория разреза через Горло Белого моря и усредненные (по глубине) векторы течений, которые могут характеризовать мгновенный водообмен через Горло.

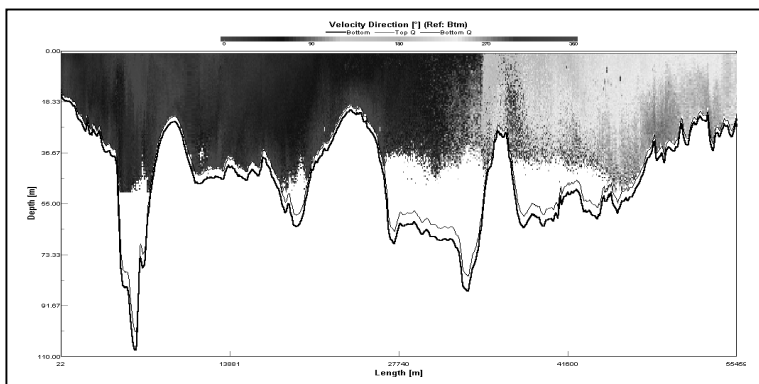
а) изменчивость направления течений на разрезе, б) изменение модуля течений

На рис. 6.2 показан разрез через Горло Белого моря. Представленная картина течений вполне укладывается в известные ранее схемы течений на разрезе через Горло. На этом рисунке видна смена направления течений на разрезе от северо-восточной направленности на юго-западную.

Анализ приливных фаз показал, что начало измерений попало в фазу отлива, а конец – в фазу прилива. Таким образом, почти на половине разреза был зарегистрирован режим течений, характерный для отлива, а на остальной части при проходе к Терскому берегу наблюдался приливный режим течений. Средняя скорость течения составляла около $0.5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ в отлив, и достигла такой же величины при наступлении прилива. Соответственно, вблизи момента малой воды наблюдалось ослабление течений.

На рис. 6.3 представлены двумерные сечения течений, полученные с помощью ADCP на разрезе через Горло.

а)



б)

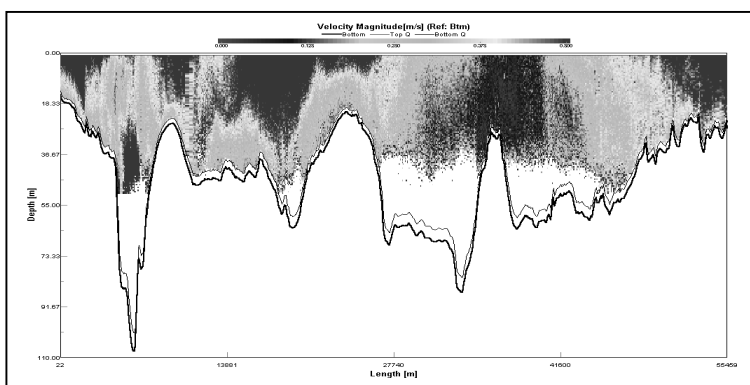


Рис. 6.3. Распределение направления (а) и амплитуды течения (б) по глубине на разрезе поперек Горла

На рис. 6.3. хорошо видна зона резкой смены отливного течения на приливное. Как в отлив, так и в прилив течение почти однородно по направлению с глубиной (отклонения по направлению не превышают 30 градусов для отлива и 60 градусов для прилива). Характерной особенностью оказывается уменьшение скорости течения с глубиной в обеих фазах прилива. В фазе отлива скорости течения на поверхности максимальны ($\sim 0.6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$), уменьшаются с глубиной, сохраняя у дна на глубинах около 40 м (предельный горизонт уверенной идентификации течений в нашем случае) высокие значения $0.25\text{--}0.30 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. То же самое относится и к фазе прилива, однако наблюдавшееся поверхностное течение здесь было более сильным (до $0.8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$). Следует отметить два исключения из вышеупомянутых закономерностей. При переходе к фазе прилива отмечалась обратная закономерность: сильное придонное течение на глубине 45 м до $0.5\text{--}0.6 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ при характерных значениях $0.3 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ в вышележащей толще. Интересная особенность течений отмечается над ложбиной в Горле глубиной около 110 м. Здесь течение существенным образом меняет свой характер по сравнению с другими районами на разрезе. Максимум скорости течения отмечается здесь не на поверхности, а на горизонте ниже 45 м. При этом формируется струя сильного течения, занимающая область по вертикали от глубины 20 м до глубин более 50 м (границы нашего наблюдения – 50 м). Поперечный размер ядра струи, где скорости течения превышают $0.5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ – 1.5 км при поперечном размере ложбины на горизонте ядра струи 3.3 км. Здесь же, над ложбиной, отмечается достаточно сильный вертикальный перенос вод от дна к поверхности моря (вертикальные скорости достигают величин $0.02\text{--}0.04 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$). Это – максимальные значения вертикальной составляющей скорости течений. Наличие такой вертикальной компоненты скорости течения свидетельствует о внутриволновом характере движения. Над ложбиной обнаружено узкое струйное течение, «занырнувшее» вниз и формирующее восходящий поток. Можно предположить, что природа этого образования связана с внутренним гидравлическим скачком у южного края ложбины, образованным потоком втекающей в нее стратифицированной жидкости.

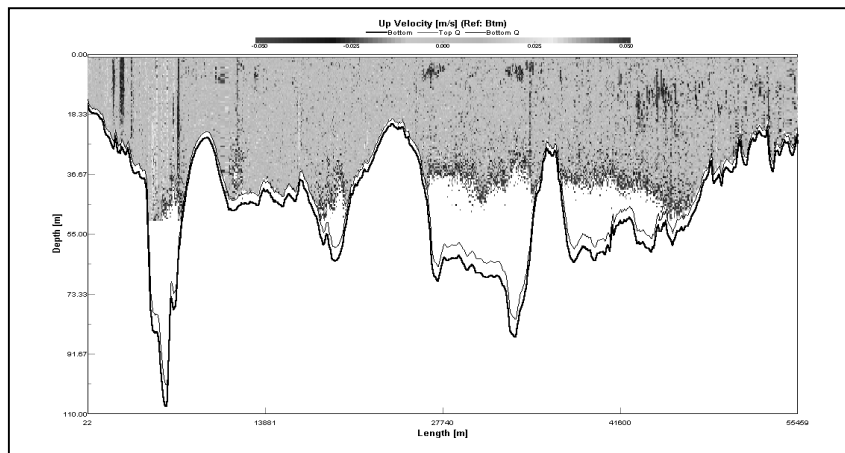


Рис. 6.4. Вертикальная компонента течений на разрезе

6.2. Водные массы

Настоящий раздел представляет в основном обзор опубликованных работ.

Основными источниками формирования водных масс Белого моря служат баренцевоморские соленые и материковые пресные воды. В результате смешения этих основных водных масс появляется ряд новых. Речные воды в чистом виде встречаются только в вершинах заливов, а баренцевоморские – в Воронке. Горло Белого моря занято водной массой, отличающейся постоянством характеристик по глубине, что является следствием интенсивного перемешивания в этом районе.

Наибольший интерес исследователей всегда вызывали водные массы Бассейна. Зона постоянной отрицательной температуры в глубинных частях Белого моря выделялась Н.М. Киповичем еще в 1899 г. Он высказал предположение, что источником ее образования могут служить воды Баренцева моря с повышенной соленостью. Охладившись в зимнее время до точки замерзания, эти воды через Горло попадают в глубокие впадины Бассейна. По данным К.М. Дерюгина, воды с температурой -1.4°C и соленостью 30‰ приурочены к центральному глубокому желобу, простирающемуся от меридиана о. Жижгин до района Средних Луд (Дерюгин, 1923). В теплое время года в этом районе температура ниже -1°C наблюдается уже с глубины 50 м. К.М. Дерюгин указал, что глубинные воды Белого моря не испытывают стагнации, благодаря чему донные холодноводные животные

находят для себя достаточно благоприятные условия даже в «...глубокой яме Кандалакшского залива». Позднее К.М. Дерюгин предложил другую гипотезу аэрации глубинных горизонтов за счет горизонтальных течений, проникающих в Белое море из Баренцева через Горло. Дальнейшие исследования В.В. Тимонова (Тимонов, 1947) показали, что в конце зимы по всей центральной части Бассейна ниже 50-60 м залегает незначительный по толщине теплый промежуточный слой, не охваченный конвекцией или иными видами перемешивания. Исходя из этого, В.В. Тимонов полагал, что вентиляция глубинных слоев происходит за счет горизонтальных течений из Горла. Концепция о трехслойной структуре водных масс в Белом море предложена К.В. Беклемишевым (Беклемишев и др., 1982) и А.Н. Пантюлиным на основании Т, S-анализа (Пантюлин, 1974). Эти авторы выделяют в Белом море три водных массы. *Глубинная* водная масса соответствует холодному арктическому слою, а *промежуточная* и *поверхностная* – умеренному. Промежуточная водная масса формируется из вод Горла летом, когда их соленость ниже, а температура – выше, чем зимой.

Однако их подход к анализу водных масс подвергается сомнению (Бабков, 1998), так как Т, S-анализ для верхнего 100-метрового слоя достаточно сложен из-за значительных в нем термохалинных колебаний (Мамаев, 1970), а средняя глубина Белого моря не превышает 70 м. Исходя из этого, выделенную К.В. Беклемишевым и его соавторами поверхностную водную массу можно рассматривать не как отдельную водную массу, а как некий слой, появляющийся только летом (Бабков, 1998).

Анализ водных масс, проведенный Бабковым и Голиковым (Бабков, 1998), свидетельствует о том, что структура водных масс Белого моря, как правило, двухслойна.

По данным гидрологических съемок с судов было показано, что в открытой части Двинского залива на границе с Бассейном существует соленостный фронт, который наиболее ярко выражен в поверхностном слое (Бабков, 1998; Комплексные..., 1994). На этом фронте отмечаются относительно сильные течения, наблюдается динамическая неустойчивость, которая приводит к генерации мезомасштабных вихрей с пространственными масштабами до десятков километров. В центральной части Двинского залива прослеживаются вихри циклонического типа, которые обусловлены формированием здесь крупномасштабной циркуляции вод циклонического вращения. В Бассейне из-за циклонического характера течений отмечается, по терминологии К.М. Дерюгина (Дерюгин, 1923), "полюс холода". Восточнее циклонального вихря отмечается антициклональный или "полюс тепла".

Таким образом, питающее течение является единственным источником возникновения холодных вод глубоководных впадин. Обновление этих вод происходит зимой, так как летом воды Горла существенно прогреваются и перемешиваются с более пресными водами.

По данным длительных наблюдений за температурой и соленостью воды были оценены основные особенности сезонной и многолетней их изменчивости. В результате анализа многолетних гидрологических съемок были выделены водные массы моря для разных сезонов года (рис. 6.6) (Гидрометеорология., Вып. 1, 1991). Зимой выделяются три водные массы: баренцевоморская, Воронки и Горла. Баренцевоморские воды занимают всю западную половину Воронки. Часть баренцевоморских вод, трансформируясь в придонных слоях, не поворачивает на север, а, следуя углублениям дна вдоль Терского берега, устремляется на юг в виде «питающего течения», прослеживаемого на всем протяжении Горла. В Горле Белого моря выделяются две водные массы – собственно Горла (на поверхности) и баренцевоморская (у дна). В Горле может наблюдаться и отсутствие стратификации при перемешивании. Весной в Белом море насчитывается восемь водных масс. В этот период с увеличением стока рек большую роль в гидрологической структуре моря начинают играть речные воды. В летний период особенности распределения водных масс имеют другой характер (рис. 6.5).

Значительный летний прогрев вод усиливает стратификацию и увеличивает градиенты в термоклине (рис. 6.6). Летом можно выделить шесть водных масс: баренцевоморскую, Горла, поверхностную Бассейна, промежуточную, глубинную и распресненных вод заливов. Вертикальная структура вод Бассейна такова: от поверхности до глубины 20 м расположены поверхностные воды, далее идет переходный слой мощностью около 20 м. После переходной зоны с 40 до 100 м находится промежуточная водная масса и, начиная со 100 м – глубинная.

На формирование водных масс большое влияние оказывают процессы перемешивания. В частности, приливное перемешивание формирует однородную вертикальную структуру вод Горла. Ветровое и конвективное перемешивание определяют толщину слоя поверхностных вод.

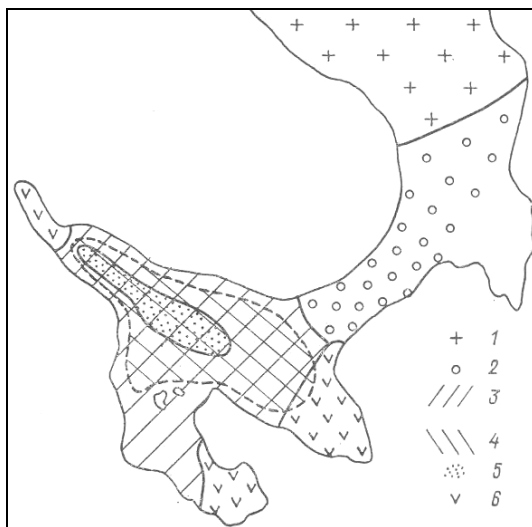


Рис. 6.5. Карта распределения водных масс летом:

1 – баренцевоморская; 2 – водная масса Горла; 3 – поверхностная водная масса Бассейна; 4 – промежуточная; 5 – распресненные воды заливов (Белое море, 1991)

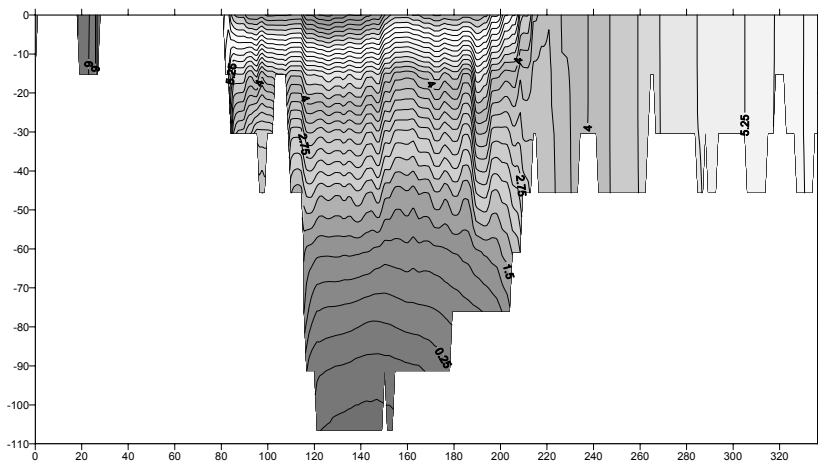


Рис. 6.6. Температура воды на разрезе Онежский залив – Горло – вход в Воронку в августе (По работе Е.В. Семенова, 2004)

Процесс формирования беломорских вод непосредственно связан с режимом течений, характером тепло-, соле- и водообмена с соседним Баренцевым морем, пространственно-временным распределением речного стока, ледовыми и приливыми явлениями. По среднемноголетним данным в Белое море в год поступает около 240 км^3 пресных вод с речным стоком. Вытекать должно примерно такое же количество трансформированных вод. В приведенных выше расчетах не учтен меняющийся в течение года средний уровень Белого моря. В водном балансе моря основное место занимает речной сток, который дает 95% поступления пресных вод в море, Елисов, 1985. Испарение с поверхности моря и осадки в течение года практически компенсируют друг друга. В течение года водный баланс моря и его акваторий положительный, т. е. речной сток (даже в условиях зимней межени) доминирует над испарением. Водообмен между Белым и Баренцевым морями имеет сезонный ход, определяемый, как отмечено выше, речным стоком. Весенний паводок в мае-июне дает около 50% годового поступления речных вод в море, соответственно возрастает в этот период и водообмен между морями. Годовой слой речного стока на всей площади моря составляет ~ 2.60 , слой осадков ~ 0.37 , испарение - порядка 0.24 м. Сезонные изменения среднего уровня Белого моря не превышают нескольких сантиметров, что вполне укладывается в пределы точности определения слоя вод стока (Инжебейкин, 2001). Учитывая сложный характер течений, наличие приливов, водообмен между Белым и Баренцевым морем может быть оценен в $\sim 2200 \text{ км}^3$ (Гидрометеорология., Вып. 1, 1991). Таким образом, при объеме вод Белого моря порядка 6000 км^3 , время обновления его вод может составлять около трех лет. В работе В.В. Елисова (Елисов, 1985) показано, что за счет неперiodических течений из Белого моря вытекает около 4000 км^3 . Таким образом, условный водообмен может составлять около 1.5 лет. На основании косвенных наблюдений за биологическими характеристиками было показано почти полное отсутствие в Бассейне моря баренцевоморских видов зоопланктона, что свидетельствует об ограниченном проникновении туда вод Баренцева моря.

Более корректно оценить водообмен между морями оказалось возможным по результатам моделирования. Ниже будут подробнее освещены особенности водообмена по данным моделирования (Filatov et al., 2005).

Многолетние исследования тепло- и массообмена (Арсеньева, 1961; Тимонов и др., 1939; Елисов, 1997; Елисов, 1985) показали, что в осенний период при охлаждении усиливается перемешивание вод, отмечается увеличение толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС), происходит

выравнивание температур вод Бассейна и Горла, а при уменьшении стока рек и усилении ветровой циркуляции отмечается поступление более теплых баренцевоморских вод в Бассейн. В зимний период отмечается наиболее интенсивное поступление солей в Белое море из Баренцева. В весенне-летнее время соленость вод моря уменьшается. В период межени соленость возрастает, причем наибольшее увеличение объема солей отмечено в северных акваториях моря (Воронка, Горло и Мезенский залив). Около 60% солей поступает в Белое море в зимний период.

В Бассейне с глубин 50–100 м до дна температура воды в течение года меняется мало и составляет около -1.4°C . В Воронке среднегодовая температура поверхностного слоя составляет 4.2, в Горле – 2.2, в Бассейне – 3.5, в средней части Онежского залива – 3.2, в Кандалакшском заливе – 4.0°C . Зимой в Бассейне, Горле и Воронке температура воды на поверхности колеблется в пределах от -1.7 до -1.2°C , в заливах диапазон ее колебаний меньше, а сами значения выше (от -0.7 до -0.5°C). Весной температура воды возрастает в среднем на 2°C в водах Воронки и Горла, на 4°C в Бассейне и на 6°C в заливах (Гидрометеорология..., вып. 1, 1991).

Летом в Бассейне и в заливах воды поверхностного слоя хорошо прогреваются. В августе температура воды поверхностного слоя составляет в среднем $14\text{--}16^{\circ}\text{C}$. В октябре воды поверхностного слоя в прибрежной зоне быстро охлаждаются, и их температура становится ниже температуры открытых вод моря. Прибрежные воды в сравнении с водами открытого моря в целом характеризуются более высокой температурой летом и меньшей осенью, зимой их температура ниже (за счет зимнего опреснения), а весной выше. Средние температуры вод для отдельных месяцев меняются в Воронке от 0.1 до 10.1, в Горле – от -1.7 до 8.4, в Бассейне от -0.4 до 10.6, в Онежском заливе – от -1.7 до 11.9, в Двинском и Мезенском заливах – от -0.5 до 13.0, в Кандалакшском заливе – от -0.4 до 14.4°C (Кузнецов, 1960; Океанографические..., 1991).

Сложный характер циркуляции, поступление больших объемов пресных речных вод и сильные приливы формируют в море сложный плотностной режим, приводят к образованию фронтальных зон. Одним из следствий приливного перемешивания является наличие в Белом море двух типов распределения температуры и солености воды по вертикали. Первый тип встречается в Бассейне, в глубоководных частях Кандалакшского залива (рис. 6.7).

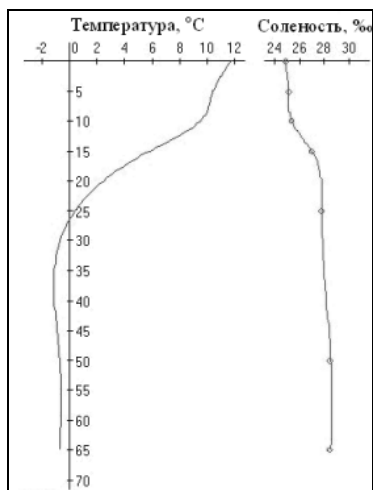


Рис. 6.7. Типичное летнее распределение по вертикали температуры и солености воды в Кандалакшском заливе в августе 2004 г.

Отличием его являются, в особенности летом, резко выраженная стратификация вод, наличие ВКС и сезонного термоклина, вертикальные градиенты температуры в котором могут достигать $1.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^{-1}$. Годовая амплитуда колебаний температуры в ВКС составляет $12\text{--}15^{\circ}\text{C}$. Ниже термоклина, в слое от 50–60 метров до дна, температура воды практически не меняется по глубине и в течение года и составляет $1.5\text{--}1.6^{\circ}\text{C}$.

Второй тип распределения температуры встречается в Горле, Воронке, Онежском и Мезенском заливах и характеризуется монотонным убыванием температуры с глубиной, а иногда и почти полной гомотермией. К.М. Дерюгин предложил называть первый тип "бассейновским", а второй – "горловским", согласно исторически сложившимся названиям районов Белого моря (Елисов, 1996).

На рис. 6.6 представлено распределение температуры и солености воды в Онежском заливе в районе Кеми при разном комплексе условий. Изменения скорости и направления ветра, ветрового волнения показаны на рис. 6.11–6.12, которые свидетельствуют о том, что при скорости ветра до $11\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ и ветровом волнении до 0.8 м, отмечается почти полное перемешивание до дна, т.е. до 9 м. А при ослаблении ветра до $1\text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ наблюдается восстановление ВКС. Соленость при

перемешивании во всем слое 9 м составляла 23%, при этом отмечалась «полная» вода при приливе. При ослаблении ветра, восстановлении ВКС соленость на поверхности моря стала равна 10‰. Заглубление ВКС, показанное на рис. 6.8.–6.9, обусловлено как приливом, так и ветровым перемешиванием (Рис. 6.10–6.11).

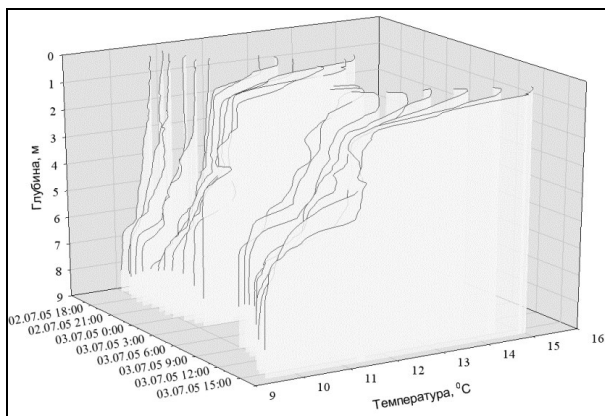


Рис. 6.8. Временной ход вертикального распределения температуры на ст. 15. в Онежском заливе, в районе реки Кемь. По данным измерений ИВПС КарНЦ РАН летом 2005 г.

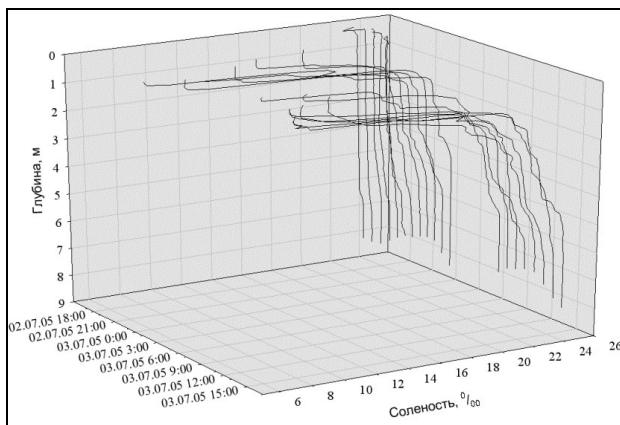


Рис. 6.9. Временной ход вертикального распределения солености на ст. 15. По данным измерений ИВПС КарНЦ РАН летом 2005 г.

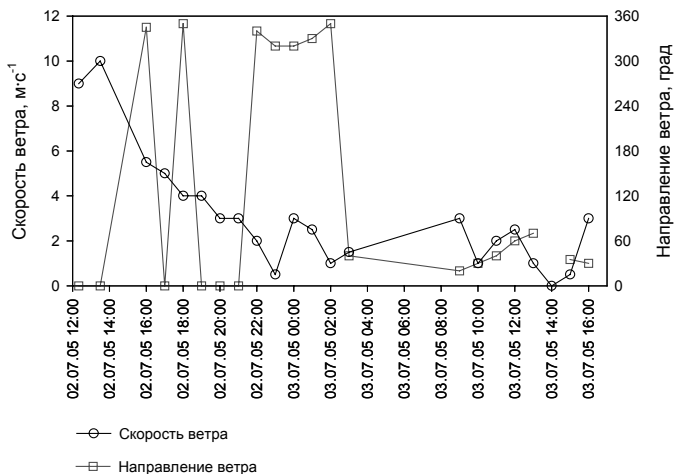


Рис. 6.10. Временной ход скорости и направления ветра летом 2005 г., ст. 15 в Онежском заливе

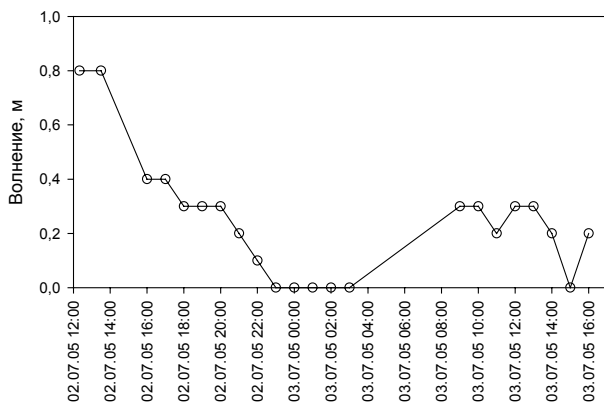


Рис. 6.11. Временной ход волнения. По данным измерений ИВПС КарНЦ РАН летом 2005 г. на ст. 15 в Онежском заливе

Зимой соленость повсеместно повышена. В Воронке и Горле значения солености на поверхности составляют 29–30, в Бассейне – 27–28‰. Наиболее опреснены устьевые области заливов: как правило, значения поверхностной солености прослеживаются до горизонтов 30–50 м, затем соленость плавно возрастает ко дну.

Весенний период для Белого моря характерен большим объемом стока речных пресных и относительно теплых вод, таянием морских льдов и интенсивным прогревом верхних слоев моря. На весенний период приходится до 70% годового прихода солнечной радиации. Средняя скорость ветра в мае-июне не превышает 5-6 м·с⁻¹.

6.3. Фронты и фронтальные зоны

Фронтальные зоны в Белом море имеют различную физическую природу. Одни образуются под влиянием речного стока (стоковые и эстуарные фронты), здесь же наблюдаются маргинальные фильтры (Лисицын, 2003), другие – под влиянием приливов и сезонного прогрева, особенностей дна и берегов (приливные и шельфовые фронты). Несмотря на разные причины возникновения, они имеют много общих черт. В Белом море встречаются все перечисленные ниже типы фронтов (Елисов, 1996; Семенов, 2004).

В.В. Елисов для Белого моря выделяет стоковые, пограничные и приливные фронты (см. работу: Европейский..., 1999). Ниже приведена модифицированная схема расположения фронтов, подготовленная по материалам работ (Биологические ресурсы Белого моря, 1990; Европейский Север..., 1999). Известно, что установившиеся фронты совершают перемещения на 15–20 км вдоль векторов приливных течений с полусуточным периодом.

Между Горлом и Бассейном, а также Двинским заливом и Бассейном выделяются четкие градиентные зоны. Онежская губа хорошо ограничивается по гидрологическому режиму Западной и Восточной Соловецкими салмами (см. рис. 6.12).

Основываясь на многолетних судовых наблюдениях, мы выделили некоторые дополнительные фронтальные зоны: субмеридиональный температурный фронт в Воронке, расположенный в полосе 42°10' – 42°30' в.д. (см. рис. 6.13). Этот фронт наиболее ярко выражен в зимний период и связан с действием течений в Воронке. Разница ТПВ 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 спутников серии NOAA и MODIS.

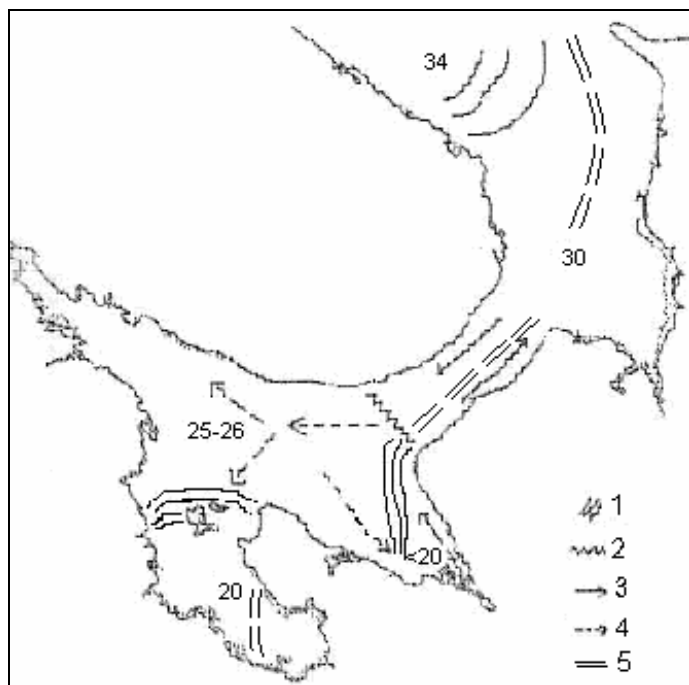


Рис. 6.12. Градиентные зоны Белого моря (1 – соленостная градиентная зона, 2 – граница между Горлом и Бассейном, 3 – поверхностные течения, 4 – глубинные течения; 5 – дополнительные температурные фронты). Цифрами показана соленость, в ‰. Выполнен на основе работ (Биологические ресурсы Белого моря, 1990; Европейский Север..., 1999)

Стоковые (или шлейфовые) фронты являются границей между пресными водами впадающих в море рек и морскими водами. Шлейфы вытянуты в море полосой, ширина которой составляет 5–15 км. Речной сток служит причиной возникновения шлейфовых фронтов, берущих начало в морской части дельт, вытягивающихся вдоль правого берега заливов и хорошо выраженных в течение всего безледного периода. Соленость стоковых вод всегда ниже морских. Все три крупные реки, впадающие в Белое море (Северная Двина, Онега, Мезень), текут с юга, и их воды на устьевом взморье в мае-сентябре теплее, чем воды прилегающих морских акваторий. В октябре температура стоковых вод становится ниже температуры вод открытого моря, в начале ноября она

близка к точке замерзания – формирование ледового покрова начинается именно в устьях рек. Стоковые фронты формируются под воздействием стока Северной Двины, Онеги, Мезени и рек Кандалакшского и Онежского заливов. Они возникают в том случае, если речные воды, не успев в существенной мере перемешаться с морскими в устье, образуют на поверхности сравнительно тонкий слой пресных или распресненных вод. В местах соприкосновения морских и речных вод появляются резкие горизонтальные градиенты солености. Непосредственно под линзой пресной воды возникает скачок плотности, который существенно затрудняет перемешивание (Елисов, 1996; Семенов, 2004).

Стоковые фронты регистрируются в основном по градиентам солености. В Двинском заливе, например, в отдельные годы градиенты солености достигают нескольких промилле на километр. Весной градиенты солености в зонах стоковых фронтов в среднем составляют $0.13\text{--}0.37\text{‰}\cdot\text{км}^{-1}$. Кроме соленостных, наблюдаются и температурные градиенты, поскольку весной речные воды теплее морских; в среднем они составляют $0.08\text{--}0.17^\circ\text{C}\cdot\text{км}^{-1}$. С началом летнего прогресса температура морских и речных вод выравнивается, и стоковые фронты становятся чисто соленостными.

В районе м. Зимнегорский стоковый фронт смыкается с приливным. Расслоенность водной массы по плотности столь велика, что шлейф вод с пониженной соленостью и повышенной температурой прослеживается до границы между Горлом и Воронкой. Наиболее четко стоковый фронт выражен в конце мая-начале июня, когда воды р. Северной Двины проявляются даже в Воронке: от м. Воронов они поворачивают к Терскому берегу, примерно у м. Городецкий отходят от берега на восток и в районе м. Канин Нос выходят в Баренцево море. Стоковый фронт проходит между водами Бассейна и трансформированными северодвинскими водами, соленость которых составляет $12\text{--}14\text{‰}$ (отмечены случаи и $7\text{--}8\text{‰}$), а температура – $5\text{--}6^\circ\text{C}$. Нередки ситуации, когда в конце мая температура воды на поверхности была $10\text{--}13^\circ\text{C}$, а на глубине 10 м не поднималась выше нуля.

Весной пространственное положение фронтов, особенно в начале их формирования, довольно неустойчиво. В начале июня при штилевых условиях скачок температуры через фронт может достигать $10\text{--}12^\circ\text{C}$. Усиление ветра приводит к быстрому понижению температуры поверхностных вод как в Бассейне, так и в стоковых водах, и к разрушению фронтальных разделов.

Приливные фронты связаны с неравномерным распределением по акватории морей скоростей приливных течений. Схема сезонных изменений положения приливных фронтов в Белом море показана на рис. 6.13, взятом из работы (Семёнов, 1994).

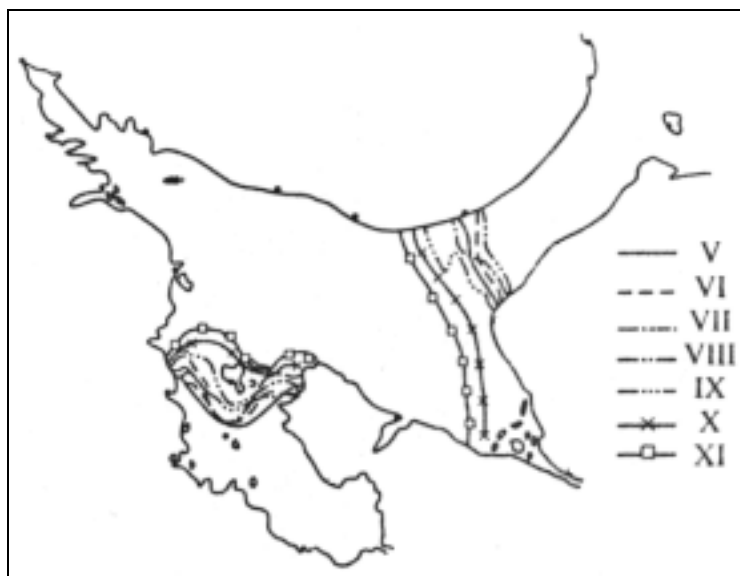


Рис. 6.13. Схема сезонных изменений положения приливных фронтов в Белом море (Семёнов, 1998)

Основными фронтами Белого моря следует считать "приливные". Первый из них проходит летом по линии м. Никодимский – м. Вепревский, а второй – в 5–10 милях к северу от Соловецких островов (рис. 6.13). Они разделяют две основные водные массы Белого моря с различным типом вертикального распределения гидрологических параметров: стратифицированную (глубоководной части) и перемешанную (мелководья).

Формирование приливных фронтов начинается в середине мая, после разрушения ледового покрова. В Горле весной отмечаются два устойчивых фронтальных раздела. Приливный фронт отделяет воды Бассейна с поверхностной температурой 2–3°C (нулевая изотерма проходит на глубине всего 5–8 м) от холодных перемешанных вод Горла с температурой ~0°C. В конце июля – начале августа приливные фронты выражены наиболее четко. Раздел проходит по изобате 40–50 м, и ширина фронта не превышает 8–10 км с горизонтальными градиентами порядка 1°C·км⁻¹. Соленость в перемешанных водах Горла весной приблизительно на 1.0, а летом – на 1.5–2.0‰ выше, чем в Бассейне. В это время перепад

температуры воды через фронт в Соловецких Салмах составляет 4–5°C. Фронтальный раздел здесь шире, чем в Горле (10–15 км), и проходит по изобате 50–80 метров. Горизонтальные градиенты не превышают 0.2–0.4°C·км⁻¹. В отличие от Горла фронт в Онежском заливе отделяет стратифицированные воды Бассейна от перемешанных вод Онежского залива, самого теплого залива Белого моря (Семенов, 2004).

В октябре температура воды на поверхности моря выравнивается, и фронты можно выделить только по данным глубоководных измерений. Съемки термических фронтов с самолета в 1980-х годах показали, что амплитуда колебаний положения фронта в пространстве составляет 5–8 км и зависит от величины прилива: в сизигию амплитуда приблизительно в 1.5 раза больше, чем в квадратуру. При горизонтальном градиенте температуры в районе фронта ~0.5°C·км⁻¹, изменчивость температуры воды за приливный цикл составит не менее 2.5–4.0°C. В стратифицированных районах изменчивость температуры за приливный цикл не велика и не превышает 0.1–0.3°C. Воздействие синоптических возмущений ветра не приводит к существенному изменению положения фронта в пространстве.

Характерная особенность приливных фронтов – изменение знака горизонтального градиента температуры воды с глубиной. Летом в Бассейне, на горизонтах 30 м и глубже, температура воды не поднимается выше нуля, в перемешанных водах температура по всей толще составляет 7–8°C. Пространственные колебания фронтального раздела за приливный цикл достаточно велики, определяются скоростью приливных течений и составляют 6–8 км. Таким образом, в период прогрева Бассейн как бы отгорожен фронтальными зонами от Горла и двух заливов – Двинского и Онежского. Что касается Кандалакшского залива, на северо-западе граничащего с Бассейном, то в него не впадают крупные реки, а приливные течения не превышают 10–30 см·с⁻¹, поэтому здесь нет условий для формирования фронтальных зон.

Апвеллинговые фронты связаны с подъемом на поверхность холодных глубинных вод. Особенно заметны апвеллинговые фронты в районе Соловецких островов.

Фронтальный раздел между беломорскими и баренцевоморскими водами. Этот фронт хорошо прослеживается в течение всего года, хотя перепады температуры и солености через него выражены не столь резко, как в приливных или шлейфовых фронтах. Соленость баренцевоморских вод всегда выше, чем беломорских, температура в мае-октябре ниже, а с октября по апрель – выше.

Маргинальные фильтры в заливах Белого моря. * Известно (Лисицын и др., 2003), что в Белом море существуют зоны, в которых происходят интенсивные преобразования веществ-загрязнителей. Это так называемые барьерные зоны или маргинальные фильтры, которые удаляют более 90% загрязнения во взвеси и около 40% в растворах (Лисицын, 1994). Барьерные зоны ограничиваются в эстуариях фронтальными зонами, которые характеризуются относительно высокими градиентами, в первую очередь, температуры и/или солености. Эти зоны характеризуются смешением пресных речных и соленых морских вод. Здесь происходит трансформация веществ, которая в конечном итоге и приводит к так называемым барьерным эффектам. Наличие зон, в которых проявляются барьерные эффекты, существенно уменьшает антропогенную нагрузку на Белое море.

Белое море имеет высокую геохимическую и слабую биохимическую активность функционирования экосистемы. Например, годовое поступление биогенных элементов составляет более половины их содержания в море (Максимова, 2001). В Белом море в процессе смешения речных и морских вод соленость возрастает неравномерно. В области взаимодействия речных и морских вод хорошо выделяются три зоны (Долотов и др., 2002; Долотов и др., 2004): 1) пресноводная или внутренняя (зона транзита), где минерализация воды изменяется незначительно; 2) зона смешения с наибольшими горизонтальными и вертикальными градиентами солености воды (в пределах этой зоны находится гидрологический фронт); 3) морская или внешняя зона. Зона смешения пресных речных и соленых морских вод является активным барьером для элементов с переменной валентностью. На дно осаждается максимальное количество взвеси с сорбированными на ней минеральными компонентами. Растворенные вещества коагулируют и выпадают в осадок (Скибинский, 2000). Наиболее высокие концентрации взвеси в поверхностном слое ($0.64\text{--}1.80\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) отмечены в Горле Белого моря, они уменьшаются в направлении Кандалакшского залива, где составляют $0.35\text{--}1.13\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$. Для вертикального распределения взвеси характерна более высокая концентрация в поверхностных водах (0–5 м) и ее уменьшение под пикноклином (Лисицын и др., 2003).

Установлено (Лисицын, 2003), что содержание взвеси в морской воде падает в среднем в 5 тыс. раз в самой непосредственной близости к речным устьям. Осадочное вещество, вносимое в море с речным стоком, накапливается в зоне смешения морских и речных вод, в основном, в пределах

* Подраздел написан при участии А.Н. Филатова

изохалин от 0 до 15‰. Под речной границей понимается зона перехода гидрокарбонатного вида вод в хлоридный при солености ~0.5‰. На отдельных участках зон смешения содержание взвеси оказывается выше, чем в реке и в прилежащем участке моря, и возникает «иловая пробка». Как показано в (Лисицын, 2003), под воздействием электролита морской воды здесь происходит коагуляция тонкой взвеси – ее минеральной и органической частей. «Возникают хлопья-флоккулы «эстуарного снега», часто тройного состава: глинистые частицы, склеенные органическим веществом и оксигидратами железа. Они захватывают из растворенных форм тяжелые металлы, загрязнения, а также биогенные элементы». «В этой зоне, несколько удаленной от реки, растворенные формы элементов и газы (углекислота) превращаются во взвесь – органическое вещество фитопланктона, и первичная продукция тут намного выше, чем в реке. В этом месте растворенные формы элементов (в том числе и загрязнений) переводятся через взвесь в донные осадки». А.П. Лисицын (Лисицын, 1994) называет это работой бионасоса 1-го рода (фитопланктонный). Кроме того, здесь рачки-фильтраторы (в основном копеподы) отфильтровывают весь объем эстуарных вод за одни-полтора суток. «Рачки-фильтраторы не только отделяют рассеянные тонкие частицы от воды и концентрируют их, но и преобразуют, связывают в крупные контейнеры-пеллеты, которые опускаются на дно с большой скоростью (100–500 м·сут⁻¹)».

Маргинальные фильтры недостаточно изучены в морях со значительными приливами, например, в Белом море. Наиболее подробно это явление в Белом и других морях рассмотрено в работах Лисицына и Шевченко (Лисицын и др., 2003). Термин «маргинальный фильтр» больше чем какой-либо другой отвечает сущности протекающих здесь, на окраине континента, процессов. На барьере река-море в зонах смешения вод рек Кандакашского залива концентрация взвеси практически не уменьшается при повышении солёности от 0 до 20‰, а в зоне смешения даже незначительно возрастает (Долотов и др., 2002; Долотов и др., 2004). Основной причиной такого необычного распределения взвеси на барьере река-море является низкая концентрация взвеси в реках, впадающих в Белое море со стороны Карелии и Кольского п-ва, и цветение фитопланктона в морской части барьерной зоны. Таким образом, классическое представление о том, что концентрация взвеси, фитопланктона, растворенного органического вещества должна постепенно убывать от реки в море, несколько меняется. Исследования, проведенные в Белом море ИВПС КарНЦ РАН в 2000–2006 гг., показали, что в распределении концентрации хлорофилла-а по данным контактных (с судна) и дистанционных (со спутника) из-

мерений наблюдалась существенная неоднородность. В период цветения наиболее высокие концентрации хлорофилла-а (до $5 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$) отмечались в Онежском заливе. В это же время в менее прогревом Двинском заливе отмечалась относительно малая площадь распространения и низкие концентрации хлорофилла-а (всего $1 \text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$), в Кандалакшском заливе – еще меньше.

При выборе индикаторов, характеризующих маргинальные фильтры (терминология по: Лисицын, 1994), следует исходить из того, что для определения характерных параметров используются данные контактных измерений с судов в режиме буксировки (флуориметрами) и зондирования, а также применяется аппаратура, установленная на спутниках (NOAA, SeaWiifs). Такой комплексный подход позволяет получить пространственное распределение параметров, характеризующих маргинальные фильтры (МФ). Очевидно, используемые нами спутниковые системы несколько ограничивали возможности измерений достаточно небольшим числом параметров и не позволяли оценить сложные химико-биологические процессы и явления, и тем более, изучить процессы в придонной области (Филатов, 2003).

Следует отметить, что сложный комплекс гидрологических и химико-биологических процессов должен отличаться в разных эстуарных зонах, так как различен состав вод, поступающих с реками в эстуарии, объем стока различаются они по морфометрии дна и берегов, характеру термогидродинамических процессов.

Важным достоинством определяемых дистанционными методами индикаторов для водоемов является то, что они дают возможность пространственного покрытия акваторий, синхронность, повторяемость, оперативность получения регулярных и экономически оправданных входных данных, возможность усвоения их в моделях и использования в информационных системах.

МФ ограничиваются в эстуариях фронтальными зонами, характеризуются относительно высокими градиентами, которые распознаются достаточно надежно даже по контрастам, градиентам температуры воды, а по данным контактных измерений более надежно фиксируются по солености воды. При этом необходимо учитывать, что разрешение используемой для этих целей аппаратуры спутников SeaWiifs и NOAA составляет 1 км , что не дает возможности определить границы МФ и фронтальных зон с более высокой точностью. Для Двинского, Мезенского и Онежского заливов Белого моря эта аппаратура вполне приемлема с точки зрения размеров МФ, так как рассматриваемые заливы имеют относительно малый наклон дна, мелководны и от-

личаются достаточно большим протяжением, барьерной зоны (несколько десятков километров). Для Кандалакшского залива, в котором объем стока рек относительно мал по сравнению с ранее упомянутыми заливами, определение МФ, фронтов со спутников затруднено.

Рассмотрим далее характерные индикаторы МФ и возможность использования выбранных спутниковых средств для их выделения.

Первым из индикаторов МФ выступает температурный фронт, возникающий в зоне смешения речных и морских вод. Температурные контрасты на поверхности исследуемых объектов позволяют достаточно надежно выделить фронты, ограничивающие МФ. Положение фронта меняется даже в течение суток из-за приливов, стока рек, а также в зависимости от погодных условий. В весенний период, когда сток максимален, наблюдается разница до нескольких градусов Цельсия в температуре воды по акватории между морской и речной водами, что позволяет достаточно просто по данным дистанционных измерений в тепловом диапазоне выделить фронт.

В Онежском заливе Белого моря распределение температуры воды в летний период на поверхности неоднородно, температура вод в августе вблизи впадения рек достигает 18-19°C, а с удалением от берегов она уменьшается до 14-15°C. Приведем пример распределения температуры поверхности воды в августе, по данным работы А.Н.Филатова (см. в кн. Климат., 2004) (рис. 6.14).

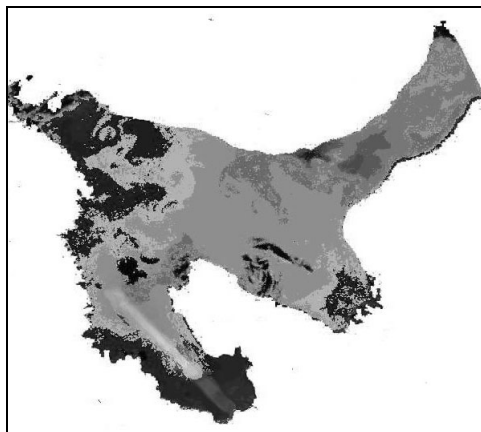


Рис. 6.14. Распределение температуры поверхности воды по данным AVHRR и скорректированной по результатам подспутниковых судовых измерений 21 августа 2000 г. на разрезе от устья р.Онеги к Соловецким островам

Ниже дан температурный профиль от устья р.Онеги до Соловецких островов, полученный в августе 2001 г.

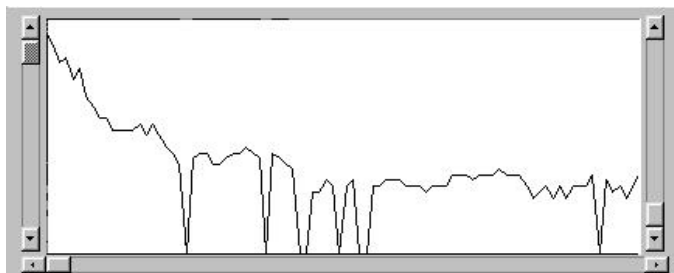


Рис. 6.15. Профиль ТПВ от устья р. Онеги до Соловецких островов по данным синхронных подспутниковых измерений с НИС «Эколог»

По приведенным спутниковым данным проявляются фронтальные зоны на границе Горла и Бассейна, а также в районе эстуариев. Наиболее ярко в это время года выделяется фронтальная зона в Онежском заливе. Перепады температуры воды здесь достигают $0.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{км}^{-1}$. Имеется большой опыт определения температуры воды по данным съемок со спутника типа НОАА аппаратурой AVHRR с учетом тонкой холодной и теплой пленок, разработаны стандартные алгоритмы обработки данных с учетом атмосферной коррекции. Наиболее отработаны эти методики в Институте космических исследований. Другими возможными индикаторами МФ могут быть особенности распределения концентрации хлорофилла-а, растворенного органического вещества (РОВ) и минеральной взвеси (МВ).

По данным натуральных наблюдений с судна, выполненных ИВПС КарНЦ РАН, и дистанционных спутниковых измерений в распределении хлорофилла-а наблюдается существенная неоднородность. В период цветения наиболее высокие концентрации до $5\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$ отмечаются в вершине Онежского залива недалеко от впадения реки Онега, однако при этом отмечается определенная пятнистость этого распределения. Эти же особенности распределения химико-биологических параметров в эстуарной зоне в Белом море описаны в работе академика А.П. Лисицына (Лисицын, 2003). В то же время в мелководном прогретом Двинском заливе в исследуемый нами период (июль-сентябрь) отмечаются относительно небольшие площади заметного по данным спутника SeaWiFs и по наблюдениям с судна распространения этих параметров при очень низких концентрациях хлорофилла-а, около $1\text{ мг}\cdot\text{л}^{-1}$, а в Кандалакшском заливе эти значения были еще ниже.

На рис. 6.16 представлен профиль распределения концентрации хлорофилла-а от устья р.Онеги до Соловецких островов по данным SeaWifs за то же время, что и разрез по температуре воды, на котором видно резкое, типичное для фронтальной зоны изменение концентрации хлорофилла-а и других параметров, определяемых со спутника. Резкие перепады значений концентрации хлорофилла-а соответствуют относительно небольшим пятнам повышенной концентрации.

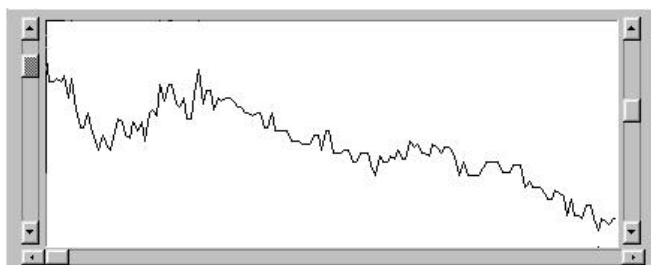


Рис. 6.16. Профиль распределения концентрации хлорофилла-а от устья р.Онеги до Соловецких островов по данным синхронных подспутниковых измерений с НИС «Эколог»

Дополнительную информацию о положении МФ дают распределения МВ и РОВ. Однако, по данным распределения МВ, полученным со спутника, не заметно фронтальной зоны в районе Горла. Как показано А.П. Лисицыным, взвешенное вещество на 90% оседает непосредственно в районе впадения реки. Распределение же хлорофилла-а, как отмечалось выше, не является равномерным, а отличается большой пятнистостью. При этом, максимальные значения этого параметра зафиксированы за фронтальной зоной в сторону открытого моря, что хорошо видно по данным измерений на разрезе от реки в сторону Соловецких островов.

По данным измерений с судна в режиме буксировки заметны резкие изменения указанных параметров (ТПВ, ХЛФа, МВ и РОВ), которые соответствуют положению внешней (морской границы) МФ. При этом, как указывал А.П. Лисицын по данным контактных корабельных исследований уменьшение всех показателей начинается примерно в одном и том же месте, что позволяет нам определить зону распространения речных и морских вод достаточно надежно. По данным распределения солености воды, полученным нами во время судовых измерений, оказалось, что в Онежском заливе она составляет 22–25‰, где происходит наибольшее выпадение осадков и трансформация поступающих с речными стоками

загрязняющих веществ. По результатам исследований контактными методами с судна с постановкой измерений на АБС седиментационных ловушек для определения взвесей в последние годы удалось выяснить важные особенности исследуемых зон (Шевченко и др., 2001). В процессе смешения речной и морской воды соленость возрастает неравномерно. Зона смешения пресных сточных и соленых морских вод является активным барьером, здесь на дно осаждается максимальное количество взвеси с сорбированными на ней минеральными компонентами. На отдельных участках зон смешения содержание взвеси оказывается выше, чем в реке и в прилежащем море, и возникает т.н. «киловая пробка» (Лисицын и др., 2003). Прозрачность вод и мощность слоя фотосинтеза растут по мере удаления в море. Возникает зона наибольших продукций фитопланктона.

Таким образом, комплексный анализ данных показал, что параметры, которые можно измерить со спутников SeaWiFS и NOAA, в сочетании с контактными измерениями могут использоваться для выявления особенностей распространения и трансформации вод, изучения фронтов и МФ (Филатов А.Н.).

Важным параметром определения положения исследуемых зон, как было показано, является соленость воды, диапазон расположения барьерных зон для Белого моря составляет по солености от 0 до 22‰. При этом фронтальные разделы могут отмечаться и в видимом диапазоне. По данным съемки видеокамерой с самолета-лаборатории ПИНРО (В.И.Черноок, частное сообщение) в районе Онежского и Двинского заливов хорошо видны фронтальные разделы (барьеры), см. рис. 6.17.

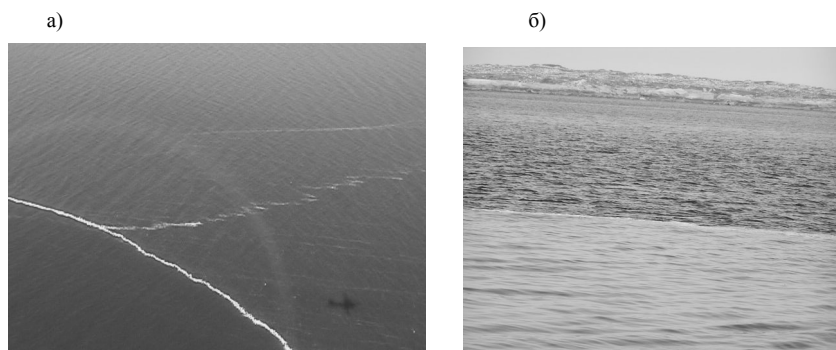


Рис. 6.17. Фронтальные разделы в районе Онежского залива Белого моря по данным измерений в видимом диапазоне с самолета-лаборатории ПИНРО: а) данные В.И. Черноока (2001, персональное сообщение); б) с борта НИС «Эколог»

Эти фотографии демонстрируют наличие очень высоких градиентов (фронтальная зона имеет размеры метры-десятки метров) не только температуры воды (что подтверждается данными НОАА), но и других параметров.

Параметры, определяемые надежно дистанционными методами – ТПВ, концентрация хлорофилла-а, РОВ, минеральная взвесь, являются индикаторами положения маргинальных фильтров.

6.4. Изменчивость температуры, солености и уровня моря

Введение

Ранее проведенный анализ длительных гидрометеорологических наблюдений (до 1990 г.) позволил установить, что линейные тренды для всех исследованных районов Белого моря имеют тенденцию к понижению температуры и повышению солености на фоне ярко выраженных 11-летних синхронных колебаний этих параметров (Смирнова и др., 2001). Изучение данных глубоководных станций показало, что крупномасштабные процессы оказывают основное влияние на изменчивость полей температуры и солености в районах фронтальных зон, и их влияние возрастает по мере продвижения от поверхности моря до дна, где указанные процессы формируют до 50% изменчивости температуры и солености.

Это обстоятельство свидетельствует о том, что придонные поля температуры и солености наиболее достоверно отражают климатическую изменчивость Белого моря. Спектры рассматриваемых рядов содержат колебания с периодами 11 и 18 лет по температуре и 19-20 лет по солености (Гидрометеорология., Вып. 1, 1991). Большой частью квазициклические изменения температуры и солености глубинных вод происходят асинхронно. Так, в период с 1945 по 1951 гг. повышению солености соответствовало понижение температуры воды, во время наиболее существенного понижения солености в 1953–1963 гг. отмечались повышенные значения температуры. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что в придонных слоях холодные и соленые воды циклически замещаются относительно теплыми и менее солеными.

Глубинные воды формируются в течение непродолжительного периода (порядка месяца), когда над Белым морем устанавливается полярный антициклон. Меридиональные ветры усиливают водообмен Баренцева и

Белого морей и увеличивают поступление вод с высокой соленостью в Белое море. В суровые зимы происходит, как правило, понижение температуры и повышение солености глубинных вод. Однако эти изменения менее значимы тех изменений, которые обусловлены упомянутыми ранее межгодовыми и квазициклическими колебаниями.

Остановимся кратко на особенностях крупномасштабной изменчивости гидрометеорологического режима Белого моря. В последние годы отмечаются заметные изменения климатических характеристик региона Белого моря. В работе А.И.Смирновой с соавторами (Смирнова и др., 2001) показано, что изменчивость термохалинного режима, колебаний уровня моря отличается высоким вкладом низкочастотных составляющих в межгодовую изменчивость, что демонстрирует влияние глобальных климатических процессов на формирование долгопериодной изменчивости элементов режима моря. Значения температуры воды, солености и уровня моря до середины 1990-х годов характеризовались положительными аномалиями, что соответствует выявленным современным тенденциям.

Соленость в Белом море испытывает существенные сезонные и межгодовые изменения. Данные по ст. Чупа (Кандалакшский залив) показывают, что за последние 40 лет в этом районе значения солености несколько увеличились (Данные ЗИН РАН). В течение года в придонном слое Чупинской губы соленость изменяется незначительно по сравнению с её изменчивостью на поверхности. При этом достаточно устойчивый галоклин препятствует ветровому перемешиванию воды в губе. Среди причин увеличения температуры и солености воды в этом районе моря можно отметить изменчивость водообмена с Баренцевым морем, колебания в поступлении пресного стока, обусловленные крупномасштабными климатическими процессами. Особенности изменчивости стока рек были рассмотрены в предыдущих главах книги.

Материалы и методы обработки данных

На рис. 6.18 приведена схема размещения станций наблюдений опорной сети Росгидромета как на водосборе, так и на акватории моря (на островных станциях).



Рис. 6.18. Схема расположения гидрометеостанций и постов

Таблица. 6.1

Данные, использованные для анализа изменчивости гидрофизических параметров Белого моря

Станция, пост, район	Период наблюдения	Данные
- ст. Каневка	(1949-1999 гг.)	Температура приземного слоя атмосферы и атмосферные осадки (среднемесячные)
- ст. Кандалакша	(1912-1995 гг.)	
- ст. Лоухи	(1927-1994 гг.)	
- ст. Зашеек	(1932-1999 гг.)	
- ст. Кестеньга	(1961-1991 гг.)	
- ст. Энгозеро	(1961-1991 гг.)	
- ст. Кемь-порт	(1916-1995 гг.)	
- ст. Колежма	(1937-2002 гг.)	
- ст. Онега	(1936-1995 гг.)	
- ст. Архангельск	(1814-2000 гг.)	
- пост Шуерецкое	(1959-1999 гг.)	
- пост Нюхча	(1945-1999 гг.)	
- р. Поной	(1933-1998 гг.)	
- р. Умба	(1932-1998 гг.)	
- р. Варзуга	(1935-1998 гг.)	

БЕЛОЕ МОРЕ

- р. Ковда - р. Нижний Выг - р. Онега - р. Северная Двина - р. Мезень - р. Кереть - р. Кемь - р. Чаваньга	(1926-1987 гг.) (1914-1987 гг.) (1914-1975 гг.) (1882-1975 гг.) (1921-1975 гг.) (1931-1987 гг.) (1917-1995 гг.) (1964-1998 гг.)	
- ст. Кандалакша - ст. Умба - ст. Чаваньга - ст. Сосновец - ст. Унский маяк - ст. Жижгин - ст. Разнаволок - ст. Соловки - ст. Гридино	(1948-1985 гг.) (1934-1985 гг.) (1952-1985 гг.) (1936-1985 гг.) (1959-1985 гг.) (1939-1985 гг.) (1921-1985 гг.) (1924-1985 гг.) (1947-1985 гг.)	Уровень моря (среднегодовые)
Широтная зона 50-70 с.ш. Европейской территории РФ	(1951-2000 гг.)	Индексы циркуляции атмосферы по классификации В.Я. Вангенгейма – А.А. Гирса.
- Кандалакша - Гридино - Жужмуй - Инцы - Чаваньга - Соловки - Жижгин - Мудьюг - Унский маяк	(1977-1999 гг.)	Температура поверхностного слоя (ТПС) (дискретность 6 ч.)
Рейдовая станция Д-1 (Чупинская губа)	(1961-2004 гг.)	Температура водной толщи с шести горизонтов (0, 10, 15, 25, 50, 65 м) (ежедекадные)
Акватория Белого моря	(1891-2004 гг.)	Судовые измерения температуры поверхностного слоя в различные годы
Акватория Белого моря	(1999-2005 гг.)	Экспедиционные исследования полей температуры и солёности в различные сезоны
Акватория Белого моря	(1983-2005 гг.)	Данные спутников NOAA, SeaWifs, MODIS о ТПС и распределении хлорофилла-а

Для исследования изменчивости температуры поверхностного слоя воды Белого моря были использованы материалы станций, приведенных на рис. 6.19.



Рис. 6.19. Станции, на которых выполнялись многолетние непрерывные и судовые наблюдения за температурой поверхности воды

- — станции многолетних наблюдений;
- — станции судовых наблюдений.
- — «вековые» разрезы

Кроме того, использовались данные ИВПС КарНЦ РАН, полученные во время экспедиционных исследований полей температуры и солёности Белого моря для различных сезонов за период 1999–2005 гг. (обработано 216 станций).

Основная задача данного раздела – показать закономерности изменчивости океанологических характеристик Онежского залива Белого моря. Для этого были собраны данные длительных измерений на постах ОГМС Росгидромета за период более 20 лет, что позволило изучить изменчивость температурного режима Белого моря в интервале от мезомасштабной до межгодовой, которая исследована слабо по сравнению с изменчивостью уровня моря в этом же диапазоне (Инжебейкин, 2003).

В работе были поставлены следующие задачи:

- Выявить особенности ТПВ Белого моря и других океанологических характеристик.
- Оценить квазипериодические флуктуации и тренды и определить связи изменчивости ТПВ Белого моря с другими гидрометеорологическими параметрами.

- Оценить вклад в общую дисперсию различных видов изменчивости ТПВ Белого моря.
- Изучить реакцию океанографических параметров Белого моря на климатические изменения.

Анализ изменчивости температуры воды

Многолетние ряды данных девяти прибрежных и островных станций с дискретностью 6 часов за период 1977–1999 гг. были получены из ВНИИГМИ-МЦД (г. Обнинск); данные по декадной станции Д-1 за период 1961–2003 гг. (температура воды с горизонтов: 0, 10, 15, 25, 50, 65 м) – в ЗИН РАН; данные многолетних судовых измерений ТПВ в различные годы за период 1891–2002 гг. – в ММБИ КНЦ РАН (обработано 13185 станций). Использованы данные ТПВ со спутников серии NOAA за последние 30 лет.

Температурный режим особенно хорошо изучен в отдельных районах Белого моря (например, в Чупинской губе, Онежском заливе, Двинском заливе). Съёмки полей гидрофизических параметров, полученные в ходе исследовательских рейсов судов различных организаций, не являются синхронными, выполнены часто в разные синоптические циклы и проведены за достаточно продолжительный промежуток времени (более семи суток). Поэтому основная часть анализа нами выполнена по среднесуточным выборкам девяти гидрологических станций, где длина непрерывных рядов наблюдений равна 23 годам.

К анализу данных длительных наблюдений ТПВ Белого моря применялись стандартные методики вероятностного статистического анализа (Рожков и др., 1990). Часть данных содержала пропуски, которые мы заполнили методом полиномиального скользящего среднего (Кендалл и др., 1976). При заполнении пропусков за основу были взяты наиболее полные – без пропусков – непрерывные температурные ряды станций Инцы и Жижгин. Ход температуры поверхностного слоя воды Белого моря по станциям Жижгин, Унский маяк и Мудьюг имеет идентичный вид, так как станции расположены практически в одном гидрологическом районе моря и находятся на относительно небольшом расстоянии друг от друга. По тем же причинам идентичный ход температуры поверхности воды наблюдается на станциях Гридино и Соловки. Также в одну группу можно выделить температурный ход станций Чаваньга и Кандалакша.

Для каждого временного ряда были рассчитаны основные статистические характеристики, оценены линейные тренды океанографических параметров,

проведено нелинейное оценивание с применением математической модели и осуществлен спектральный анализ. Для расчета изменений ТПВ в будущем при анализе данных по модели линейного тренда мы использовали экстраполяцию значений 23-летних рядов ТПВ Белого моря. При нелинейном оценивании применялась стохастическая модель внутригодового хода ТПВ, разработанная в ИВПС КарНЦ РАН (Ефремова и др., 1992). При использовании спектрального анализа ряды среднесуточных температурных данных по девяти гидрометеостанциям за 23 года (1977–1999 гг.) были приведены к стационарному виду. Длина среднесуточных рядов составляла более 8 200 значений. Имеющиеся данные позволяют корректно исследовать изменчивость ТПВ в диапазоне от нескольких лет до нескольких часов.

Для изучения особенностей изменчивости ТПВ Белого моря, помимо традиционно используемых корреляционного и спектрального анализов, применены современные методы исследования изменчивости гидрометеорологических наблюдений, в частности, использовался вейвлетный анализ, что особенно важно для разделения близко расположенных квазипериодических составляющих.

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 карты регулярных спутниковых измерений ТПВ, начиная с 1983 г.

В табл.6.2. представлены основные статистические характеристики рядов температурных данных.

Т а б л и ц а 6 . 2

Основные статистические характеристики температуры поверхностного слоя Белого моря по среднесуточным данным

Станция	Солов-ки	Гри-дино	Жуж-муй	Инцы	Канда-лакша	Ча-ваньга	Му-дьог	Жиж-гин	Унский маяк
Среднее, °С	3,73	3,69	3,34	3,08	3,87	3,53	5,24	2,84	4,19
Станд.ошибка, °С	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,08	0,05	0,07
Медиана	0,43	0,30	0,70	0,48	1,10	1,30	0,08	0,88	0,83
Дисперсия, °С ²	5,89	5,48	5,35	5,03	5,05	4,54	6,99	4,72	6,31
Эксцесс	-0,98	-0,89	-1,22	-1,16	-0,61	-0,51	-0,86	-1,25	-0,98
Асимметрия	0,72	0,76	0,59	0,62	0,88	0,84	0,82	0,55	0,70
Минимум, °С	-1,95	-2,00	-1,90	-1,60	-1,78	-1,95	-1,70	-2,00	-1,90
Максимум, °С	18,28	17,90	16,40	16,55	18,68	19,10	24,50	15,70	21,60

Рассмотрим результаты изучения изменчивости ТПВ Белого моря в масштабах от межгодовой до мезомасштабной.

Межгодовая изменчивость. На графике 20-летнего хода среднегодовой ТПВ Белого моря, построенном нами по 6-ти станциям (рис. 6.20), отчетливо прослеживается изменчивость ТПВ с временными масштабами 4-5 лет, которая характерна практически для всех районов Северной Атлантики.

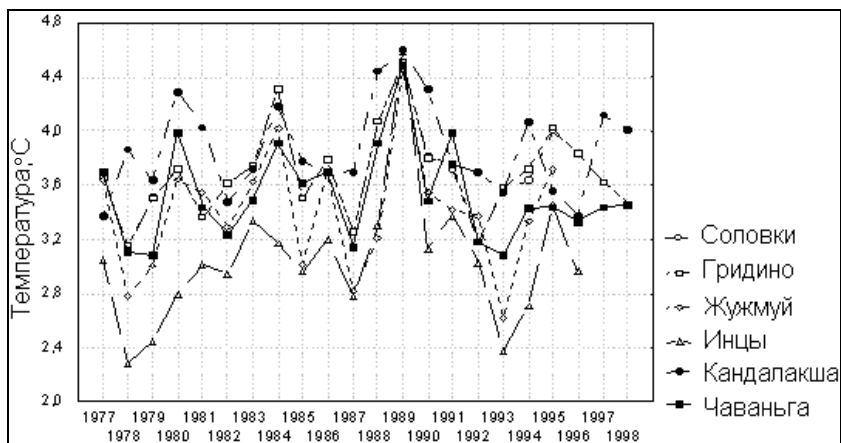


Рис. 6.20. Изменчивость ТПВ Белого моря по среднегодовым данным шести ГМС (Климат Карелии, 2004; Filatov et al., 2005)

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

Наиболее низкие температуры воды по всем проанализированным беломорским станциям наблюдаются в конце 1970-х, середине 1980-х и начале 1990-х годов, а высокие – в 1989 г. Значительные изменения в ТПВ Белого моря начала 1980-х гг. хорошо согласуются с ходом атмосферных процессов и особенностями отклика на эти события температуры воды района каждой конкретной станции Белого моря. Так, усиление циклонической активности Северной Атлантики в начале 1980-х гг. проявилось в климате района водосбора Белого моря, вызвав понижение ТПВ Белого моря в это же время. Изменения 1990-х гг. связаны с увеличением средней глобальной температуры воздуха над Европейским Севером (Будыко, 1999).

Совместный анализ данных изменений температуры воды в Белом и Баренцевом море (Belkin et al., 1998) по Кольскому меридиану показывает определенное сходство в их изменчивости, выделяются одинаковые временные масштабы (рис. 6.21).

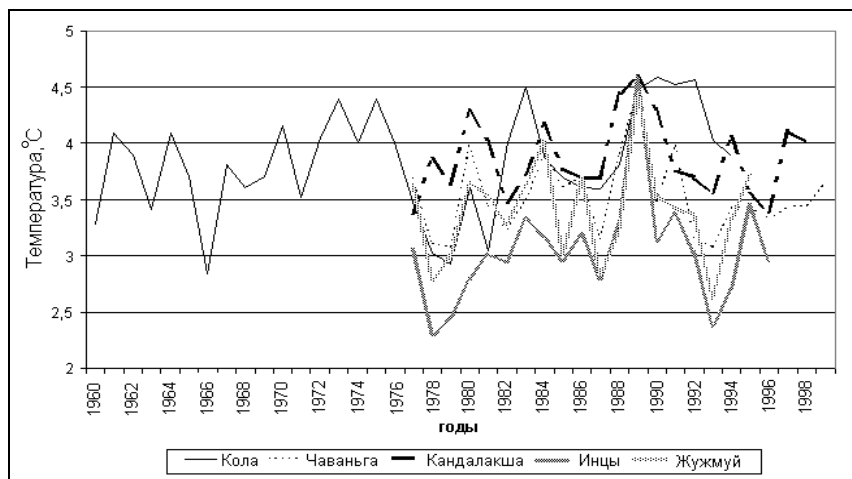


Рис. 6.21. Изменчивость среднегодовой температуры воды Баренцева моря (слой 200 м, Кольский меридиан) и ТПВ Белого моря: Кола, Чаваньга, Кандаклаша, Инцы, Жужмуй. (Климат Карелии..., 2004)
Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

Из рис. 6.21 видно, что максимумы и минимумы ТПВ Белого моря и Баренцева моря по Кольскому меридиану согласуются между собой по времени наступления (1978, 1980, 1987, 1989, 1993). В 34-летнем ряду данных самая низкая температура воды в Баренцевом море по Кольскому меридиану наблюдалась в 1979 г., а самая высокая – в 1989 г. По данным (Belkin et al., 1998) изменения температуры воды по Кольскому меридиану являются следствием процессов, происходящих в Западно-Гренландском течении и проявляющихся здесь через 6-7 лет благодаря адвекции воды с западной части Атлантики. Однако, В.И. Бышев (Бышев, 2003) показал, что это не так, – глобальные осцилляции в Баренцевом море по Кольскому меридиану происходят гораздо быстрее, в один год с имевшим место событием.

Рассмотрим межгодовые колебания ТПВ на каждой из девяти ГМС.

Гридино. Период наблюдения за температурой поверхностного слоя – 1977–1998 гг. Среднее многолетнее значение за этот период – 3.69°C. Сравнивая эту величину со средней годовой температурой за период 1915–1980 гг., равной 1.1°C (Белое море, 1991), отмечаем, что за последние 20 лет ТПВ возросла. Четко прослеживается сезонная составляющая, с максимальной амплитудой 17°C в 1996 г. и минимальной 12°C

в 1992 г. Максимальная среднегодовая температура воды отмечена в 1989 г. и составляет 4.51°C, минимальная – в 1978 г. (– 3.15°C). В целом за весь период измерений наблюдается положительный тренд, равный 0.5°C за рассматриваемый период времени.

Соловки. Период наблюдений – 1977-1998 гг. Среднее многолетнее значение – 3.73°C. Максимальная амплитуда отмечена в 1989 г. (15.5°C) и 1997 г. (17°C), а минимальная – в 1993 г. (13°C). Максимальная среднегодовая температура воды наблюдалась в 1989 г. и составила 4.51°C, минимальная – в 1978 г. (3.14°C). Графики среднегодовых температур станций Гридино и Соловки практически полностью совпадают. По многолетним данным также выделяется положительный тренд в 0.5°C.

Жужмуй. Период наблюдений – 1977–1995 гг. Среднее многолетнее значение – 3.34°C, что несколько ниже по сравнению с двумя предыдущими станциями. Максимальная амплитуда наблюдалась в 1984 г. и 1990 г. 15°C, минимальная – в 1988 г. (12°C). Максимальная среднегодовая температура отмечена также в 1989 г. (4.45°C), а минимальная – в 1993 г. (2.62°C). Вероятно, сказывается влияние р. Онеги. Тренда в многолетнем температурном ходе не отмечено.

Инцы. Период наблюдений – 1977–1996 гг. Среднее многолетнее значение – 3.08°C. Максимальная амплитуда в 1990 г. – 15°C, а минимальная – в 1979 г. (11°C). Максимальная среднегодовая температура отмечена в 1989 г. (4.58°C), минимальная – в 1978 г. (2.29°C). Благодаря высокоширотному положению станции Инцы температуры в целом гораздо ниже по сравнению с данными предыдущих станций, однако годовые колебания и весь двадцатилетний ход температуры более ровный, а амплитуды колебаний ТПВ меньше. Тенденция повышения температуры здесь максимальна и составляет почти 1°C/20 лет.

Чаваньга. Период наблюдений – 1977–1999 гг. Среднее многолетнее значение – 3.53°C. Максимальная амплитуда в 1980 и 1981 гг. составила почти 15°C, а минимальная, с периодом в 4-5 лет, наблюдалась в 1979, 1983, 1988, 1993, 1997 гг. Она колеблется от 9.5 до 11°C. Положительный тренд мало заметен и не превышает 0.2°C. Данная станция находится в зоне действия течений, приносящих баренцевоморскую воду. Максимальная среднегодовая температура 4.49°C отмечена в 1989 г., а минимальная – 3.08°C в 1979 г.

Кандалакша. Период наблюдений – 1977–1998 гг. Среднее многолетнее значение – 3.87°C. Максимальная среднегодовая температура составила 4.59°C в 1989 г., а минимальная – 3.37°C в 1977 г. Среднегодовой

ход температуры довольно ровный, и значения температуры здесь максимальные. Тренд составляет не более 0.1°C .

Мудьюг. Период наблюдений – 1977–1999 гг. Среднее многолетнее значение – 5.24°C , максимальное среди всех станций. Здесь сказывается влияние р. Сев. Двины. Максимальная амплитуда ТПВ наблюдается в 1977, 1988, 1989 и 1999 г., минимальная – в 1978 и 1992 г. Тренд составляет 0.5°C . Максимальная среднегодовая температура отмечена в 1999 г. – 5.74° , в 1991 и 1995 г. она также колеблется в пределах 5.60°C ; минимальная – в 1978 г. (4.45°C).

Жижгин. Период наблюдений – 1977–1999 гг. Среднее многолетнее значение – 2.84°C , самое низкое в сравнении с остальными станциями. Здесь находится зона экмановского прибрежного апвеллинга. Максимальная амплитуда в 1984 и 1995 гг., а минимальная – в 1978, 1987, 1992, 1993 гг.. Тренд составляет 0.2°C . Максимальная температура – в 1989 г. (3.90°C). Наиболее «теплыми» были 1984 и 1995 гг. Минимальная температура отмечена в 1978 г. – 2.25°C .

Унский маяк. Период наблюдений – 1977–1999 гг. Среднее многолетнее значение – 4.19°C . Максимальная амплитуда отмечалась в 1977 и 1989 г., а минимальная – в 1978, 1979, 1987 и 1988 гг. Тренд положительный – 0.5°C . Максимальная температура наблюдалась в 1989 г. (5.57°C), а минимальная – в 1978 г. (3.45°C).

Таким образом, почти на всех станциях в ТПВ отмечается в разной степени выраженный положительный тренд. Максимальные значения отмечены практически на всех станциях в 1989 г., что могло быть вызвано региональным проявлением повышения температуры воздуха на всей рассматриваемой территории. Минимальные значения температуры воды поверхностного слоя Белого моря наблюдались в 1978 г., что также хорошо согласуется как с региональными, так и с глобальными тенденциями изменения климата.

Для выявления закономерностей межгодовой изменчивости ТПВ Белого моря, основываясь на данных по отклонениям от средней многолетней температуры, были выделены «средние», «холодные» и «теплые» годы (Толстикова, 2006). Такая сортировка данных позволила сопоставить между собой многолетний ход ТПВ Белого моря по различным станциям с целью определения масштабов влияния глобальных процессов на температурный режим всего Белого моря и дала возможность выявить экстремальные годы для каждого временного ряда.

После построения графика интегральной ТПВ (рис. 6.22) по всем станциям оказалось, что ход интегрального значения температуры сходен с ходом ТПВ каждой отдельной станции.

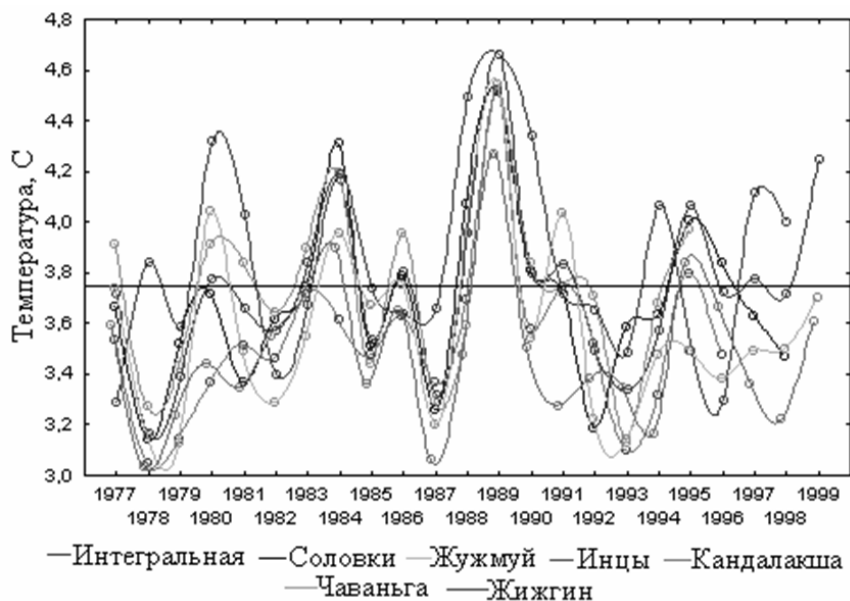


Рис. 6.22. Интегральное значение температуры поверхностного слоя воды Белого моря по шести станциям. Горизонтальная линия показывает норму

Следовательно, «теплые», «холодные» и «средние» годы для всех станций совпадают друг с другом по экстремумам, отличаясь лишь по амплитуде. Практически нигде разница хода ТПВ на конкретной ГМС и хода интегральной температуры по абсолютной величине не превышает $0,4^{\circ}\text{C}$. Изменения в ТПВ Белого моря хорошо согласуются с глобальными и региональными изменениями климата.

Для выявления степени влияния климатических процессов на температурный режим Белого моря рассмотрим совместный ход температуры приземного слоя атмосферы по станциям, расположенным на водосборе, и ТПВ Белого моря. На рис. 6.23 представлены среднегодовые значения температуры приземного слоя воздуха по ст. Лоухи (1927–1995 гг.) и среднегодовая ТПВ по ст. Гридино (1977–1999 гг.). Обе станции находятся относительно недалеко друг от друга.

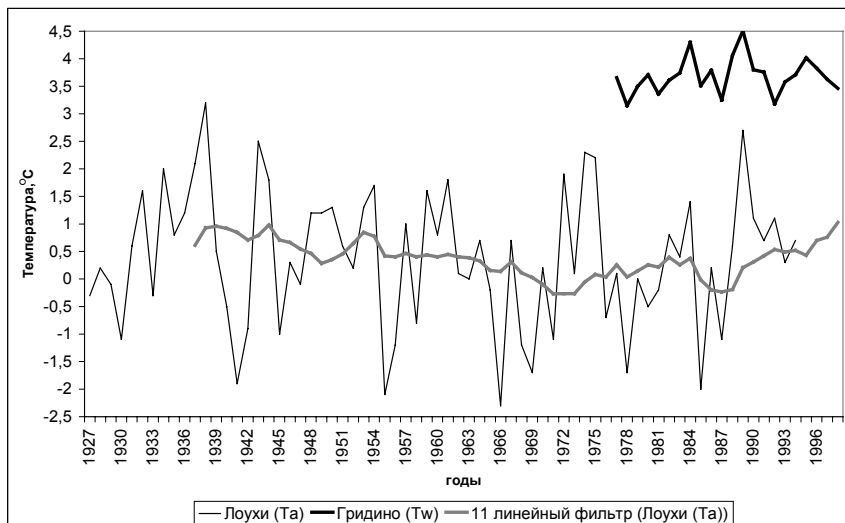


Рис. 6.23. Колебание среднегодовой температуры воздуха (ст. Лоухи (Ta)) и поверхностного слоя воды в районе Карельского побережья (ст. Гридино (Tw)) (Filatov et al., 2005)

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

Как видно на рис. 6.23, пики среднегодовой температуры воздуха на ст. Лоухи и пики ТПВ по ст. Гридино совпадают по времени. Коэффициент взаимной корреляции рядов изменений температуры воздуха и ТПВ за период 1978–1995 гг. составляет более 0.70. Таким образом, изменчивость ТПВ Белого моря определяется в основном изменениями температуры нижнего слоя атмосферы.

Сезонная изменчивость. Пределы изменения ТПВ за год можно наблюдать на графике (рис. 6.24), построенном нами по данным ВНИИГМИ-МЦД. Используются данные ТПВ с дискретностью 6 час за период 1977–1999 гг.

Из рис. 6.24 видно, что для ТПВ ст. Гридино четко прослеживается сезонная периодичность и отмечается небольшой положительный тренд. Самых высоких значений ТПВ достигала летом 1977 г. и 1993 гг. (18°C).

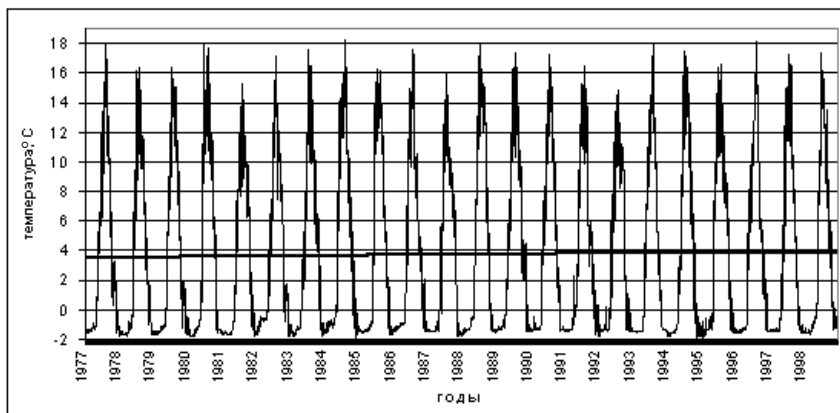


Рис. 6.24. Ход температуры поверхностного слоя и линейный тренд, ст. Гридино. Данные с дискретностью 6 час

В сезонном ходе ТПВ Белого моря четко выделяется один максимум в июле или начале августа, в зависимости от района моря, и один выраженный минимум – в зимний период. Максимум тепла приходится на конец июля (см. гл. 3). Южные станции получают суммарно большее количество солнечной радиации и, кроме того, дополнительно «подогреваются» в теплое время года от рек, поэтому температурный максимум у них ярче выражен. Этот же процесс проявляется и на западных станциях: Гридино, декадная Д-1.

Синоптическая изменчивость ТПВ. Для ТПВ Белого моря характерно влияние прямого атмосферного воздействия, а также действие фронтальных и фрикционных синоптических вихревых образований (см. в кн. Белое море, 1991). На графиках хода ТПВ Белого моря (рис. 6.24) помимо основного максимума в начале августа, связанного с интенсивной инсоляцией в июле, заметен еще один небольшой максимум в осенний период.

Коэффициент корреляции между ходом ТПВ в безледный период (ст. Соловки) и температурой приземного слоя воздуха (ст. Кемь) равен 0.81. На частотах, соответствующих периодам 33-25 сут, колебания температуры воздуха и температуры воды имеют высокую когерентность ($H=0.71-0.82$), см. рис. 6.25.

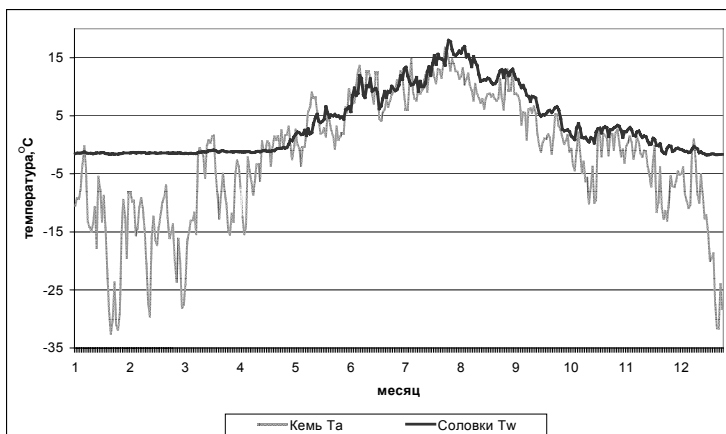


Рис. 6.25. Совместный годовой ход температуры поверхностного слоя воды (ст. Соловки) и температуры приземного слоя атмосферы (ст. Кемь), 1977 г.

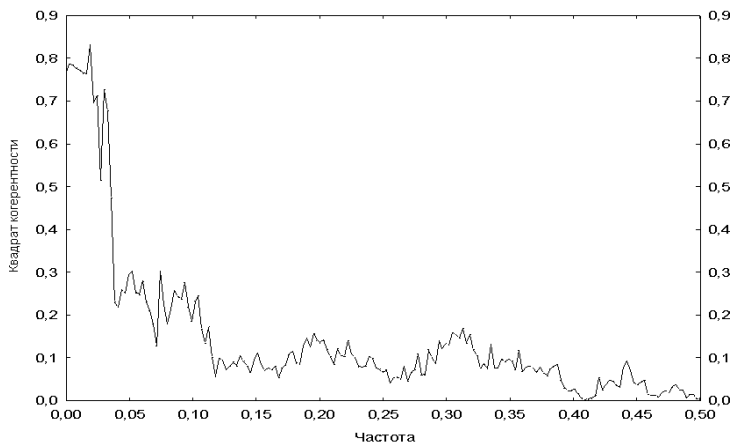
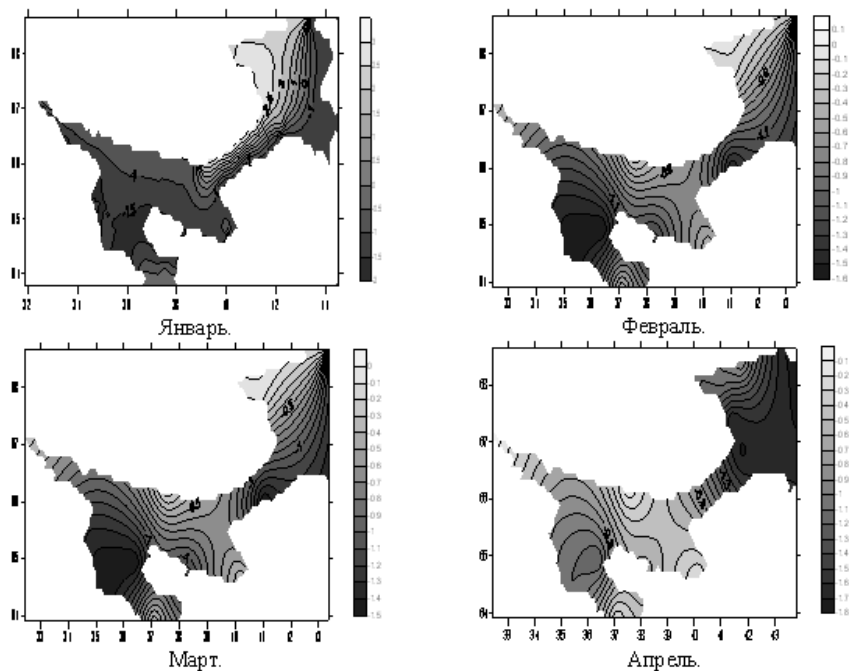


Рис. 6.26. Значение коэффициентов когерентности между колебаниями температуры воздуха (ст. Кемь) и ТПВ Белого моря (ст. Соловки)

В диапазоне масштабов 10–20 сут когерентность значительно ниже ($H=0.12-0.29$). Внутригодовое распределение ТПВ Белого моря с двумя максимумами наблюдается по всем станциям с теми или иными региональными отличиями за весь рассматриваемый период изменений 1977–1999 гг.

С синоптической изменчивостью ТПВ Белого моря также связаны выделенные еще К.М. Дерюгиным на поверхности Белого моря «полюс холода» на границе Двинской губы и Бассейна и «полюс тепла» на границе Кандалакшского залива и Бассейна. Положение антициклонических круговоротов, повышением температуры воды в центре, и циклонических, испытывающих понижение температуры, не является стабильным и изменяется в зависимости от сезонной интенсивности стока рек и времени прохождения над акваторией моря циклонов (Белое море, 1991). Так, антициклонический вихрь у Летнего берега ярче всего выражен в июле, а в марте, в период минимального стока р. Северная Двина, он совсем не наблюдается (Климат Карелии..., 2004).

Путем осреднения данных по ТПВ основных ГМС и многолетним измерениям на стандартных разрезах были построены карты интегральных полей ТПВ (рис. 6.27).



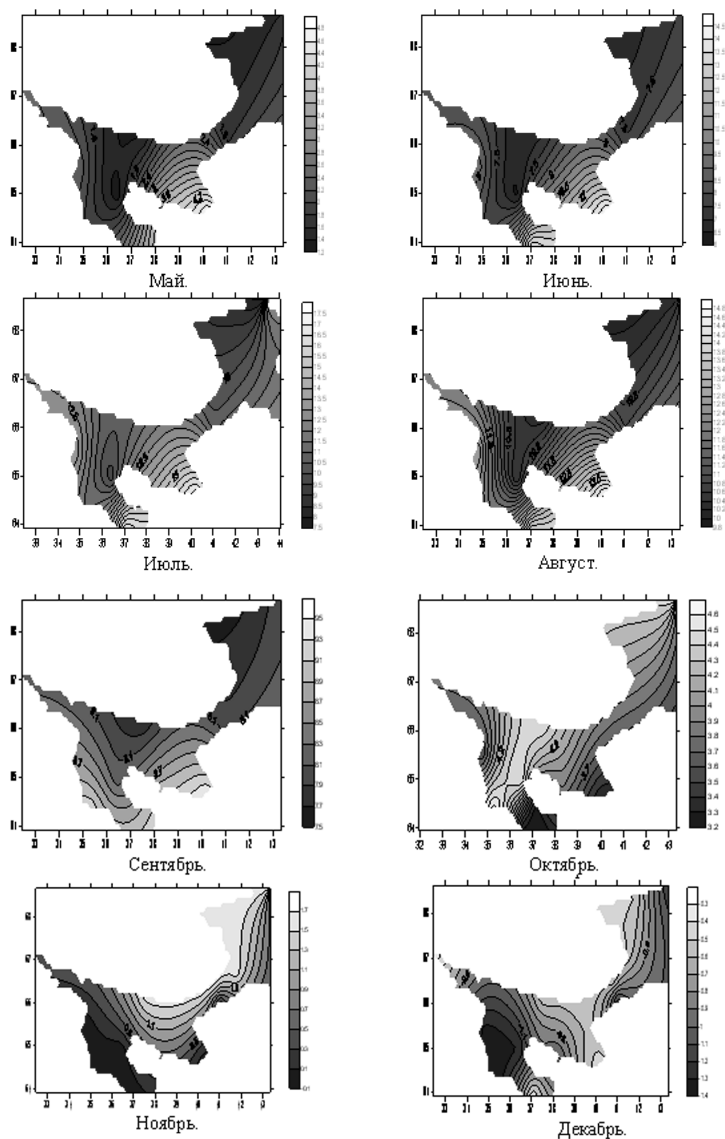


Рис. 6.27. Распределение температуры воды на поверхности Белого моря по данным многолетних измерений на ГМС

Представленные поля характеризуют лишь крупномасштабную составляющую ТПВ Белого моря. Интерполяция ТПВ по относительно небольшому числу точек измерений на островных ГМС не позволяла корректно описать ряд важных океанологических особенностей Белого моря, таких как квазипостоянный апвеллинг у Соловецких островов, прибрежные апвеллинги, сильно «размыт» фронт Горла, нет заметных фронтов в заливах. Положение фронтальных зон, вихревые образования, зоны апвеллинга по представленным выше рисункам оценить нельзя – это можно сделать с использованием данных о ТПВ, полученных со спутников.

Мезомасштабная изменчивость. Мезомасштабная изменчивость температурного режима Белого моря связана с влиянием приливообразующих сил. В районах моря, где хорошо выражена стратификация (Басейн, Двинский и Кандалакшский заливы) важную роль в мезомасштабной изменчивости играют внутренние волны.

В Белом море доминируют полусуточные приливы, на мелководьях они несимметричны благодаря деформации волны, когда время роста и время падения уровня отличаются между собой (рис. 6.28).

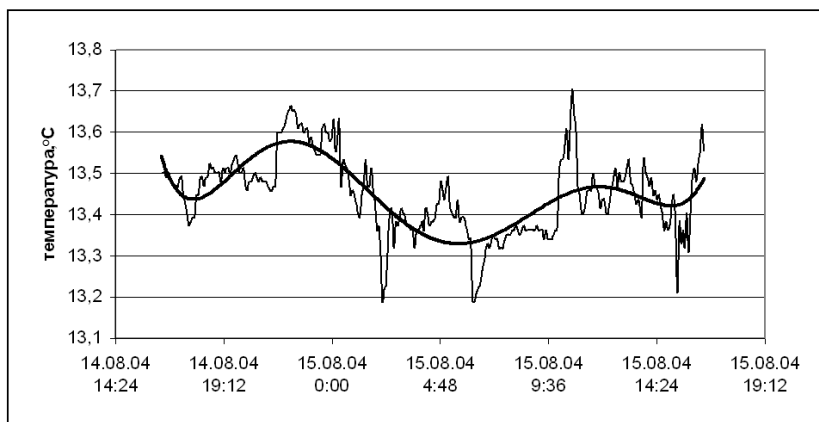


Рис. 6.28. Суточные температурные колебания за приливной цикл, зарегистрированные прибором АЦИТТа в районе архипелага Кузова (14-15 августа 2004 г., горизонт 3 м)

Например, в Двинском заливе время роста больше времени падения уровня, а в Кандалакшском заливе – наоборот. Эти неравенства прилива

отражаются в суточном ходе ТПВ. В некоторых районах моря искажения приливов приводят к тому, что за сутки наблюдается четыре полных и малых воды (например, м. Вепревский), а не две, как на остальной части моря. Амплитуда колебаний температуры в устьевых зонах рек за один приливной цикл может достигать 0.4°C (рис. 6.29).

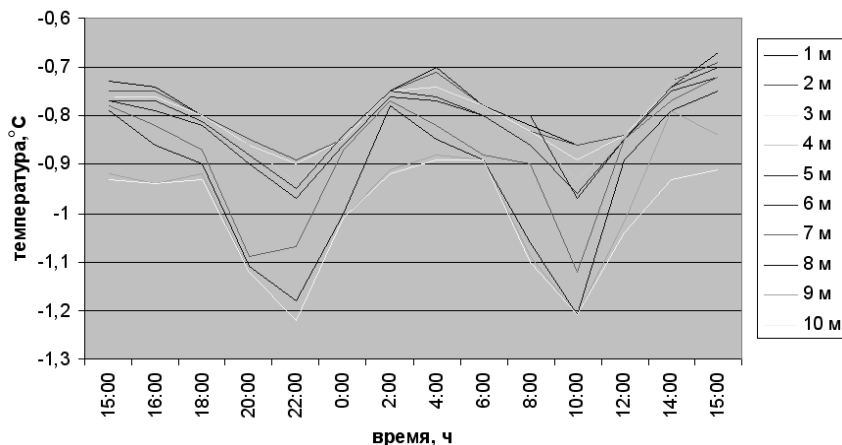


Рис. 6.29. Внутрисуточные короткопериодные колебания температуры воды на разных горизонтах в районе ГМС Мудьюг (28.03.2005–29.03.2005)

Рассмотрев мезомасштабную изменчивость, можно сделать вывод, что в целом изменчивость ТПВ северной части Белого моря тесно связана с атмосферными гидрометеорологическими процессами, происходящими в районе Белого и Баренцева морей, и с влиянием приливов Баренцева моря. Основное влияние оказывает индуцированный прилив, проходящий через Горло в море и формирующий широкий спектр волн Кельвина и Пуанкаре, генерирующих разнообразные фронты и апвеллинги разного генезиса.

Основываясь на результатах анализа многолетних рядов температурных данных поверхностного слоя Белого моря и экспедиционных исследованиях, были выполнены оценки изменчивости ТПВ Белого моря на перспективу. Оценка проводилась в четыре этапа: оценивание по модели линейного тренда; нелинейное оценивание; спектральный анализ; вейвлетный анализ временных рядов.

Оценка по линейной модели тренда. Рассмотрим оценку, сделанную по модели линейного тренда. Хотя применение линейного тренда для гидрометеорологических рядов не всегда оправдано (Рожков и др., 1990), но учитывая устойчивость процесса постепенного потепления в исследуемом районе и значимость трендов повышения ТПВ Белого моря по *t*-критерию Стьюдента, мы допускаем его использование.

Согласно проведенным расчетам (Толстикова, 2006), ТПВ Белого моря за период 1977–1999 гг. повысилась в среднем на 0.5°C. Для того, чтобы понять, насколько этот процесс устойчивый и вклад каких лет в изменчивость температурного режима максимален, сделаем 50%-ную выборку из полного ряда данных, с 1977 по 1988 г. и построим по ней линейный тренд (рис. 6.30).

Как видно из графика (рис. 6.24), повышение ТПВ во временном ряду ст. Гридино и в 50% выборке имеет сходные тенденции, с 3.5 до 3.9 и с 3.5 до 4.0°C, соответственно. Тренд значим на уровне 10%, и его вклад в общую дисперсию составляет 2.7%. Это дает возможность экстраполировать тренд, построенный по периоду 1977–1988 гг., до 1999 г. и сравнить истинные и расчетные значения.

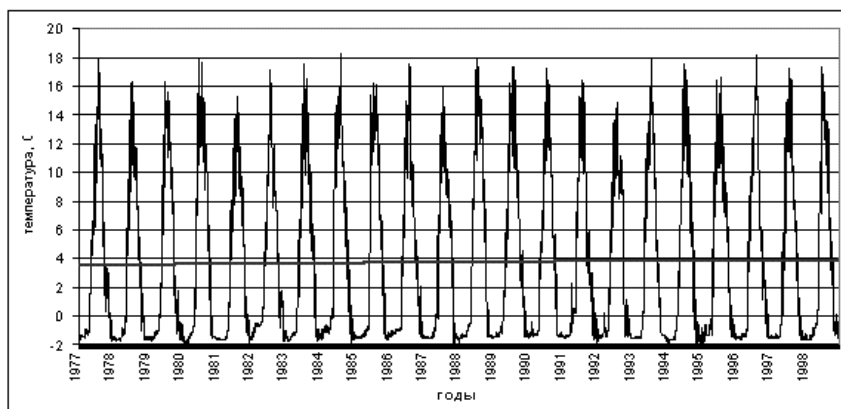


Рис. 6.30. Ход температуры поверхностного слоя воды Белого моря по ст. Гридино и линейный тренд

Согласно оценке, в 1999 г. по ст. Гридино ТПВ должна была составить 4.3°C.

Относительная ошибка расчетов, выполненных по температурным данным ст. Гридино, составила 10%, что позволяет экстраполировать вперед тренд ряда 1977–1998 гг. таким способом до 2008 г., то есть примерно на половину его длины. Оценка по линейному тренду показывает, что средняя многолетняя ТПВ Белого моря на ст. Гридино в 2008 г. составит 3.9°C , то есть практически останется без изменений. ТПВ Белого моря во второй половине расчетного периода (1977–1999 гг.) была гораздо выше, чем в первой. В целом, согласно оценке по линейной модели тренда, в дальнейшем по всем изученным станциям будет наблюдаться повышение ТПВ Белого моря, в среднем на $0.5^{\circ}\text{C}/10$ лет, при сохранении современных тенденций изменения климата в исследуемом районе.

Помимо статистического анализа девяти 23-летних рядов температурных данных поверхностного слоя Белого моря, был проведен анализ выборок по сезонам для каждой станции, в ходе которого выяснилось, что по всем станциям наблюдаются сходные закономерности. Например, отмеченное повышение ТПВ проявляется в летние месяцы и весной, а осенью наблюдается небольшое понижение температуры в многолетнем ходе. Зимой практически по всем станциям тренда нет, кроме ст. Унский маяк, где отмечено повышение температуры на 0.5°C . Для этой станции ярко выражен положительный тренд во все сезоны. Максимальный положительный тренд отмечен на ст. Инцы для летнего сезона – 1.5°C . Отрицательный тренд в летние месяцы наблюдается на ст. Жужмуй и ст. Чаваньга. Максимальная изменчивость отмечается в период открытой воды, то есть летом и осенью.

В исследуемом районе согласно расчетам по двум сценариям изменения климата, выполненным с использованием модели ЕСНАМ4/ОРУС3 (Климат Карелии..., 2004), снижение речного стока в Белое море на 20% и увеличение среднегодовой температуры воздуха на 2°C приведут к уменьшению средней толщины льда в Белом море на 10 см, увеличению средней солености на 1‰, увеличению толщины верхнего квазиоднородного слоя, обострению летнего термоклина, а это, в свою очередь, ослабит вертикальный обмен. Учитывая эти предварительные расчеты, в ближайшие несколько лет при сохранении современных тенденций изменения климата следует ожидать незначительных изменений в экосистеме Белого моря.

Нелинейное оценивание. Для получения средних многолетних характеристик изменчивости температуры воды Белого моря в годовом цикле была применена модель нелинейного оценивания, разработанная и впервые использованная для описания термического состояния Онежского и Ладожского озер (Ефремова и др., 1992).

Предложенная модель описывает такие важные периоды годового термического цикла как зимний минимум, весеннее нагревание, летний максимум (пик или плато) и осеннее охлаждение. Наилучшим приближением, как показала практика подобных расчетов, была признана нелинейная по параметрам модель, имеющая вид колоколообразной функции, составленная из комбинации экспонент:

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

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 подбирались отдельно для каждой станции при помощи задания определенных условий с использованием итерационного квазиньютоновского метода при критерии сходимости равном 0.0001. Функция потерь или коэффициент корреляции вычислялся как средняя величина квадрата разности между измеренной и рассчитанной величинами. В 44% случаев этот коэффициент превышал 0.96, а в оставшихся 56% – 0.83. Значит, средний многолетний сезонный ход, описываемый моделью, объясняет более 80% дисперсии исходных данных. Все полученные кривые ТПВ унимодальны, асимметричны, температурный максимум закруглен, но для каждой станции выделены отличия, характеризующие температурный режим района каждой конкретной станции. Обратимся к графику ТПВ, построенному по данным ст. Гридино (рис. 6.31), где модельная кривая представлена в поле данных.

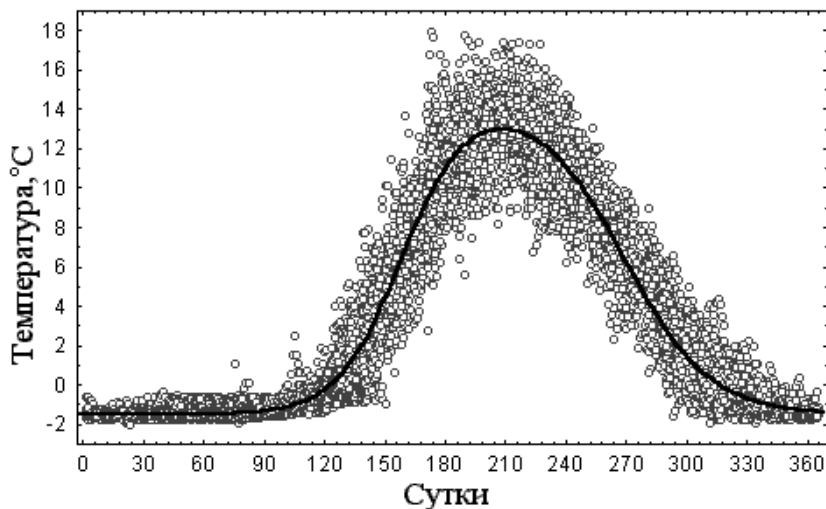


Рис. 6.31. Средний многолетний температурный ход по ст. Гридино (из: Толстиков и др., 2006)

Для ст. Гридино характерно наступление температурного максимума (13.1°C) на 210-е сутки от 1 января (29 июля). Средняя температура зимы составляет -1.4°C и практически не меняется до 74-х суток (15 марта). Затем начинается постепенное повышение температуры, и на 123-е сутки (3 мая) она переходит через 0°C , продолжая активно возрастать до 165-х суток (14 июня), затем замедляя скорость роста. Нагревание длится 87 суток. После максимума начинается фаза охлаждения, сначала медленного до 270-х суток (27 сентября), а потом быстрого до 316-х суток (12 ноября), когда температура воды переходит через 0°C и далее до 360-х суток (26 декабря) снова становясь постоянной до весны. Охлаждение продолжается 106 суток, превышая фазу нагревания на 19 суток. Так завершается средний многолетний годовой цикл ТПВ в районе ст. Гридино.

Максимальная изменчивость температуры наблюдается весной и осенью по естественным природным причинам: сход или образование льда, смена знака в преобладающих сезонных ветрах, так как здесь отмечена муссонная тенденция. «Модельный» ход температуры поверхностного слоя был рассчитан таким способом для девяти станций (рис. 6.32).

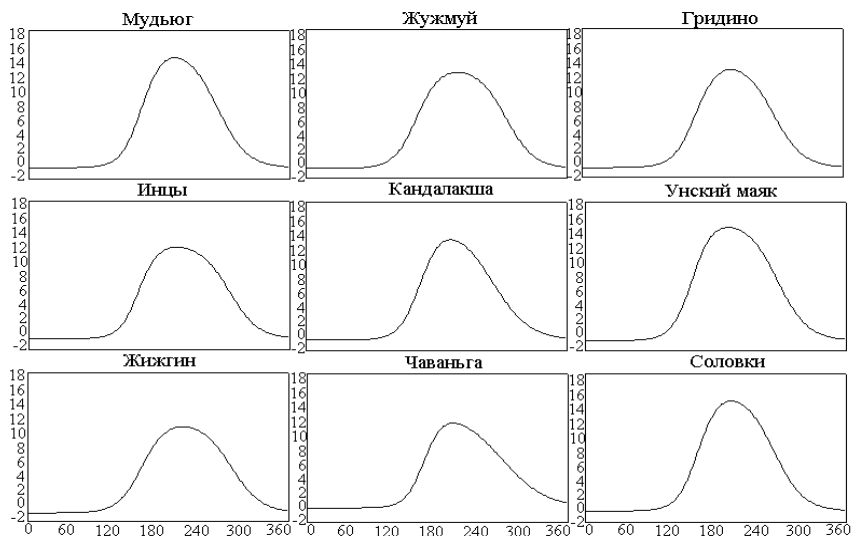


Рис. 6.32. Модельный ход ТПВ Белого моря по девяти станциям: ось абсцисс – сутки от начала года; ось ординат – температура, °С (из: Толстиков и др., 2006)

Все значения ТПВ, найденные по модельной кривой для каждого момента времени, используются в качестве средних многолетних оценок, а по модельным кривым годового хода ТПВ Белого моря с точностью до заданных интервалов шкалы времени и шкалы температуры находятся моменты максимума и продолжительность периода минимума; устанавливаются точки перехода через 0°C и 10°C ; оценивается продолжительность и характер периодов нагревания и охлаждения воды (Толстиков и др., 2006). Кроме того, по модельным кривым удобно характеризовать температурный режим «теплых», «холодных» и «средних» лет, используя кривые в качестве «лекала» для графиков внутригодового хода ТПВ. На рис. 6.33 показано соответствие графиков внутригодового хода ТПВ и модельных кривых. Из этих рисунков видно, что модель адекватно описывает годовой ход ТПВ.

Результаты спектрального анализа. Для изучения изменчивости ТПВ Белого моря были использованы классические методы расчета функций спектральной плотности: косинус Фурье-преобразования корреляционной функции и метод максимальной энтропии (ММЭ). Для анализа все

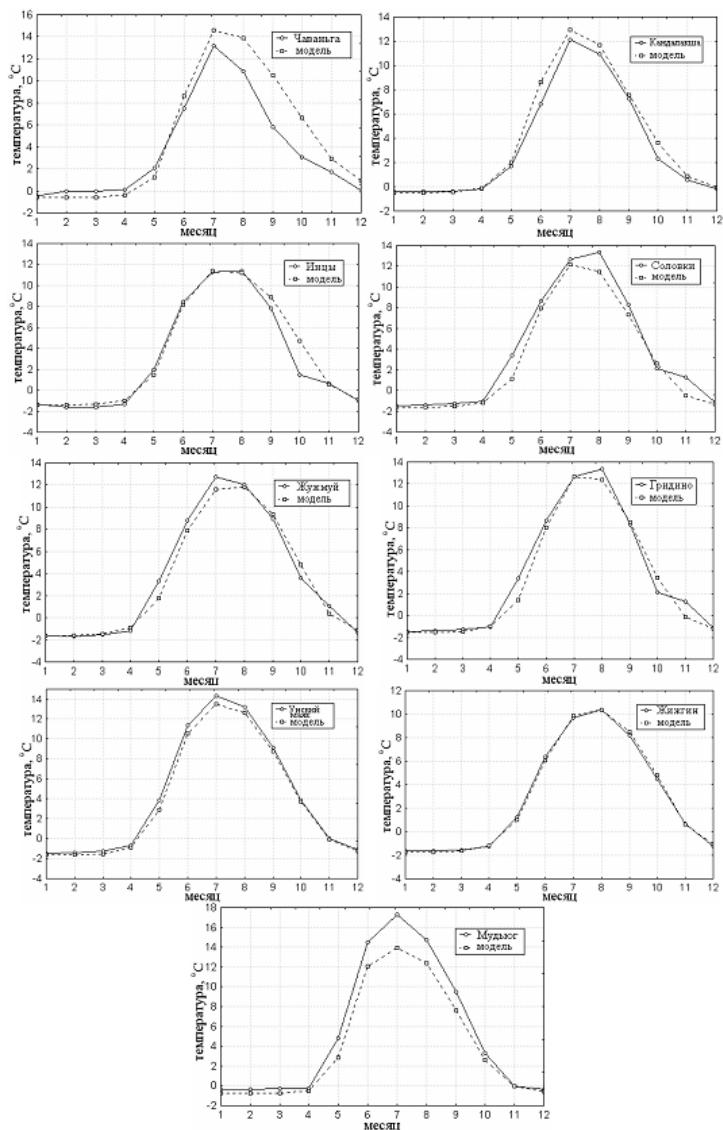


Рис. 6.33. Сравнительные графики температурного хода и модельных кривых по 9 станциям

ряды среднесуточных температурных данных по девяти станциям за 23 года были приведены к стационарному виду, а полученные ряды нормированы на соответствующие дисперсии. Данная процедура позволила подсчитать относительный вклад каждой составляющей в общую изменчивость в масштабах от межгодовой до синоптической. Сглаживание проводилось функцией Хемминга (рис. 6.34).

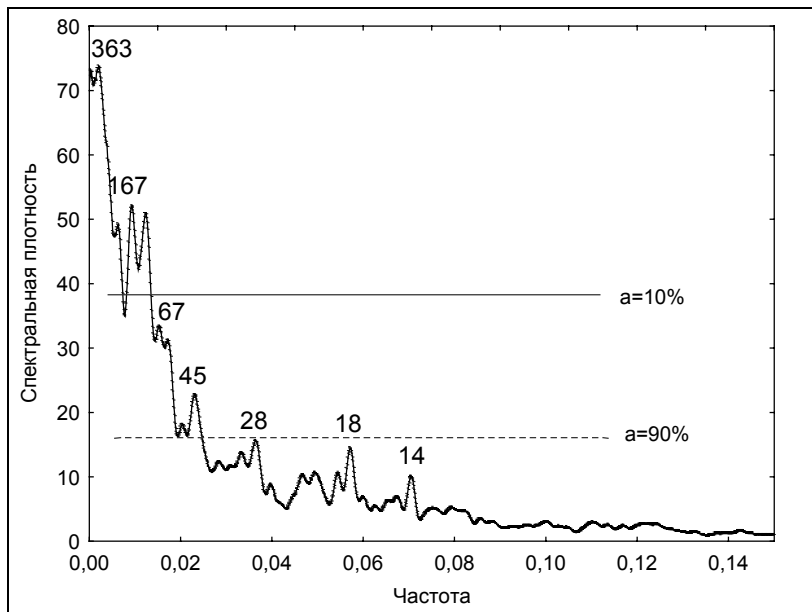


Рис. 6.34. Функция спектральной плотности ТПВ Белого моря по ст. Гридино. Вверху каждого пика указаны временные масштабы в сутках. Доверительные интервалы даны для синоптических колебаний

За синоптическую изменчивость приняты масштабы колебаний ТПВ Белого моря от нескольких суток до 40 суток (Белое море, 1991; Елисов, 1998). В диапазоне 40–365 сут находится внутригодовая изменчивость. По функции спектральной плотности (рис. 6.34) видно, что максимальный пик соответствует годовым колебаниям. Значительна и внутригодовая изменчивость – с периодами 167, 83 и 67 суток. На основе результатов статистического анализа оценен вклад в общую дисперсию составляющих изменчивости ТПВ Белого моря (табл. 6.3.).

Таблица 6.3.

Оценка относительного вклада в дисперсию составляющих изменчивости ТПВ Белого моря

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. 6.3. следует, что большая часть вклада в дисперсию практически по всем станциям приходится на сезонную изменчивость.

По всему спектру изменчивости ТПВ Белого моря трудно охарактеризовать синоптические масштабы, хотя в исследуемых интервалах их вклад значителен (Монин и др., 1974), так как дисперсия колебаний температуры воздуха в приводном слое атмосферы в синоптическом диапазоне частот в три раза выше дисперсии сезонной изменчивости (Бышев, 2003).

Для анализа масштабов синоптической изменчивости выделим из имеющихся рядов данных девяти ГМС более высокочастотные составляющие. Наиболее подходящим для этой цели может быть метод полиномиального скользящего среднего при исключении тренда с третьей степенью полинома. Для большинства станций имеется пик на частоте 0.036 сут^{-1} , соответствующий временным масштабам 28 суток, что, скорее всего, вызвано действием паралактического неравенства приливов. С адвекцией тепла приливной волной, вероятно, связан и период, равный 14 суткам. Только для станций Инцы, Жужмуй и Кандалакша максимальные по энергии пики соответствуют 40, 32 и 38 суткам, соответственно, однако, спектральная плотность для пика 28 суток также высока.

В результате анализа функций спектральной плотности 23-летних рядов установлено, что основной вклад в синоптическом диапазоне изменчивости ТПВ Белого моря вносят компоненты с гармониками $m=0.023\text{--}0.040$, что соответствует временной области 28–40 суток.

На основании изученности всех видов изменчивости по результатам спектрального анализа можно сделать вывод, что в формировании температурных полей поверхностного слоя Белого моря ведущую роль играют сезонные колебания, вклад которых в общую дисперсию колеблется от 37% до 54%.

Вейвлетный анализ. Вейвлетная функция локализована в частотной и во временной области, то есть одновременно учитывает квазипериодическую составляющую, тренд и отдельно встречающиеся особенности процесса в конкретный момент времени. Для вейвлетного анализа используется исходный нестационарный ряд.

Для анализа рядов ТПВ девяти станций Белого моря выбран бесконечный регулярный вейвлет Мейера с дискретной аппроксимацией, так как данный вейвлет лучше всего подходит для анализа временных рядов: он симметричен и поддерживает непрерывное преобразование.

Вейвлет-преобразование представляет собой разложение временного ряда на линейные коэффициенты (рис. 6.35).

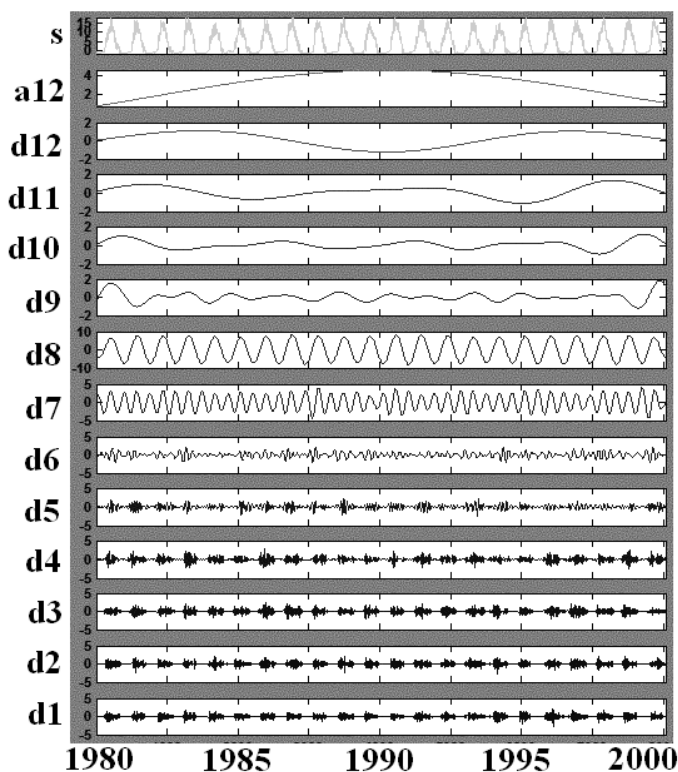


Рис. 6.35. Графики линейных коэффициентов вейвлет-преобразования для суточных колебаний ТПВ Белого моря (ст. Гридино)

Исходный ряд представлен на уровне s (рис. 6.35). Трендовая составляющая (уровень $a12$) для большинства станций свидетельствует о повышенной ТПВ в конце 1980-х гг. В межгодовой изменчивости проявляются следующие особенности: квазиодинадцатилетняя изменчивость (уровень $d7$) ярче всего выражена на ст. Унский маяк, Чаваньга, Кандалакша, Жижгин, Мудьюг, Гридино; квазипятилетняя (уровень $d9$) – отчетливо проявляется на графиках хода ТПВ всех станций, также как и квазидвухлетняя (уровень $d8$). На низших уровнях показана синоптическая составляющая.

Результаты вейвлетного анализа свидетельствуют о том, что максимальный вклад в общую дисперсию ТПВ Белого моря вносит сезонная изменчивость, до 62% (табл. 6.4.), что хорошо согласуется с результатами спектрального анализа.

Таблица 6.4

Оценка относительного вклада в дисперсию составляющих изменчивости ТПВ 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
Инцы	10	62	21	7
Чаваньга	10	46	26	18
Кандалакша	6	53	24	17

Таким образом, рассмотрев результаты спектрального и вейвлетного анализов, можно сделать следующие выводы (Толстиков и др., 2006):

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

2. Роль крупномасштабных атмосферных процессов превалирует над региональными особенностями отдельных районов Белого моря.

Мезомасштабная и синоптическая изменчивость полей температуры воды и динамики вод по спутниковым данным.

Несмотря на длительную историю изучения Белого моря, до сих пор недостаточно изученной остается мезомасштабная и синоптическая изменчивость его термогидродинамических полей, в особенности в

эстуариях и заливах. Эффективным средством изучения этих процессов могут служить спутниковые методы исследования. Для относительно небольших акваторий (например, для устья р. Кемь) этот метод недостаточно эффективен в связи с низким разрешением сенсора AVHRR со спутника серии NOAA (около 1 км). Для изучения термогидродинамических полей в крупных заливах (Двинском, Мезенском, Онежском и Кандалакшском) этот сенсор вполне приемлем по пространственному и временному разрешению (Ионов, Шилов, 1996; Filatov et al , 2005).

Известно, что мезомасштабные процессы доминируют в формировании внутреннего и внешнего водообмена Белого моря, определяют особенности распределения химико-биологических характеристик и функционирования его экосистемы. В настоящее время стала возможна организация мониторинга с доступных широкому кругу пользователей спутников серии NOAA, по которым накоплена база данных за более чем 20-летний период. Мезомасштабная и синоптическая изменчивость термогидродинамических полей, регистрируемая на поверхности океанов и морей, чаще всего может быть связана с проявлениями вихревых процессов, фронтов, различных нестационарных структур, таких, как апвеллинги, грибовидные образования и струйные потоки, шлейфы речных потоков. Именно эти процессы и явления вносят наибольший вклад в перераспределение взвешенного вещества, загрязнений по акваториям морей.

Кроме неоднородностей температуры, «трассером» различных термогидродинамических структур могут служить взвешенное в воде вещество (особенно в прибрежных районах) и ледовые поля. Наиболее распространенными для анализа изменчивости термогидродинамических полей являются спутниковые данные в тепловом и видимом диапазонах спектра. Анализ спутниковой информации позволяет исследовать изменчивость термогидродинамических полей как в навигационный период, так и во время разрушения ледового покрова – наиболее трудное для контактных наблюдений с судов время. Наибольший интерес для изучения пространственных неоднородностей в динамике представляет использование спутниковых снимков, полученных путем последовательных съемок поверхности. В этом случае удастся выявить особенности формирования и развития термогидродинамических процессов и полей. Тем более, что временная повторяемость пролета спутников серии NOAA, равная нескольким часам, позволяет выявить неоднородности мезо- и синоптического масштабов и проследить их эволюцию.

ИВПС КарНЦ РАН выполнил многолетние подспутниковые измерения с НИС «Эколог», которые позволили оценить влияние погодных

условий на измерения ТПВ, выяснить влияние поверхностной пленки на показания измерителей. С использованием известных методик ИКИ РАН, НОАА, а также разработанных совместно с Нансен-центром (см. Filatov et al., 2005) была рассчитана температура поверхности воды Белого моря за несколько лет в различные сезоны. Анализ изображений показал, что можно выделить характерные особенности неоднородностей полей ТПВ, обусловленные разными термогидродинамическими процессами и явлениями. В частности, после схода ледяного покрова в мае выделяется фронт на границе Горла и Бассейна, а вокруг Соловецких островов – зона холодных вод, обусловленная генерированным приливными движениями апвеллингом. В июне выделяются районы с повышенной температурой воды в эстуариях рек Северная Двина и Онега, где отмечается четкая фронтальная граница, которая со временем продвигается вглубь Онежского и Двинского залива. В конце июля – августе зона с повышенными значениями температур охватывает практически весь Двинский и большую часть Онежского заливов. В этот период Двинская и Горловская фронтальные зоны могут сомкнуться. Одновременно проявляются небольшие, но заметные повышения ТПВ в наиболее глубоководном Кандалакшском заливе, где увеличение температуры воды за счет рек менее заметно, чем в Двинском и Онежском заливах. И, наконец, в сентябре-октябре происходит выравнивание температуры поверхности моря в заливах и Бассейне. Фронтальные зоны в районе Соловецких островов и Горла заметны и в осенний период.

Как показал анализ ИК-изображений, поле температуры поверхности Белого моря характеризуется существенной пространственной мезомасштабной изменчивостью и может значительным образом отличаться от климатической картины, описанной выше. Дистанционные съемки за разные годы для одних и тех же месяцев показывают, что распределение характеристик ТПВ в море является типичным для данного времени года (Океанографические..., 1991). Это объясняется достаточно устойчивой во времени динамикой вод, обусловленной, главным образом, приливо-отливными течениями и остаточной циркуляцией.

Вдоль Зимнего берега в районе мыса Вепревский отмечается полоса (шириной 6–10 км) относительно холодных вод с поверхностной температурой около 6–7°C. Причина образования этой холодной полосы связана с формированием здесь экмановского прибрежного апвеллинга.

Анализ спутниковых снимков в ИК и видимом диапазонах позволил выявить наличие струйных течений, многочисленных вихревых образований циклонического и антициклонического характера, когерентных

структур типа "грибовидных образований", а также неоднородностей, связанных с генерацией экмановских прибрежных апвеллингов. Наиболее отчетливо на ИК-снимках отмечался фронт в районе Горла, а также отдельные фронтальные образования в Двинском и Онежском заливах, выделенные благодаря высоким контрастам температур (градиент температуры достигал $2^{\circ}\text{C}\cdot\text{км}^{-1}$) и солености между водами впадающих рек и прилежащих районов моря. Фронты здесь испытывают динамическую неустойчивость, проявляющуюся в виде струй ("пальцев"), вторгающихся в воды Бассейна и в некоторых случаях взаимодействующих с фронтальной зоной Горла. Линейные пространственные масштабы обнаруженных струй достигали 60–70 км.

Выполненные наблюдения формирования зон прибрежного апвеллинга в Белом море показали их приуроченность, как и в других морях, к мысам и неоднородностям рельефа дна. В разные сезоны года апвеллинг возникает в районе Соловецких островов. Формируется он, как показано Е.В. Семеновым и М.В. Луновой (Семенов и др., 1999), за счет приливных движений. На спутниковых ИК-снимках в летний период в районе восточной Соловецкой Салмы отмечается квазипостоянная зона с пониженной температурой воды ($6\text{--}9^{\circ}\text{C}$), которая связана с интенсивным фронтальным апвеллингом.

Анализ спутниковых изображений в видимом и ИК диапазонах позволил сделать вывод о большом разнообразии форм движений вод Белого моря: от крупномасштабной циркуляции, охватывающей отдельные акватории моря, до различного рода нестационарных структур мезо- и синоптического масштабов, которые оказывают существенное влияние на перераспределение температурных характеристик (по крайней мере, на поверхности) Белого моря (Ионов, Шилов, 1996).

Относительно крупные вихревые образования (с пространственными масштабами до десятков км) чаще всего наблюдались в открытой части Бассейна, на удалении 10–20 км от Кольского берега. Струйные течения и грибовидные образования были приурочены к фронтальным зонам. Эта особенность позволила регистрировать их по полю температуры воды, хотя в общем случае по температуре когерентные структуры не должны отличаться от окружающих вод. Возможно, что обнаруженные формы движений, такие как струйный трансфронтальный поток и меандр фронта являются, по сути, различными стадиями развития когерентных структур. Формирование описанных структур может происходить вследствие замедления струйного течения, возникающего первоначально под влиянием достаточно мощного локального импульса. Такой импульс может

создаваться различными факторами: в открытом море – узконаправленным ветровым потоком, перепадом уровня (и давления), неустойчивостью фронтов и течений; в прибрежных районах – стоком рек, ветром, под влиянием орографии, общим направлением прибрежной циркуляции или водообменом через проливы, с приливными или нагонными явлениями. Вероятной причиной возникновения грибовидного образования может являться неустойчивость двинского фронта, связанная с выносом более холодных вод приливно-отливными течениями из района восточной Соловецкой Салмы.

На основе анализа серии последовательных спутниковых ИК-снимков, охватывающих интервал в несколько суток, была выявлена существенная пространственная неоднородность и временная изменчивость полей на всей акватории Белого моря. Наибольшая изменчивость наблюдалась в районах фронтальных зон Онежского и других крупных заливов.

Показано, что мгновенное поле температуры поверхности Белого моря, благодаря значительной изменчивости во времени, может существенным образом отличаться от климатической картины. Очевидна необходимость сочетания комплексного анализа спутниковых снимков в ИК и видимом диапазоне с радиолокационными данными и данными инструментальных измерений для исследования механизмов формирования и эволюции вихревых образований, различных когерентных структур, существенным образом влияющих на режим вод Белого моря.

Изменчивость солености Белого моря

Соленость в Белом море испытывает существенные сезонные изменения. По солености Белого моря проанализированы данные с декадной станции Д-1. Пределы сезонных колебаний солености в губе Чупа достигают 28‰. В течение года в придонном слое Чупинской губы соленость изменяется незначительно по сравнению с ее изменчивостью на поверхности (рис. 6.36).

При этом достаточно устойчивый галоклин препятствует ветровому перемешиванию воды в губе. Данные по ст. Д-1 показывают, что за последние 40 лет в этом районе значения солености несколько увеличились. Среди причин увеличения солености воды можно отметить изменчивость водообмена с Баренцевым морем, изменчивость циркуляции вод моря, обусловленную крупномасштабными климатическими процессами, и колебания в поступлении пресного стока. Как показали наши исследования стока рек в регионе, он меняется незначительно (менее 10%). На рис. 6.37 показаны колебания солености по ст. Соловки за период 1977–1999 гг.

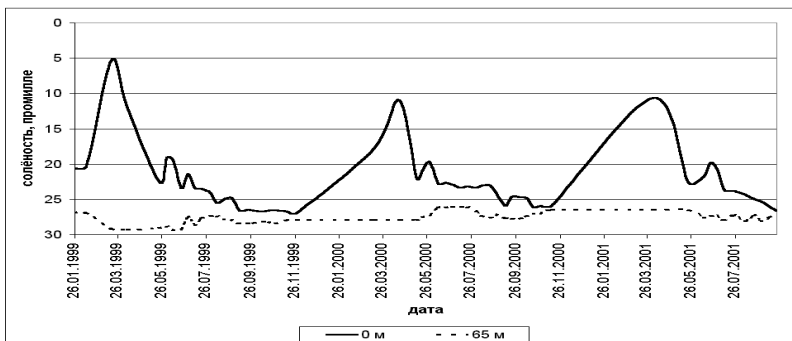


Рис. 6.36. Колебания солености Белого моря в поверхностном слое и у дна (ст. Д-1) за 1999–2001 гг.

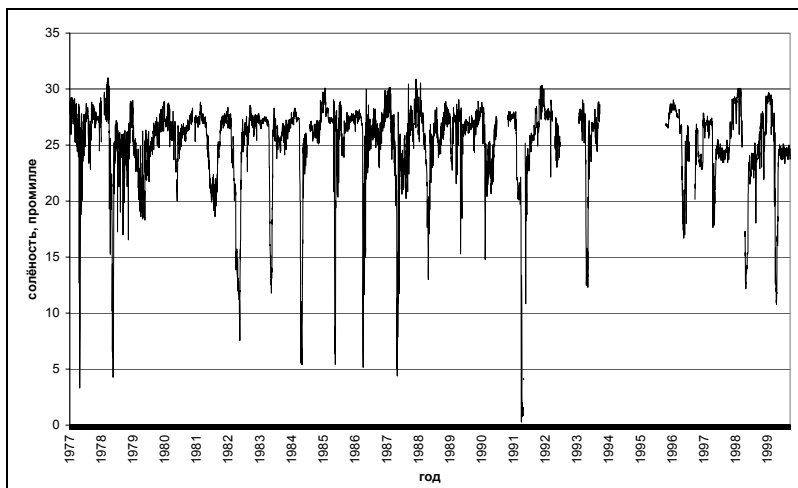


Рис. 6.37. Колебания солености по ст. Соловки (среднесуточные данные)

Особенности изменчивости уровня моря

Колебания уровня моря можно разделить на крупномасштабные, синоптические и мезомасштабные, см. подробно в (Инжебейкин, 2004). Крупномасштабные включают в себя многолетние, в том числе и тектонические колебания, сезонные и полюсный прилив. Синоптические – это движения, к которым относятся флуктуации уровня с масштабами несколько суток, например, неперiodические сгонно-нагонные колебания,

обусловленные прохождением атмосферных образований, ветровой деятельностью с теми же временными масштабами. Мезомасштабные колебания обуславливаются приливными полусуточными и суточными движениями и их гармониками, а также сейшевыми флуктуациями.

С конца 1940-х – начала 1950-х гг. отмечается спад уровня воды, что согласуется с ходом пресного стока и осадков (Брызгалов, Иванов, 2000; Климат Карелии..., 2004). На рис. 6.38 в нескольких районах показан многолетний ход уровня воды Белого моря, рассчитанный нами по данным, предоставленным Ю.И. Инжебейкиным.

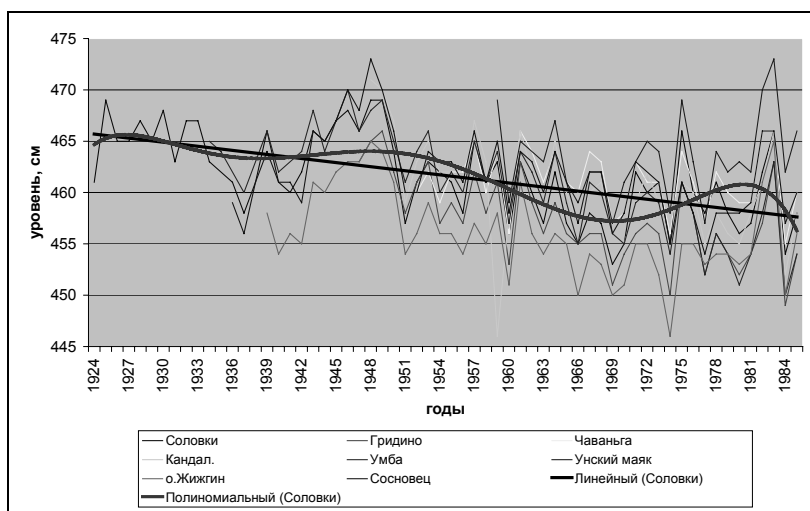


Рис. 6.38. Многолетние колебания уровня Белого моря по среднегодовым данным 8-ми ГМС. На рисунке приведены тренды: линейный и полиномиальный 6-й степени по ст. Соловки

Ход уровня по всем станциям почти идентичен по времени наступления пиков, различия наблюдаются лишь по амплитуде, что говорит об общности процессов всей акватории, определяющих его изменения. Достаточно заметный отрицательный тренд свидетельствует, что уровень Белого моря за период 60 лет понизился почти на 10 см. В настоящее время указанные тенденции сохраняются. Понижение уровня моря наблюдается практически по всем станциям, исключение составляет лишь Двинский залив, где отмечено его некоторое повышение, (на рис. 6.38 это видно по ходу уровня станции Унский маяк).

В спектре $S_n(\omega)$, построенном для ст. Соловки с применением сглаживания функцией Хемминга (рис. 6.39), доминируют низкочастотные составляющие с временными масштабами 2, 4-5 и 15 лет. Близкие цикличности проявляются во временных рядах уровня и температуры морей Северной Атлантики (Алексеев, 1997), а также в изменчивости теплосодержания вод течения Гольфстрим и его ветви – Северо-Атлантического течения (Смирнов и др., 1998; Бышев, 2003), влияние которого сказывается на гидрологическом режиме Белого моря.

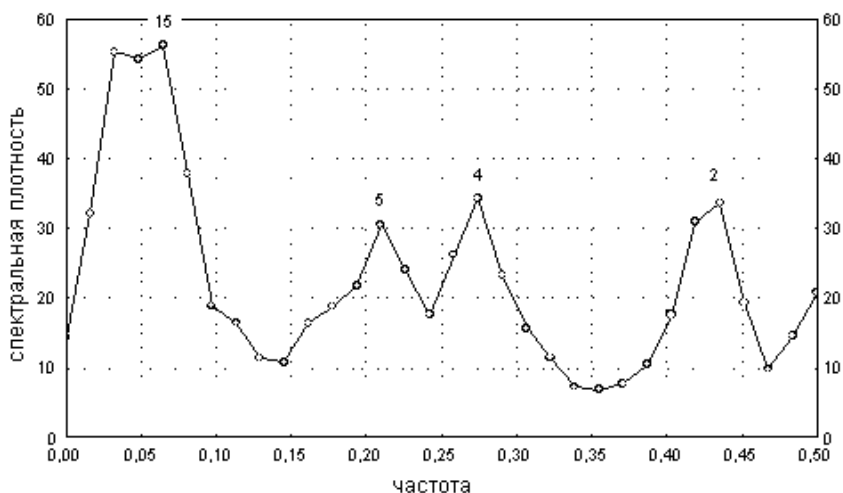


Рис. 6.39. Функция спектральной плотности $S_n(\omega)$ для уровня моря (ст. Соловки), цифры над пиками показывают временные масштабы, в годах

Согласно работе (Инжебейкин, 2004), во внутригодовом ходе уровня Белого моря выделяется один максимум в октябре и один минимум в феврале. Минимум уровня в феврале объясняется выносом вод из Белого моря в Баренцево при воздействии преобладающих юго-западных ветров, наиболее интенсивных в этом месяце. В октябре-ноябре отмечается смена ветров северных направлений на южные и увеличивается повторяемость штормов с нагонными повышениями уровней, которые и формируют максимум уровня в октябре. Локальные экстремумы уровня на большей части акватории выражены незначительно, исключение составляет минимум в апреле.

По осредненным внутригодовым многолетним значениям уровня Белого моря в работе (Инжебейкин, 2004) выделяется три типа годового хода уровня. К первому типу, характеризующемуся наличием максимума в октябре и минимума, обычно, в феврале, относятся почти все посты по наблюдению за уровнем в Бассейне и Кандалакшском заливе. Величина сезонных колебаний составляет 15–19 см. Второй тип кроме основного максимума в октябре и основного минимума в феврале имеет еще два хорошо выраженных максимума (в марте и июле) и два минимума (в апреле и августе), связанных с годовыми колебаниями атмосферных осадков и стока, за исключением пика в марте, который может быть вызван сезонным поступлением баренцевоморских вод. Этот тип характерен для колебаний уровня в Горле, Двинском и Онежском заливах. Значение вторичного минимума в апреле близко, а в некоторых пунктах и ниже основного годового минимума. Величина годового хода составляет 17–21 см. Третий тип имеет два максимума (в мае и октябре) и два минимума (в августе и марте). Подобное изменение среднемесячных уровней происходит в устьях р. Онега и р. Сев. Двина (Инжебейкин, 2004) и вызвано годовыми колебаниями стока.

Мезомасштабная изменчивость уровня Белого моря определяется приливными полусуточными колебаниями, которые индуцируются баренцевоморскими приливами. Собственно беломорский прилив не превышает 2 см (Белое море, 1991), однако так называемый «полусный прилив» с периодом порядка 14 мес. и лунный нодальный с периодом 18,6 года составляют для Белого моря 4,3 см (Инжебейкин, 2004). На мелководье приливная волна влияет на положение среднего уровня, увеличивая его до 8 см. Беломорский прилив носит несимметричный характер: время роста несколько больше времени падения.

Наблюдения за колебаниями уровня поверхности моря показывают, что наименьшие амплитуды ~55 см отмечаются на открытых акваториях, а в эстуарии р. Кемь они увеличиваются до 95 см (район Рабочеостровска). Наибольшие амплитуды колебаний уровня были зафиксированы в Керетской губе на станциях Б1 и Б2 (115 см). На станции Б1 приливо-отливные движения имеют правильный характер, время нарастания величины уровня поверхности моря равно времени его падения. На станции Б2 выявлено характерное для закрытых акваторий Белого моря неравенство в продолжительности приливных и отливных фаз. Все материалы измерений свидетельствуют о явном преобладании полусуточной приливной волны M_2 . Вместе с тем, заметна и суточная приливная волна S_1 , которая проявляется в изменении амплитуд полусуточных приливов и достигает

6 см на станции Б1 и 10 см на станции Б2 между последовательными приливо-отливными циклами. При средней высоте прилива 115 см суточная составляющая достигает 8.6%. Спектр колебаний уровня типичен для чисто приливного периодического процесса с одной доминирующей гармоникой на частоте, соответствующей периоду 12 часов с несколькими гармониками с кратными частотами. На частоте полусуточного прилива когерентность колебаний уровня моря и температуры воды составляет 0.80, а разность фаз – четверть приливного цикла, т.е. температурные внутриволновые изменения запаздывают по отношению к приливному колебанию уровня. Подробно прилив-отливные явления описаны в работе Ю.И. Инжебейнина (2003).

Некоторые особенности формирования и разрушения ледового покрова

Хотя первые систематические наблюдения за состоянием ледового покрова у берегов Белого моря относятся к 1894–1898 гг., но до сих пор режимные характеристики ледовых явлений в Белом море изучены недостаточно. В последние годы в работах В.В. Мелентьева, В.И. Черноока по данным спутниковых измерений приведены новые данные о ледяном покрове моря (см. Filatov et al., 2005). Кратко отметим полученные в их работах некоторые результаты.

По данным дистанционных и контактных измерений известно, что начало интенсивного ледообразования в Белом море приходится на декабрь. При этом, процесс формирования припайного льда распространяется от вершин заливов в сторону центральной части моря. В январе зона 75–99%-ной вероятности встречи льда охватывает значительную часть акватории моря. Меньшая вероятность встречи льда в это время лишь в районах влияния Баренцевоморского течения, прижатого к восточной оконечности Кольского полуострова (к Терскому Берегу). Фиксируемое в этот период накопление льдов у восточных берегов заливов является следствием преобладания в регионе юго-западных ветров.

Основной прирост мощности льдов в море происходит в феврале, в это время почти вся акватория моря, за исключением крайней северо-западной части Воронки оказывается охваченной зоной 75-99%-ной вероятности встречи льдов (Лукин и др., 1985). Преобладают в этот период белые и серо-белые льды. Преобладание серо-белых льдов в феврале прослеживается лишь в глубоководных центральной и восточной частях Бассейна. В марте на всей акватории моря, за исключением западных участков, преобладают белые тонкие однолетние льды. Под действием ветров юго-западных и северо-западных направлений, имеющих в это время

максимальную повторяемость, льды смещаются из западных районов моря в центральные и восточные. У Карельского и Поморского берегов образуются участки открытой воды (см. рис. 6.40, полученный в видимом и ИК диапазоне).

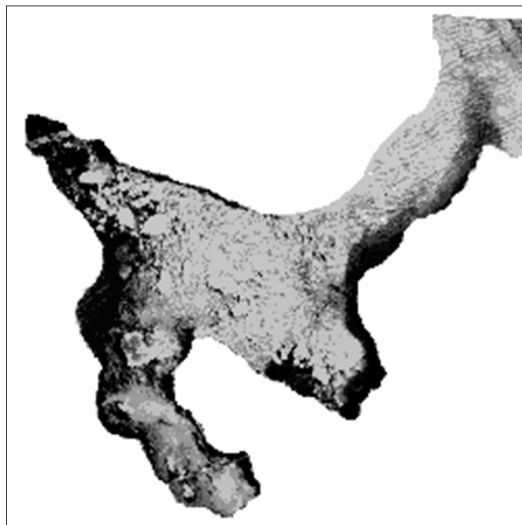


Рис. 6.40. Изображение ледяного покрова в марте 2003 г. по данным спутника НОАА в видимом диапазоне

Зона 2-3-балльной торосистости охватывает большую часть Онежского залива, весь Двинский залив, центральную и восточную часть Бассейна, Горло, Воронку. Торошенные (до 3-4 баллов) льды занимают всю площадь Мезенского залива и обширные области на востоке Воронки.

При переходе температуры воздуха через 0°C над акваторией моря начинается весеннее таяние льда, которое происходит во второй декаде апреля. Преобладающие в море белые льды под действием ветров западных направлений выносятся из заливов и Бассейна в восточную часть моря, откуда далее под действием стоковых течений и ветра они поступают в Горло, а затем и в Воронку. Интенсивный процесс разрушения льда и очищения моря идет в мае. Окончательное же очищение моря ото льда, как правило, происходит в первой декаде июня. Характер ледовых процессов в море от года к году и от месяца к месяцу может значительно меняться.

Выводы

Таким образом, на основе натуральных наблюдений (контактных и дистанционных) определены закономерности проявления термических и динамических процессов климатического, синоптического и мезомасштабов. Показаны основные особенности гидрофизических процессов и их изменчивость. Изучена изменчивость океанологических параметров, таких как температура, соленость и уровень моря.

Установлено, что временные ряды среднесуточных данных температуры поверхностного слоя Белого моря имеют значимые квазипериодические колебания с масштабами 2–4 и 5–7 лет и за рассматриваемый период (1977–1999 гг.) содержат положительные тренды (в среднем 0.5°C) по всему морю. Для большинства районов Белого моря по многолетним данным осенний тренд отрицательный.

Среди исследуемых процессов и явлений важно учесть при моделировании термогидродинамики и экосистемы моря следующие:

- фронтальные зоны, апвеллинги, вихревые структуры разного генезиса, шлейфы речных вод;
- квазипостоянный фронт в Горле, положение которого незначительно меняется во времени;
- проявление фронтальных разделов разного генезиса, положение которых меняется во времени в зависимости от объемов речного стока, фазы прилива и комплекса гидрометеорологических условий;
- генерацию квазипостоянного апвеллинга в районе Соловецких островов;
- проявление экмановских прибрежных апвеллингов, генерируемых ветром, приливами в разных районах моря;
- образование вихрей, когерентных мезомасштабных структур в районе фронтальных разделов Двинского и Онежского заливов с пространственными размерами несколько километров.

Полученные данные могут использоваться для калибрации и верификации разрабатываемых моделей.

Выполненные исследования уточняют представления о крупномасштабной изменчивости Белого моря при современных изменениях климата и создают основы для выявления закономерностей изменений экосистемы моря при возможных антропогенных и климатических изменениях в будущем.

Глава 7 ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ВОД БЕЛОГО МОРЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

7.1. Физическая и математическая постановки задачи, верификация результатов расчета

Введение

Применение методов численного моделирования для анализа натуральных данных позволяет получать гидродинамически согласованную и физически обоснованную картину океанологических процессов в Белом море.

Плотность доступной потенциальной энергии в Белом море на порядок превышает аналогичные оценки для океана и еще больше, примерно, на два порядка плотность потенциальной энергии выше в Белом море по сравнению с океаном. Это связано как с небольшой (≈ 67 м) средней глубиной Белого моря, так и с существенными приливными отклонениями уровня. Плотность доступной потенциальной энергии e , связанная с отклонениями уровня от равновесного состояния, может быть оценена (Гилл, 1986) как $e = 1/2 \iint \rho g \zeta^2 \delta x \delta y / \bar{H}$, где ρ – плотность морской воды, g – ускорение свободного падения, ζ – отклонение уровня моря от равновесного состояния, \bar{H} – средняя глубина моря. Высокая плотность потенциальной энергии связана с сильной стратификацией вод Басейна и Кандалакшского залива Белого моря. Так, частота Вэйсяля-Брента в этих районах в слое скачка плотности может достигать значений 10^{-2} с $^{-1}$ при типичных оценках для океана 10^{-4} с $^{-1}$.

Комплекс приливных движений, будучи периодическим процессом, регулярно воспроизводит близкие по пространственно-временной структуре поля вертикальных токов, которые, в свою очередь, преобразуют потенциальную энергию стратификации вод в доступную потенциальную энергию. Доступная потенциальная энергия может уже непосредственно переходить в кинетическую энергию движения вод Белого моря. В работе Гилла (Гилл, 1986) уравнение для скорости изменения геопотенциала

имеет основным слагаемым величину $wg\rho$ (обозначения те же, что и выше, w – вертикальная скорость). Это слагаемое в силу пространственной неоднородности поля вертикальных токов приводит к разности потенциалов в случае начального равновесного состояния геопотенциальных поверхностей, см. также работу А.С. Мони́на (Монин и др., 1975). Поэтому в Белом море из-за доминирования приливных процессов имеет место быстрое преобразование потенциальной энергии в доступную потенциальную энергию и затем в кинетическую энергию движения вод.

Гидрологический режим Белого моря отличает большой объем речного стока, составляющий порядка 4% в год от объема моря. Это важно для поддержания плотностной стратификации вод и, соответственно, для продукции потенциальной энергии в Белом море. При этом сильная стратификация вод Белого моря поддерживается, с одной стороны, большим объемом речного стока, а с другой стороны, регулярным поступлением высокосоленых, а зимой еще и холодных, вод с приливными течениями из Горла Белого моря в глубинные и придонные слои моря. Бассейн и три крупных залива Белого моря соединены с Воронкой моря неглубоким и узким проливом, называемым Горлом Белого моря. Этот пролив, в силу своей узости и незначительной глубины (анализ этих факторов приводится ниже), выступает в роли своеобразного гидродинамического фильтра.

Собственный прилив в Белом море пренебрежимо мал и по возвышению уровня моря составляет не более 3 см. Приливная волна из океана поступает в Бассейн через Воронку и Горло, глубина которого составляет порядка 30-40 м. Фазовая скорость распространения приливной волны $c = (gH)^{1/2}$ в Горле составляет порядка $20 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$, что соответствует на данной широте внешнему радиусу деформации R_d около 200 км ($R_d = c/f$, где f – параметр Кориолиса). Ширина Горла составляет в разных местах от 40 до 50 км, что приводит к фильтрации эффектов вращения из приливной волны, проходящей в Горле. Таким образом, соотношение ширины Горла и баротропного радиуса деформации Россби дает основание считать Горло Белого моря относительно мелким и узким проливом (см. рис. 7.1).

Поэтому приливная волна, приходящая из Баренцева моря, в Горле имеет характеристики гравитационной волны, что сказывается на водообмене Бассейна и заливов Белого моря, поскольку инерционная компонента, имеющая нулевую собственную фазовую скорость, могла бы заметно ухудшить водообмен Белого моря. При выходе из Горла в Бассейн моря при несущественном увеличении глубины возрастает горизонтальный масштаб процессов (более 200 км) до значений радиуса деформации, что

приводит к обратному процессу – в балансе сил приливной волны начинает участвовать инерционная компонента и происходит уменьшение фазовой скорости распространения приливной волны. Следствием этого становится образование устойчивого гидрологического фронта на выходе из Горла в Бассейн моря. Нетрудно оценить, что при выходе в Бассейн Белого моря градиент давления, связанный с наклоном уровня приливной волны, как минимум, на порядок превышает силу Кориолиса. Поэтому при выходе приливной волны в Бассейн должны происходить процессы геострофического приспособления, сводящиеся к излучению волн Пуанкаре (инерционно-гравитационных волн) и выделению медленной геострофической компоненты, удовлетворяющей уравнению сохранения квазигеострофического потенциального вихря.

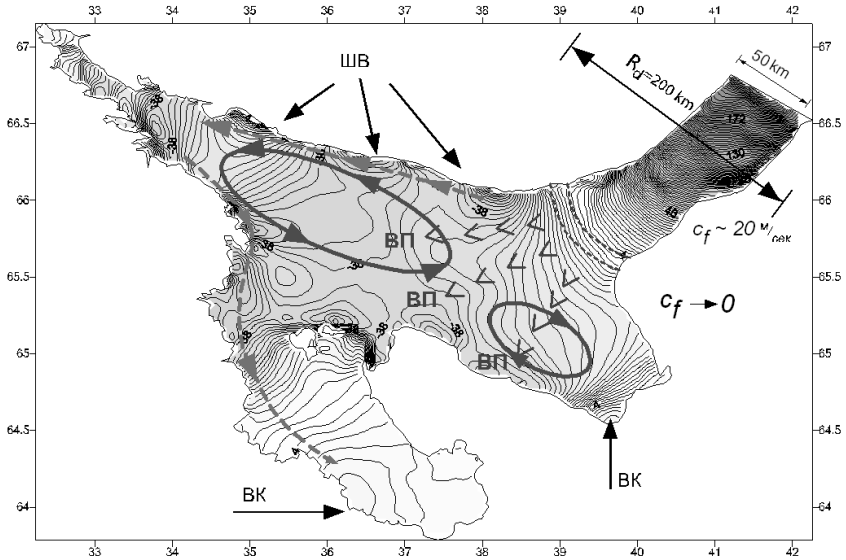


Рис. 7.1 Качественная схема динамических процессов в Белом море. Здесь R_d – внешний радиус деформации приливной волны в Горле Белого моря; ШВ – шельфовые волны; ВК – волны Кельвина; ВП – волны Пуанкаре; --- --- расположение гидрологического фронта у выхода из Горла; >>> излучение волн Пуанкаре; \rightarrow - - \rightarrow предполагаемый циклонический вдольбереговой перенос, связанный с прибрежным бароклинным эффектом ШВ и ВК; $\rightarrow\rightarrow\rightarrow$ квазигеострофическое крупномасштабное течение

Известно (Гилл, 1986), что восстановление геострофического равновесия происходит примерно за инерционный период (на широте Белого моря порядка 13 часов), при этом близкий период имеет и основная компонента прилива волна M_2 . В результате происходит квазипериодическое нарушение геострофического равновесия вновь приходящей приливной волной и, с неизбежностью, возникают процессы, восстанавливающие геострофический баланс.

Последовательность этих двух процессов и составляет основу формирования гидродинамических процессов в Белом море. К указанным двум процессам – быстрым волнам Пуанкаре и медленным квазигеострофическим движениям, выделенным из приходящей приливной волны, – добавляются еще волны Кельвина, физически обосновывающие удовлетворение условия непротекания на твердых береговых стенках и наклонном дне для медленной геострофически сбалансированной компоненты (см. рис.7.1).

По результатам обработки данных наблюдений течений и температуры движения приливного периода энергетически доминируют среди всех видов движений различных пространственно-временных масштабов в динамике вод Белого моря.

Весьма развиты на Белом море процессы турбулентного перемешивания, что объясняется интенсивными приливными течениями и наличием условий для неустойчивости вод. На мелководьях с интенсивными приливными течениями происходит практически полное перемешивание по вертикали, как, например, в Горле Белого моря, что дополнительно усиливает процесс формирования гидрологических фронтов на границе раздела стратифицированных вод Бассейна и перемешанных, квазиоднородных по вертикали вод Горла.

7.1.2. Математическая постановка задачи моделирования динамики вод Белого моря

В модели используется система так называемых примитивных уравнений, записанных в правой сферической системе координат. Задача ставится для полужамкнутого бассейна с переменным дном, соединенного с океаном мелким и узким проливом, по которому дважды в сутки приходит из океана приливная волна. Рассматривается течение в тонком слое со свободной поверхностью в стратифицированной по плотности несжимаемой жидкости на вращающейся сфере в системе координат (λ, θ, z) , где λ – долгота, $\theta = \pi - \varphi$ – дополнение до географической широты, $z = a - r$, где r – расстояние до

центра Земли, a – ее радиус; u, v, w – зональная, меридиональная и вертикальная составляющие скорости течения, соответственно.

Исходная система уравнений имеет вид:

уравнение гидростатики

$$\partial p / \partial z = \rho g ; \quad (7.1)$$

которое после интегрирования по вертикальной координате от свободной поверхности ζ дает выражение для гидростатического давления на произвольном горизонте z (Саркисян, (1977):

$$p(\lambda, \theta, z) = p_0 + g \int_0^z \rho dz, \quad p_0 = p_{atm} - \rho g \zeta ; \quad (7.2)$$

где: ρ – плотность воды; g – ускорение силы тяжести; p – гидростатическое давление; p_0, p_{atm} – давление на уровне $z = 0$ и атмосферное, соответственно; ζ – отклонение поверхности моря от равновесного состояния.

уравнения движения по горизонтальным координатам:

$$\partial u / \partial t + \Lambda(u) + u v \operatorname{ctg} \theta / a + 2 \omega \cos \theta v = - (\partial p_0 / \partial \lambda + g \int_0^z (\partial \rho / \partial \lambda) dz) / (\rho_0 a \sin \theta) + F_T(u) + A_L \Delta u ; \quad (7.3)$$

$$\partial v / \partial t + \Lambda(v) - u^2 \operatorname{ctg} \theta / a - 2 \omega \cos \theta u = - (\partial p_0 / \partial \theta + g \int_0^z (\partial \rho / \partial \theta) dz) / (\rho_0 a) + F_T(v) + A_L \Delta v ; \quad (7.4)$$

где:

$$\Lambda(y) \equiv (\partial(yu) / \partial \lambda + \partial(yv \sin \theta) / \partial \theta) / (a \sin \theta) + \partial(yw) / \partial z ; \quad (7.5)$$

оператор, описывающий адвективный перенос; y – любая из компонент горизонтальной скорости;

$$F_T(y) = \partial(q \partial y / \partial z) / \partial z ; \quad (7.6)$$

оператор вертикальной турбулентной вязкости; q – коэффициент вертикальной турбулентной вязкости, полагаемый здесь известным; A_L, A – коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии, соответственно, принятые в данных расчетах равными и постоянными;

уравнение неразрывности несжимаемой жидкости:

$$\operatorname{div}(\mathbf{u}) \equiv (\partial u / \partial \lambda + \partial(\sin \theta v) / \partial \theta) / (a \sin \theta) + \partial w / \partial z = 0. \quad (7.7)$$

уравнение состояния:

$$\rho = \rho(T, S). \quad (7.8)$$

уравнения переноса тепла и солей:

$$\partial f / \partial t + \Lambda(f) = \partial(k \partial f / \partial z) / \partial z + A \Delta f = F_T(f / \text{Pr}) + A \Delta f; \quad (7.9)$$

где f – температура T или соленость S воды; $F_T(f)$ – оператор вертикальной турбулентной диффузии; Pr – турбулентное число Прандтля.

Граничные условия:

на твердой боковой границе принимаются условия прилипания для горизонтальных скоростей и условия тепло- и солиизоляции :

$$u = v = 0; \quad (7.10)$$

$$\partial T / \partial n = 0; \quad \partial S / \partial n = 0, \quad (7.11)$$

где: n – внешняя нормаль к твердой границе;

на дне выполняются условия тепло- и солиизоляции (7.11), и задан поток импульса:

$$\tau_n / \rho = q \partial \mathbf{u} / \partial z, \quad (7.12)$$

здесь: τ_n – напряжение трения на дне, \mathbf{u} – вектор горизонтальной скорости;

нормальная компонента скорости \mathbf{u}_n на дне обращается в нуль:

$$\mathbf{u}_n = 0. \quad (7.13)$$

на поверхности моря $z = -\zeta$ задано напряжение трения ветра τ_a , а также потоки тепла и солей:

$$q \partial \mathbf{u} / \partial z = -\tau_a / \rho_0; \quad (7.14)$$

$$k \partial T / \partial z = -Q_t, \quad k \partial S / \partial z = -Q_s. \quad (7.15)$$

для вертикальной компоненты скорости на $z = -\zeta$ ставится кинематическое условие:

$$w = d\zeta / dt = -(d(p_o - p_{atm}) / dt) / (g \rho_0). \quad (7.16)$$

на жидкой границе в устьях рек компонента скорости, нормальная к границе, температура и соленость полагаются известными функциями вертикальной координаты и времени:

$$u_n = u_{nb}(z, t), \quad (7.17)$$

$$T = T_b(z, t), \quad S = S_b(z, t). \quad (7.18)$$

на жидкой боковой границе в Горле Белого моря заданы уровень, температура и соленость как функции пространственных координат и времени:

$$\zeta = \zeta_s(\lambda, \theta, t), \quad T = T_s(z, t), \quad S = S_s(z, t) \quad (7.19)$$

При этом в точках «втекания», где фазовая скорость c_f рассматриваемой величины вблизи границы направлена внутрь области, значения функции на границе задаются из условия (7.19). В точках «вытекания», где фазовая скорость направлена из области, расчет значений функций производится на основе метода радиационного излучения с использованием схемы Орланского (1969) для нахождения фазовой скорости распространения возмущения в приграничной области. То есть, если

$$(c_f * n) > 0 \text{ (точки вытекания, } n \text{ - внешняя нормаль),} \quad (7.20)$$

то значение функции f находится из условия:

$$\partial f / \partial t + c_f \partial f / \partial n = 0; \quad (7.21)$$

где $c_f = - (\partial \tilde{f} / \partial t) / (\partial \tilde{f} / \partial n)$ – фазовая скорость распространения возмущений \tilde{f} по нормали к границе во внутренней области, прилегающей к жидкой границе для любой из функций в условиях (7.19).

В противном случае, если

$$(c_f * n) < 0 \text{ (точки втекания),} \quad (7.22)$$

то f задается из условия (7.19)

Начальные условия для температуры, солёности и горизонтальных компонент вектора скорости известны:

$$t = t^0, s = s^0, u = u^0, v = v^0; \quad (7.23)$$

где скорости u^0, v^0 находятся из решения т.н. диагностической задачи (Саркисян, 1977), по известным полям температуры и солёности (плотности).

В данной формулировке коэффициенты вертикальной турбулентной вязкости и диффузии, связанные между собой турбулентным числом Прандтля, предполагаются известными. Для их нахождения привлекается полуэмпирическая модель Лаундера и др. (Launder et al., 1975), в которой использованы два уравнения – уравнение баланса турбулентной энергии и уравнение для скорости диссипации энергии.

Коэффициенты турбулентной вертикальной вязкости q и диффузии k введены следующим образом:

$$q = - \underline{u}_i' \underline{w}' / (\partial u_i' / \partial z), i=1, 2; \quad (7.24)$$

$$k = - \underline{f}' \underline{w}' / (\partial \tilde{f}' / \partial z); \quad (7.25)$$

где w', u_i', f' – пульсации компонент скорости и скалярной величины f ; черта снизу здесь и далее означает осреднение по ансамблю. Турбулентное число Прандтля Pr введено как $Pr = q/k$.

В соответствии с положениями модели Лаундера и др. используются эволюционные уравнения баланса для интенсивности турбулентной энергии и для скорости вязкой диссипации турбулентной энергии, вводимых по определению как:

$$b = (\underline{u}^2 + \underline{v}^2 + \underline{w}^2) / 2, \quad (7.26)$$

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad i, j = 1, 2; \quad i \neq j; \quad (7.27)$$

где: ν – коэффициент кинематической вязкости.

В предположении, что изменения всех величин по горизонтали пренебрежимо малы по сравнению с изменениями по вертикали, справедливым для условий Белого моря, а также в пренебрежении адвективным переносом потоков и напряжений Рейнольдса по сравнению с диссипацией и порождением этих величин за счет работы напряжений сдвига и силы плавучести, уравнения модели при больших числах Рейнольдса можно представить в виде:

$$db / dt = \partial q (\partial b / \partial z) / \sigma_b / \partial z + P + G - \varepsilon; \quad (7.28)$$

$$d\varepsilon / dt = \partial q (\partial \varepsilon / \partial z) / \sigma_\varepsilon / \partial z + c_{1\varepsilon} P \varepsilon / b + c_{1\varepsilon} (1 - c_{3\varepsilon}) G \varepsilon / b - c_{2\varepsilon} \varepsilon^2 / b; \quad (7.29)$$

где :

$$P = -\underline{u}'w' \partial u / \partial z - \underline{v}'w' \partial v / \partial z; \quad (7.30)$$

$$G = g \underline{\rho}'w' / \rho_o; \quad (7.31)$$

здесь P – порождение турбулентности за счет сдвига скорости, G – порождение турбулентности за счет работы сил плавучести (при устойчивой стратификации – гашение турбулентности силами плавучести).

После преобразования и упрощения уравнений (7.28)-(7.29) решение сводится к следующим соотношениям для определения коэффициентов турбулентного обмена по вертикали:

$$q = F(Rf) b^2 / \varepsilon; \quad (7.32)$$

$$F(Rf) = (1 - Rf / Rf_{cr}) / (1 - Rf); \quad (7.33)$$

где Rf , Rf_{cr} и c_m – число Ричардсона, динамическое число Ричардсона и эмпирическая константа, соответственно.

Полученные соотношения справедливы как при устойчивой, так и неустойчивой стратификации и могут быть применены для описания процессов турбулизации при зимней конвекции.

Сформулируем граничные условия для уравнений (7.28) – (7.31).

Вблизи дна должна выполняться асимптотика логарифмического слоя трения:

$$\text{при } z_1 = (H(\lambda, \theta) - z) \rightarrow 0 :$$

$$\partial u / \partial z = u^* / (\kappa z_1), \quad u = u^* \ln(z_1 / z_o) / \kappa. \quad (7.34)$$

При этом на дне задано напряжение трения, полученное из решений логарифмического слоя, т.е., при $z_1 = 0$:

$$\mathbf{u}^* |\mathbf{u}^*| = - \tau_h / \rho = q \partial \mathbf{u} / \partial z. \quad (7.35)$$

Следуя работе Лаундера, Сполдинга (Launder et al., 1972), величину турбулентной энергии и скорости вязкой диссипации запишем в виде:

$$b = |\mathbf{u}^*|^2 / c_\mu^{1/2}, \quad \varepsilon = |\mathbf{u}^*|^3 / (\kappa z_1); \quad (7.36)$$

здесь τ_h – есть напряжение сдвига на дне; \mathbf{u} – вектор горизонтальной скорости на верхней границе логарифмического слоя; \mathbf{u}^* – динамическая скорость, z_o – шероховатость поверхности, $\kappa = 0.435$ – константа Кармана.

Выражая \mathbf{u}^* через значения скорости \mathbf{u} вблизи дна, имеем:

$$b = \kappa^2 |\mathbf{u}|^2 / (c_\mu^{1/2} (\ln(z_1/z_o))^2); \quad (7.37)$$

$$\varepsilon = \kappa^2 |\mathbf{u}|^3 / (z_1 (\ln(z_1/z_o))^3). \quad (7.38)$$

Условия (7.37) и (7.38) ставятся на некотором расстоянии h от дна ($h \gg h_v$), где $h_v \sim \nu / u^*$ – толщина вязкого подслоя в котором существенны эффекты молекулярной вязкости, и соотношения (7.1.37)-(7.1.38) становятся неверны. При этом h должна быть много меньше толщины экмановского подслоя, а также масштаба Монино-Обухова L^* :

$$h \ll h_e \sim (q / (2f))^{1/2}, \quad h \ll L^* \approx (u^{*2} / N^2)^{1/2}. \quad (7.39)$$

здесь: f – параметр Кориолиса; N – частота Вейселя-Брендта.

На поверхности моря задано напряжение трения ветра τ_a , а также справедливы соотношения (7.1.36) на расстоянии h от свободной поверхности моря, на которой:

$$\mathbf{u}^* |\mathbf{u}^*| = - \tau_a / \rho_0. \quad (7.40)$$

При наличии интенсивного обрушения поверхностных волн на поверхности задается поток турбулентной энергии:

$$q \partial b / \partial z = - M. \quad (7.41)$$

Величина потока турбулентной энергии, соответствующая скорости диссипации ветровых волн вследствие обрушения, выражается через характеристики ветрового волнения и, в конечном счете, через динамическую скорость ветра u_a^* (или через U_{10} – скорость ветра на высоте 10 м), см. (Phillips, 1985):

$$M = 1.44 * 10^{-3} u_a^{*3} \ln(0.6 / c_d), \quad (7.42)$$

где c_d – коэффициент сопротивления морской поверхности.

Скорость диссипации турбулентной энергии вблизи поверхности в этом случае (на некотором расстоянии h) выразим через средний масштаб турбулентности l_h и интенсивность турбулентных пульсаций (соотношение Колмогорова, 1942):

$$\varepsilon = c_{\mu} b^{3/2} / l_h, \quad (7.43)$$

где масштаб l_h —, в соответствии с положениями модели, принят равным:

$$l_h = \kappa c_{\mu}^{1/4} h. \quad (7.44)$$

Данная модель турбулентного обмена по вертикали была многократно апробирована и имеет согласованный набор эмпирических параметров, учитывающий и «пристеночные» поправки.

7.1.3. Параметры численной модели и используемая информация

Разностная сетка по пространству имела размерность $133 \times 110 \times 22$ точек. Такое разрешение обеспечивало шаг по оси $\theta \approx 3.4$ км, по оси $\lambda \approx$ от 3.3 км до 3.5 км. Радиус деформации первой бароклинной моды ($R_d = NH/f$) при этом составляет в Белом море от 5 км до 20 км. Для целей нашего исследования такое пространственное разрешение по горизонтали удовлетворительно.

Горизонты по вертикали были выбраны следующими: ζ , 3,5, 6,8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 40, 60, 70, 80, 90, 100, 120, 150, 180, 220 и 260 м. Здесь ζ — свободная уровенная поверхность. Шаг по времени составлял 3 минуты. Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и диффузии приняты одинаковыми и равными $2 \times 10^4 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$.

Число Прандтля, равное 0.8, как и значения констант, настроены на описание свободно-сдвигового течения с учетом «пристеночных поправок» и следуют работе Гибсона и Лаундера (1975).

Задание граничных условий для уровня на входе в Горло Белого моря производилось на основе зависимостей, полученных путем обработки рядов натуральных наблюдений за последние 30 лет на береговых гидрометеопостах и предоставленных Государственным океанографическим институтом. Очевидно, что уравнения регрессии содержат все гармоника приливных движений, а также статистический эффект разного рода непериодических колебаний. Использовались уравнения регрессии в двух береговых точках на разных берегах на входе в Горло Белого моря. Для задания значений уровня между точками на жидкой границе использовалась линейная интерполяция между значениями на берегах.

Зависимости имеют следующий вид (время t задано в часах):

для северной точки на западном Кольском берегу Горла Белого моря (гидрометеорологический пост Терско-Орловский)

$$\zeta_1(t) = 0,8088154793 * 5,1 * \cos(\pi/180 * ((13,9430356 * t) + 274,2344961 - 216,8)) + 0,8834757209 * 14,8 * \cos(\pi/180 * ((15,0410686 * t) + 187,4798548 - 330,1)) + 1,037439823 * 209,7 * \cos(\pi/180 * ((28,9841042 * t) + 100,8260815 - 334,0)) + 1,0 * 58,9 * \cos(\pi/180 * ((30,0410686 * t) - 28,6)) \quad (7.45),$$

для северной точки на восточном берегу Горла Белого моря (гидрометеорологический пост Моржовец)

$$\zeta_2(t) = 0,8088154793 * 1,4 * \cos(\pi/180 * ((13,9430356 * t) + 274,2344961 - 272,7)) + 0,8834757209 * 9,7 * \cos(\pi/180 * ((15,0410686 * t) + 187,4798548 - 344,1)) + 1,037439823 * 237,9 * \cos(\pi/180 * ((28,9841042 * t) + 100,8260815 - 358,9)) + 1,0 * 45,3 * \cos(\pi/180 * ((30,0410686 * t) - 62,0)) \quad (7.46)$$

Начальная фаза определялась согласованием с натурными данными для середины мая 1995г., предоставленными Северным управлением по гидрометеорологии г. Архангельска.

Информация о расходах рек (таблица 7.1) и температуре воды в реках (таблица 7.3) и в Горле Белого моря (таблица 7.4), а также о сезонном ходе температуры воздуха (таблица 7.5) задавалась из работы (Гидрометеорология., Вып. 1, 1991).

Информация о среднемесячных полях ветра (таблица 7.2.) бралась из Атласа Северного Ледовитого океана (Атлас океанов. 1980). Принималось в каждый момент времени постоянное по акватории напряжение трения ветра, которое рассчитывалось из принятых ежемесячных компонент скорости ветра путем линейной интерполяции между месяцами.

Приводимые ниже данные (таблица 7.1-7.6.), кроме таблицы 7.2, взяты из работы в Белом море (Гидрометеорология., Вып. 1, 1991).

Т а б л и ц а 7. 1

Расходы рек Онега и Северная Двина по месяцам (м³·с⁻¹)

	Онега	Северная Двина
Май	88 508	537 050
Июнь	51 257	307 540
Июль	24 802	148 810
Август	16 534	99 206
Сентябрь	18 187	109 127

Таблица 7.2

**Компоненты скорости ветра максимальной повторяемости по месяцам (см/с).
Знаки соответствуют принятой в данной работе системе координат**

	U_{10}	V_{10}
Май	5	70
Июнь	-80	-10
Июль	-120	120
Август	-70	-10
Сентябрь	-70	30

Таблица 7.3

Температура воды в реках в слое 0–3 м по месяцам (С°)

	$T^{\circ}C$
Май	5
Июнь	12
Июль	18
Август	16
Сентябрь	10

Таблица 7.4

Температура воды (постоянная по вертикали) в Горле Белого моря по месяцам (С°)

	$T^{\circ}C$
Май	-0,5
Июнь	3,0
Июль	6,5
Август	8,2
Сентябрь	7,7

Таблица 7.5

Температура воздуха в приводном слое по месяцам (С°)

	$T^{\circ}C$
Май	2,7
Июнь	8,2
Июль	11,6
Август	11,5
Сентябрь	8,0

Таблица 7.6

Соленость (постоянная по вертикали) в Горле Белого моря по месяцам (в промиллях, ‰)

	$S^{0/00}$
Май	28,8
Июнь	29,2
Июль	29,4
Август	29,5
Сентябрь	29,8

Учитывался суточный ход температуры воздуха, который рассчитывался следующим образом: задавалось синусоидальное изменение температуры с периодом 24 часа, при максимуме температуры в 15 часов и минимуме температуры в 3 часа ночи с амплитудой, равной 0.4 табличного значения, и так, чтобы среднее значение температуры за сутки сохранялось.

В силу причин, указанных выше, из всех составляющих теплового баланса на поверхности моря учитывался только обмен явным теплом на основе балк-формулы, см. Буш (1979):

$$q_t = A + C_{\theta} u_{10} \Delta T_s [K * m * c^{-1}]; \quad (7.47)$$

где :

$$\begin{aligned} A &= 2,6 * 10^{-3}, & C_{\theta} &= 0,86 * 10^{-3} \text{ при } u_{10} \Delta T_s < 0; \\ A &= 2,0 * 10^{-3}, & C_{\theta} &= 0,97 * 10^{-3} \text{ при } 0 < u_{10} \Delta T_s < 25; \\ A &= 0, & C_{\theta} &= 1,46 * 10^{-3} \text{ при } u_{10} \Delta T_s > 25; \\ A &= 1,2 * 10^{-3}, & C_{\theta} &= 1,41 * 10^{-3} \text{ для всех данных;} \end{aligned}$$

Здесь ΔT_s – разность температур воздуха и воды (К).

Задача решалась с использованием двух вариантов начальных условий для температуры и солености, характерных для окончания весеннего сезона. В одном случае задавались трехмерные горизонтально-неоднородные начальные поля температуры и солености на основе выполненных в мае 1995г. экспедиционных исследований, охвативших почти всю акваторию Белого моря. Во втором варианте эти начальные условия осреднялись по горизонтам, исключая тем самым пространственную изменчивость по горизонтали, но сохраняя при этом основные черты стратификации вод, сформированные в зимний сезон.

Таким образом, начальные условия запишем:

$$\begin{aligned} T|_{t=0} &= T^0(\lambda, \theta, z), \quad S|_{t=0} = S^0(\lambda, \theta, z), \\ V|_{t=0} &= V^0(\lambda, \theta, z), \quad \zeta|_{t=0} = \zeta^0(\lambda, \theta). \end{aligned} \quad (7.48)$$

Вопросы численной реализации изложенной постановки, выполнение интегральных законов сохранения и результаты верификации результатов расчета можно найти в работах (Семенов и др., 1999, Семенов, 2004).

7.1.4. Воспроизведение устойчивых особенностей гидрологической структуры вод Белого моря

Известны такие характерные особенности гидрологической структуры Белого моря, как гидрологические фронты, наличие перемешанных до дна и сильно стратифицированных районов, полюсы «холода» и «тепла».

Крупномасштабные гидрологические фронты в Белом море имеют различную природу. Одним из наиболее устойчивых является фронт у выхода из Горла в Бассейн. Принято считать, что фронт разделяет перемешанные по вертикали воды Горла и стратифицированные воды Бассейна (Елисов, 1997). По нашим расчетам, термический фронт, разделяющий стратифицированные и перемешанные воды, в данном месте (рис. 7.2) имеет сложную природу. Важную роль при этом играет выход гравитационной приливной волны из Горла в Бассейн, что приводит к излучению волн Пуанкаре и существенному уменьшению групповой скорости распространения гравитационной приливной волны, при котором резко уменьшается скорость переноса. Это и может служить причиной образования фронта. В работах Кравца впервые (Кравец, 1981) отмечались сведения о шельфовых фронтах. Так, по данным авиатермосъемок поверхности моря Кравец выделял термический фронт у выхода из Горла и к северу от Соловецких островов. Эти фронты названы им шельфовыми фронтами.

В расчетах на математических моделях фронты также проявляются к северу от Соловецких островов. Происхождение их, судя по данным расчета, носит адвективный характер и связано с орографическими подъемами холодных глубинных вод (апвеллинг), см. рис. 7.2. В результате, вдоль склона Соловецких островов образуется почти непрерывный фронт.

Отдельно необходимо рассматривать т.н. стоковые фронты, которые образуются на границе речных и морских вод. Годовой объем речного стока весьма велик и составляет, как уже указывалось, около 4% от объема моря в год. Стоковые фронты хорошо проявляются в Двинском заливе, за счет стока пресных вод реки Северной Двины, и отмечаются они по градиенту солености и по температуре воды. Особенно отчетливо они проявляются в период весеннего паводка.

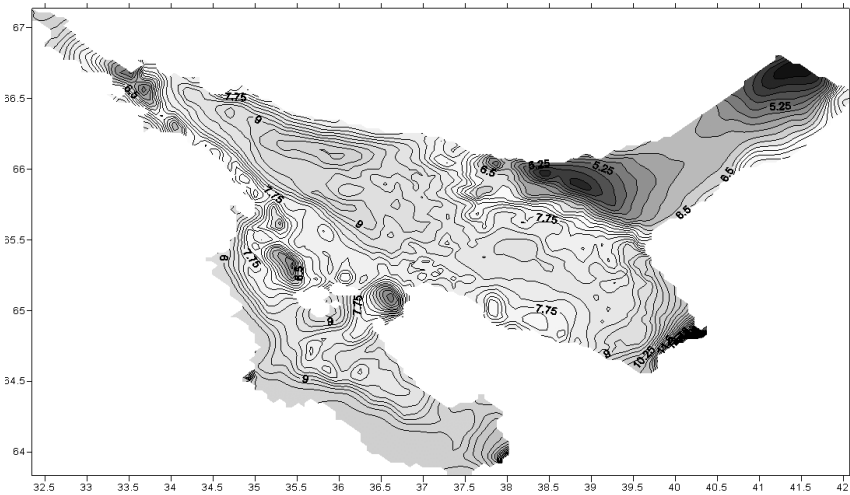


Рис. 7.2. Температура воды на поверхности (август)

В качестве характерной черты гидрологии вод Белого моря разными авторами указывалось наличие районов стратифицированных вод – Бассейн, Кандалакшский залив – и районов перемешанных вод – Горло, Онежский залив (разрез «О-Г», см. схему разрезов на рис. 7.4). Соответствующие свойства вод указанных районов демонстрируют разрезы на рис. 7.5.

Установленными особенностями гидрологии вод Белого моря считаются полюсы тепла и холода (Бобков, 1998). Согласно работе (Гидрометеорология., Вып. 1, 1991, стр.72) центр полюса холода расположен в районе ст. 122 и 123 стандартного разреза Роскомгидромета от Зимнегорского маяка до Ивановых луд, (разрез *i – Z*). Для наглядности покажем этот район на карте температуры на горизонте 42 м, (рис. 7.3). Как видно, минимум температуры в этом месте достаточно отчетливо выделен. На рис. 7.4 показано положение разрезов в Белом море.

На поверхности полюс холода перекрывается зонами повышенной температуры воды и поэтому на картах поверхностной температуры воды не наблюдается. Этот факт также присутствует в расчетах на математических моделях, см. рис. 7.2 и 7.3.

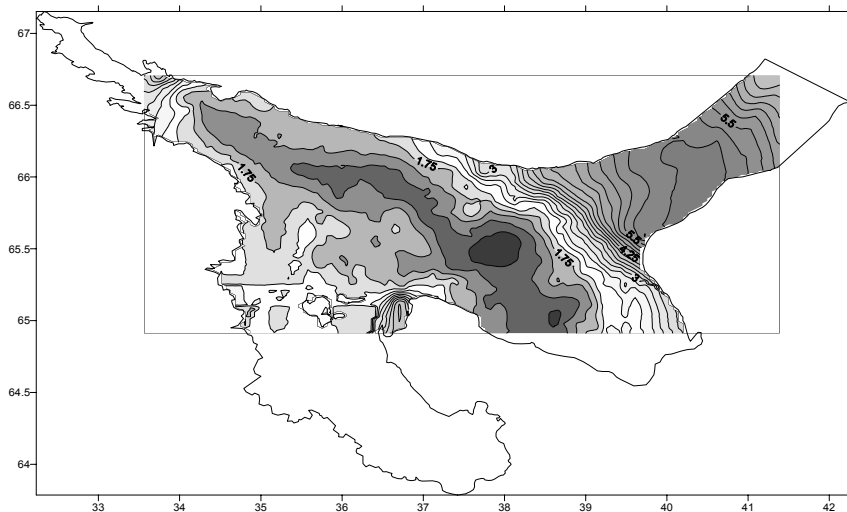


Рис. 7.3. Температура воды на горизонте 42м (август)

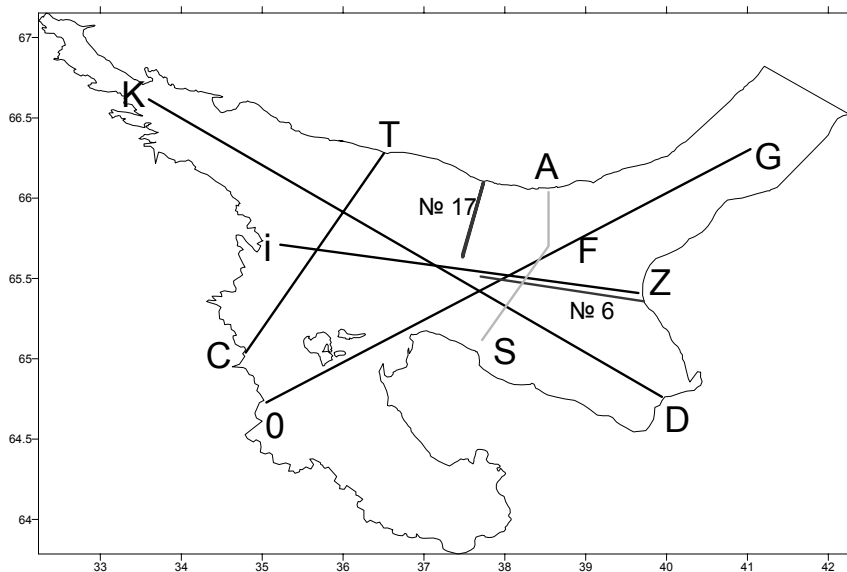


Рис. 7.4. Схема разрезов (расчеты на модели и натурные наблюдения с судов)

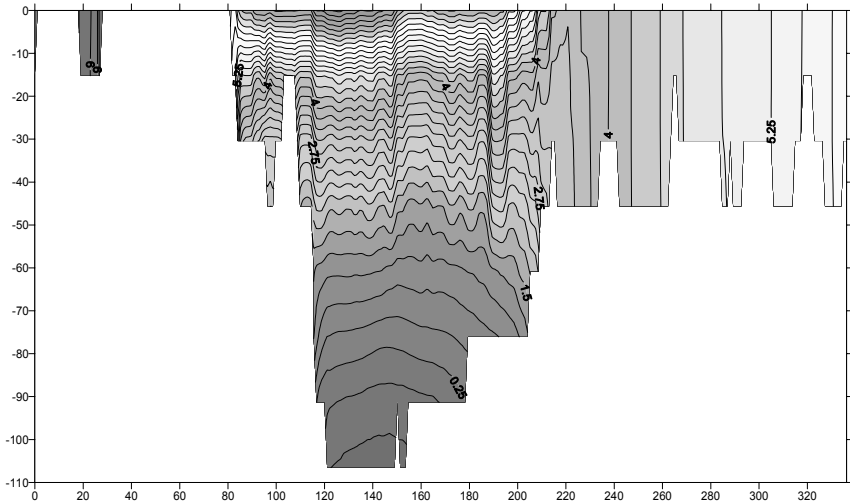


Рис. 7.5. Распределение температуры воды на разрезе О-Г (Онежский залив – Горло у входа в Воронку)

Что касается полюса тепла, то известно, что он находится на входе в Кандалакшский залив. Согласно карте температуры на поверхности (рис. 7.5), в Кандалакшском заливе находится наиболее теплая вода открытой части моря. Разрез температуры от Кандалакшского залива в Двинской залив (рис. 7.6) показывает общую качественную картину формирования этих полюсов. Хорошо видно, что в Кандалакшском заливе в поверхностном слое имеет место опускание изотерм, которое формирует полюс тепла, и именно в месте, соответствующем полюсу холода, изотермы выклиниваются у поверхности.

7.1.5. Сравнение результатов численного моделирования с данными измерений

Наиболее полные и качественные измерения гидрологической структуры вод Белого моря были сделаны во время экспедиции на научно-исследовательском судне «Проф. Штокман» летом 2001г. Эти данные, полученные с помощью буксируемого гидрофизического зонда, и были использованы для сравнения результатов модельных расчетов и натуральных измерений.

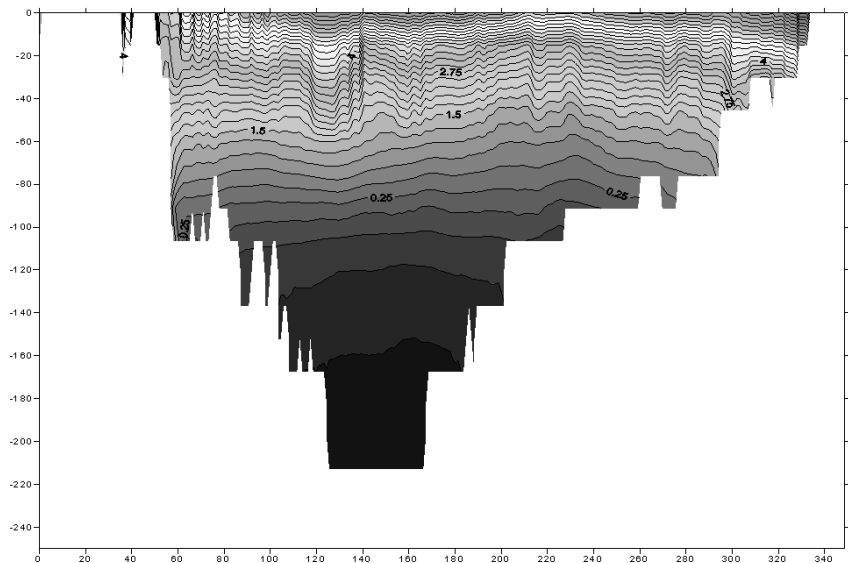


Рис. 7.6. Распределение температуры воды на разрезе К-Д
(от Кандалакшского залива к Двинскому заливу)

Измерения выполненные с НИС «Проф. Штокман», воспроизводят обсуждавшийся полюс холода (рис. 7.7). Отчетливо виден подъем изотерм и выход их на поверхность, как и в восточной половине разреза, выполненного по модельным данным (рис. 7.8). Части разрезов, где расположены полюсы холода, пространственно близки.

Принципиальный интерес для исследователей представляет медленная геострофическая мода, остающаяся после излучения волн Пуанкаре. В принятой терминологии речь идет об остаточной приливной циркуляции. Именно при вычислении этой компоненты и возникают сложности.

Очевидно также, что термохалинные поля в Белом море формируются и поддерживаются именно остаточной циркуляцией и они, возможно, играют роль т.н. «динамической памяти». Неясно, однако, какова завихренность остаточной геострофически сбалансированной компоненты приходящей из Горла приливной волны.

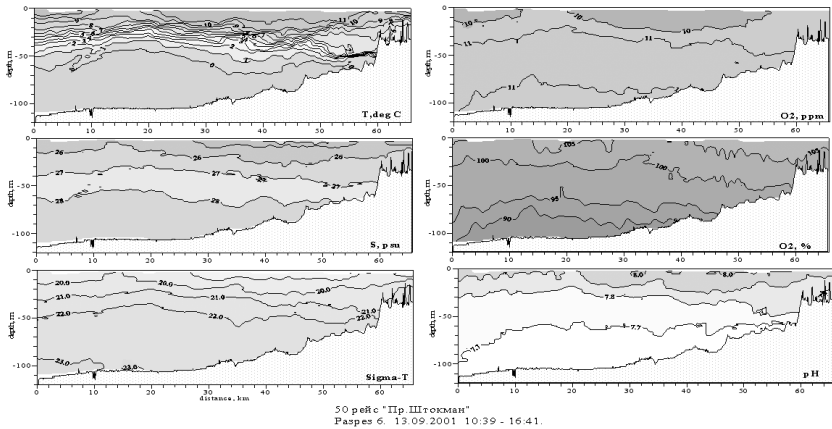


Рис. 7.7. Распределения температуры, солёности, кислорода и других характеристик, выполненные НИС «Проф. Штокман» на разрезе № 6 в августе 2001 г.

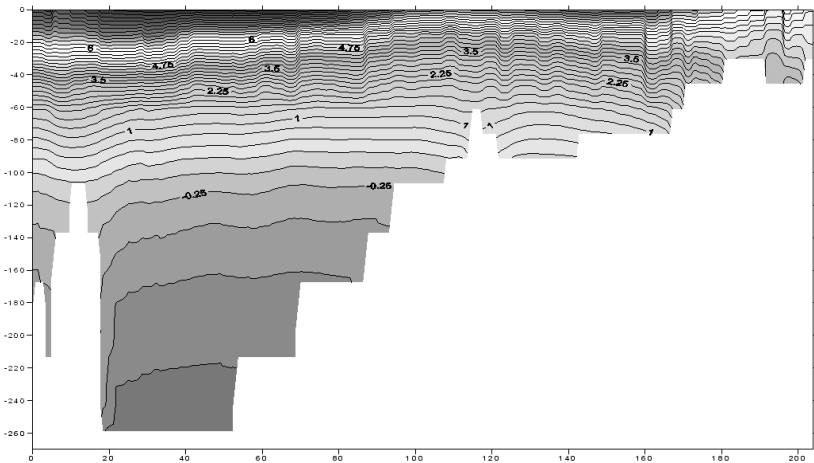


Рис. 7.8. Распределение температуры воды вдоль разреза Ивановы Луды – м. Зимнегорский, (восточная часть близка разрезу № 6)

Осредненная за десять суток (двадцать приливных циклов) циркуляция представляет собой достаточно упорядоченную картину (рис. 7.9). Вся глубоководную часть моря занимает циклонический круговорот, который отчетливо прослеживается от поверхности до дна.

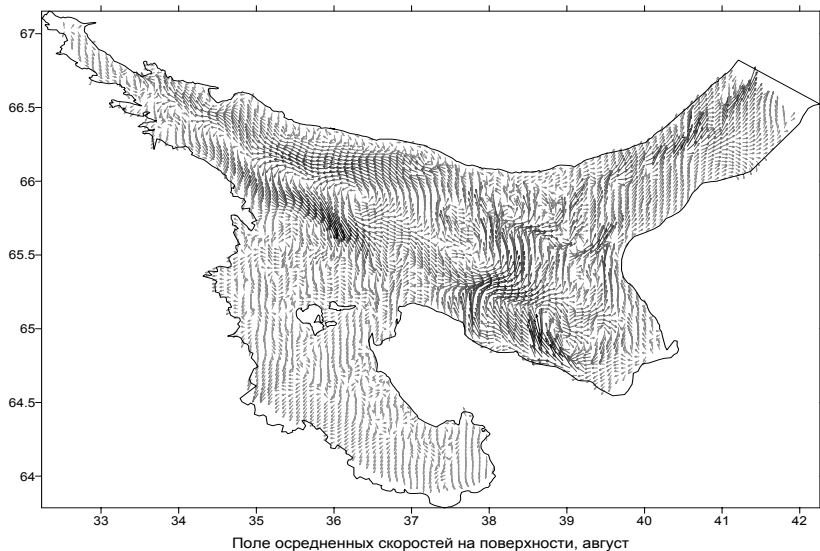


Рис. 7. 9. Поле осредненных за 10 суток скоростей течений на поверхности

Следует отметить, что остаточная циркуляция геострофически сбалансированна и удовлетворяет уравнению потенциальной завихренности. Учитывая, что основная изменчивость параметров обусловлена рельефом дна, следует ожидать, что течения должны стремиться следовать рельефу, что характерно для циклонического круговорота.

Основные крупномасштабные черты термохалинной структуры вод Белого моря формируются под действием остаточной приливной и ветровой циркуляции с учетом поступления речных вод, несущих тепло и пресную воду, а также за счет взаимодействия моря с атмосферой.

Рассчитаем на модели особенности термохалинной циркуляции вод, которая продемонстрирована на рис. 7.10 за август для того же периода, когда была рассчитана циркуляция вод, полученная прямым осреднением мгновенных скоростей. Поля скоростей в обоих случаях сопоставимы, при этом различие составляет очевидный эффект волн Кельвина (шельфовых волн) в поле скоростей термохалинной циркуляции. Это объяснимо тем, что прибрежная волновая динамика необходима для удовлетворения граничным условиям непротекания, но эффект присутствия волн исчезает при достаточном осреднении по времени. Хорошее совпадение осредненных модельных и измеренных термохалинных полей скоростей наблюдается и для глубинных горизонтов.

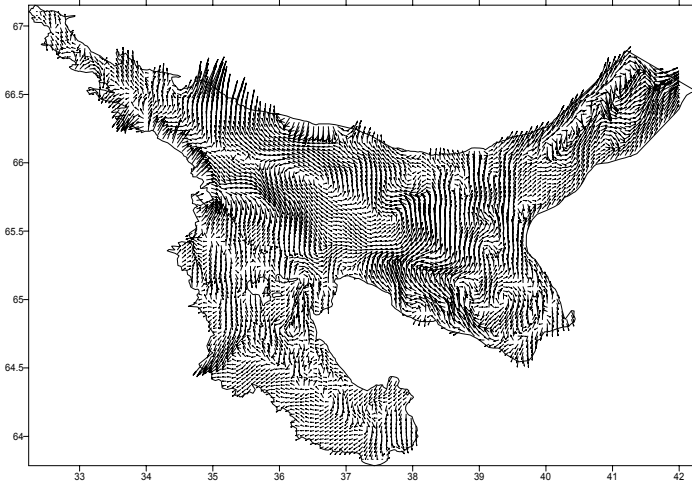


Рис. 7. 10. Термохалинная циркуляция вод на горизонте 3м (август)

При этом поле мгновенных скоростей течений представляет собой весьма сложную картину (см. рис. 7. 11).

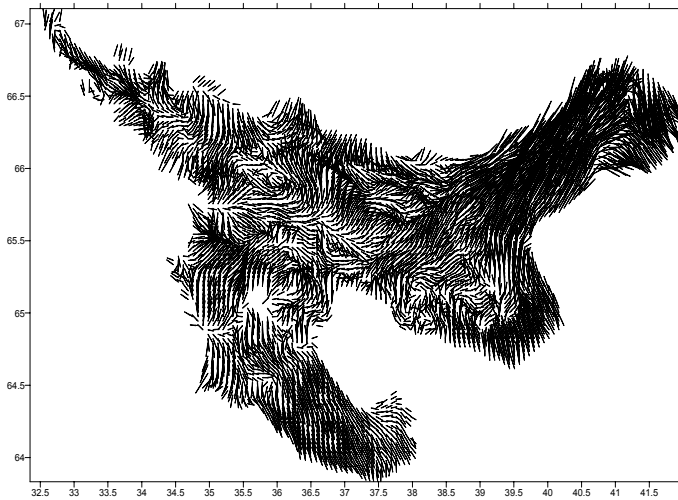


Рис. 7. 11. Поле мгновенных полных скоростей течений на поверхности (август)

По этой причине в Белом море, как нам представляется, отсутствуют устойчивые струйные вдольбереговые течения в принятом смысле, а существует устойчивый осредненный эффект волновой приливной динамики.

В расчетах были выявлены и другие важные процессы. Так, в сентябре отмечалось образование фронтальных рингов на гидрологическом фронте у Горла (рис. 7.12).

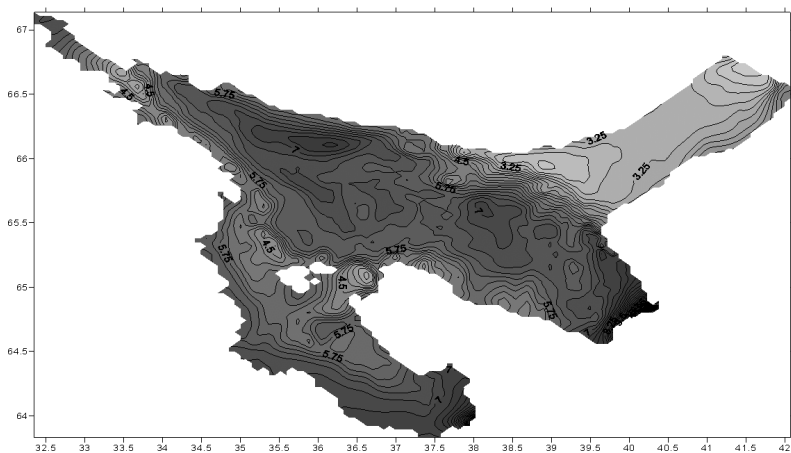


Рис. 7.12. Образование фронтального ринга у Горла (по расчетным данным о температуре воды на поверхности)

7.2. Разработка системы оперативного мониторинга гидрологической структуры вод Белого моря

7.2.1. Постановка задачи

Необходимость создания систем оперативного мониторинга (СОМ) морской среды стала очевидной после установления в последние десятилетия факта существенной изменчивости всех океанологических полей на основных пространственно-временных масштабах. Принципиальную роль в этом сыграло открытие и установление энергетической значимости процессов синоптического пространственно-временного масштаба (синоптических вихрей). В последнее время ситуация только усложнилась в связи с очевидными колебаниями уже собственно климатической нормы, что делает практически невозможным использование даже самых полных и подробных баз среднестатистических характеристик морской среды.

В итоге это привело к необходимости СОМ морской среды, учитывающих существенную пространственно-временную изменчивость океанологических полей. Каждая система оперативного мониторинга гидрофизических полей для конкретной акватории включает в себя три основных компонента: специализированную наблюдательную сеть, математический блок усвоения натурной информации и специализированную математическую численную модель, которая в итоге и вычисляет динамически согласованные, удовлетворяющие основным законам сохранения нестационарные гидрофизические поля в режиме реального времени.

В основе любой оперативной системы лежит расчет с заданной точностью параметров морской среды (полей течений, температуры, солёности, плотности и давления) в реальном времени и с необходимым пространственно-временным разрешением.

Математические модели, как часть системы мониторинга гидрофизических полей, начали впервые разрабатываться в 1980-е годы в СССР сначала как динамико-стохастические модели, в которых на основе метода фильтрации Кальмана данных измерений производилась коррекция получаемого решения, и в итоге находилась оценка искомого решения. В основном, такие работы выполнялись в Морском гидрофизическом институте г. Севастополя.

Принципиально новым подходом в формулировке математической задачи мониторинга гидрофизических полей явилась постановка задачи мониторинга как обратной некорректной задачи анализа глубоководных гидрофизических измерений с использованием систем сопряженных уравнений для определения краевых условий на основе метода множителей Лагранжа (Семенов, Бирюк, 1991; Нечаев и др., 1992).

Толчком к постановке и решению таких задач послужила международная программа «Разрезы», инициированная академиком Марчуком. Следует отметить, что в восьмидесятые годы прошлого столетия отечественная океанология опережала в данном направлении зарубежные разработки. Начиная с 1990-х годов и по настоящее время, за рубежом ведутся активные разработки именно в этом направлении.

К настоящему времени в нашей стране были реализованы примеры систем оперативного мониторинга гидрофизических полей в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН. В основном они касались обработки в оперативном режиме данных глубоководных термохалинных измерений на энергетических полигонах Гольфстрима (программа «Разрезы», 1984 г.), Курошио (эксперимент «Мегаполигон», 1985 г.), мезомасштабном полигоне в Баренцевом море к северо-западу от Новой Земли (1997 г.) и в южной части моря в 21 рейсе НИС «Ак. Вавилов» (2005 г.).

Наиболее затратной частью реализации постановки задачи оперативного мониторинга является обеспечение функционирования наблюдательной сети. Именно этот этап и тормозит развитие СОМ для конкретных акваторий. В выполненных ранее расчетах в качестве оперативных данных использовались данные глубоководных термохалинных измерений, получаемые в оперативном режиме с борта научно-исследовательского судна. Реализация постоянно действующей СОМ предполагает выполнение натуральных измерений в течение всего периода работы СОМ. Эти измерения могут быть выполнены как исследовательским судном, так и на основе стационарной наблюдательной сети с использованием и дистанционных методов измерений со спутников, самолетов и т.д.

При этом решается сложная обратная задача обработки натуральных измерений, что часто составляет основную математическую проблему.

Принципиальный интерес представляют иные постановки СОМ, в частности, на основе прямого решения краевой задачи, что возможно при отсутствии протяженных жидких границ, когда используются граничные условия, измеряемые на береговых станциях, и к тому же имеется принципиальная возможность задания в оперативном режиме параметров доминирующих процессов. Начальные условия измеряются при этом нечасто или, в силу специфики динамики вод, вообще забываются через некоторое время, и решение определяется уже граничными условиями. Именно такая ситуация предполагается для условий Белого моря.

По этой причине в настоящее время наиболее готовой к работе является оперативная система мониторинга гидрофизических полей Белого моря, для которой впервые постановка задачи СОМ Белого моря была осуществлена в период 1-15 августа 2004 г. и затем реализована в период 21-й экспедиции на НИС «Ак. Вавилов» в июне 2005 г. и в августе-сентябре 2006 г.

Лидирующее положение оперативной системы Белого моря (СОМ БМ) обусловлено именно спецификой термогидродинамики вод Белого моря. К настоящему времени вся совокупность полученных натуральных данных и выполненных расчетов по динамике вод Белого моря свидетельствует о доминировании приливных составляющих в пространственно-временной изменчивости гидрофизических полей Белого моря. Собственный прилив Белого моря пренебрежимо мал и составляет 1-2 см. Поэтому прилив в Белом море вызывает приливная волна, приходящая из Баренцева моря и поступающая в Бассейн (принятое название центральной части моря) через Горло Белого моря. В данном случае важно, что Горло – это относительно узкий (от 30 до 40 км) и мелкий (от 20 до 45 м глубины) пролив.

Эти обстоятельства позволяют с приемлемой точностью задавать приходящую в Бассейн Белого моря приливную волну на основе данных измерений уровня двух береговых станций, расположенных недалеко от входа в Горло Белого моря (гидрометпост Орловско-Терский и гидрометпост Моржовец). К сожалению, оба поста в настоящее время закрыты. Пока приходится пользоваться уравнениями регрессии, полученными на основе 30-летнего ряда наблюдений за уровнем моря на этих постах.

Так или иначе, но приливную волну, приходящую в Белое море из Баренцева моря, можно задать. В ряде работ (Семенов и др., 1999, Семенов, 2004) было показано, что остаточная приливная циркуляция ответственна за формирование устойчивых крупномасштабных особенностей гидрологии вод Белого моря. При этом важен учет термохалинной структуры вод, поскольку именно она выступает в роли динамической памяти, сохраняющей остаточный эффект приливных движений.

Физический механизм работы приливных движений состоит в периодическом воспроизведении поля вертикальных движений по устойчивой пространственно-временной схеме и последующем преобразовании потенциальной энергии стратификации вод в доступную форму за счет вертикальных движений. Доступная потенциальная энергия уже непосредственно переходит в кинетическую энергию движений, оставляя при этом в термохалинной структуре вод интегральный остаточный эффект. Таким образом, создается крупномасштабная устойчивая циркуляция вод.

Остаточная циркуляция ответственна за формирование основных особенностей гидрофизических полей, при этом начальные условия, в смысле горизонтальной структуры полей, в основном забываются за 15-20 дней. Все сказанное и дает основание предполагать возможность постановки задачи оперативного мониторинга вод Белого моря, на первом этапе – как краевой задачи, поскольку основные особенности формируются приливом, а прилив в Белом море возможно оперативно задавать. Указанная физическая концепция и была положена в основу работ во время проведения экспедиционных исследований в июле-августе 2004 г., в экспедиции на НИС «Ак. Вавилов» в июне 2005 г. и в 2006 г.

При существующем в настоящее время положении дел единственным источником информации, поступающей в оперативном режиме, является оперативная информация о приводном слое атмосферы, а также информация береговых постов и гидрометеостанций о температуре, атмосферном давлении в приземном слое воздуха, о температуре и уровне моря непосредственно у берега моря. Информация о температуре и уровне моря непосредственно у берега моря может быть использована с большой осторожностью.

Совокупность гидрометеорологической информации, которую необходимо задавать в оперативном режиме в соответствии с изложенной постановкой задачи, включает в себя срочные наблюдения на постах Орловско-Терском и Моржовец за уровнем, температурой и соленостью воды; измерения расходов и температуры воды в устьях всех основных рек (Северной Двины, Онеги, Нижнего Выга и других рек, особенно на берегах Кандалакшского залива); срочную информацию о состоянии атмосферы в приводном слое, включая атмосферное давление, температуру воздуха, количество осадков. Фактически, положение с необходимой оперативной информацией сложнее: оба гидрометеопоста – Орловско-Терский и Моржовец – закрыты.

Были приняты следующие решения: 1) использовать для задания уровня на входе в Горло Белого моря уравнения регрессии с коррекцией их, в случае необходимости, по таблице приливов для конкретного года (отметим сразу, что коррекция не превышала нескольких сантиметров); 2) применять для задания расходов воды, тепла и соли в устьях рек климатические данные (это приближение наиболее сильное); 3) использовать для задания потоков импульса и тепла на поверхности моря оперативную информацию Гидрометцентра Беломорской ВМБ в г. Северодвинске.

Обоснование принятых решений опирается на результаты работ по численному моделированию динамики вод Белого моря. В частности, было установлено, что приливная циркуляция, заданная по климатическим данным, эффективно восстанавливает все основные устойчивые особенности гидрофизических полей Белого моря. Серьезные ошибки в расчет могли быть внесены при условии сильных ветров над акваторией Баренцева моря (и, соответственно, развития штормовых нагонов). Наиболее сильным приближением в постановке задачи оперативного мониторинга было использование климатической информации для задания расходов воды, тепла и солей в устьях рек. Как известно, расход рек весьма велик и составляет около 4% в год от объема моря. За счет стока рек в значительной степени формируется верхний деятельный слой моря, причем не только в восточной его части, где впадает Северная Двина.

Следует отметить, что последние годы в центральной Европейской части являются, как правило, аномальными по количеству выпавших осадков и средней температуре воздуха, что, очевидно, сказывается на расходах рек, водосбор которых захватывает Европейскую часть, а это Северная Двина и Онега, составляющие основную часть речного стока в Белое море. Поэтому наибольшие расхождения расчетов и наблюдений приходятся как раз на соленость, на распределение которой решающее влияние оказывают расход рек и осадки.

Целесообразно перед началом расчета выполнять несколько реперных глубоководных станций с целью учета стратификации вод, сформировавшейся при конкретных предшествующих зимних условиях, что и было реализовано в экспедиции НИС «Ак. Вавилов» в июне 2005 г. Из всей совокупности краевых условий, только данные о поле приземного атмосферного давления и температуре воздуха в приводном слое задавались в оперативном режиме с дискретностью через 6 часов. Это позволяет относительно надежно рассчитывать температуру воды в поверхностных слоях. Как указывалось ранее, краевые условия для солёности воды оценивались приблизительно, по климатическим данным. Таким образом, в результатах расчётов солёности накапливались ошибки, связанные с отклонениями реальных гидрометеоусловий от среднестатистических (климатических).

Возможность использования в оперативном режиме только данных об атмосфере отчасти следует из выполненных ранее расчетов по динамике вод Белого моря, указывавших на значительную роль атмосферного воздействия на динамику гидрофизических полей Белого моря.

Оперативные данные, получаемые от ГМЦ Беломорской ВМБ, включали в себя данные от 15 до 20 береговых гидрометеостанций и гидрометпостов, расположенных на побережье и островах Белого моря. Использовались срочные измерения барического давления и температуры воздуха в приземном слое, которые имели дискретность по времени 6 часов и поступали один раз в сутки в форме таблиц. Дополнительно поступала выборочно информация о температуре воды, которая в расчетах не использовалась в силу специфики процессов, происходящих непосредственно у берега. Данная информация применялась для качественной оценки решения.

Результаты анализа давления и температуры в приводном слое использовались для определений напряжений трения ветра на поверхности моря и потоков тепла на поверхности моря в качестве граничных условий.

7.2.2. Некоторые результаты апробации системы оперативного мониторинга вод Белого моря в 2004-2006 гг.

Основной задачей исследований 2004-2006 гг. являлась верификация расчетов по СОМ с использованием натурных глубоководных термохалинных измерений и измерений уровня в контрольных точках калибровки. В 2004 г. районом работ была выбрана глубоководная часть Кандалакшского залива. Расчеты выполнялись по изложенной выше постановке задачи без начальной корректировки глубоководных слоев с целью учета зимних условий. Выбор методики апробации и построение соответствующих профилей производились заказчиком. На рис. 7.13-14 приведены расчетные и измеренные профили температуры, солёности и скорости звука на некоторых станциях.

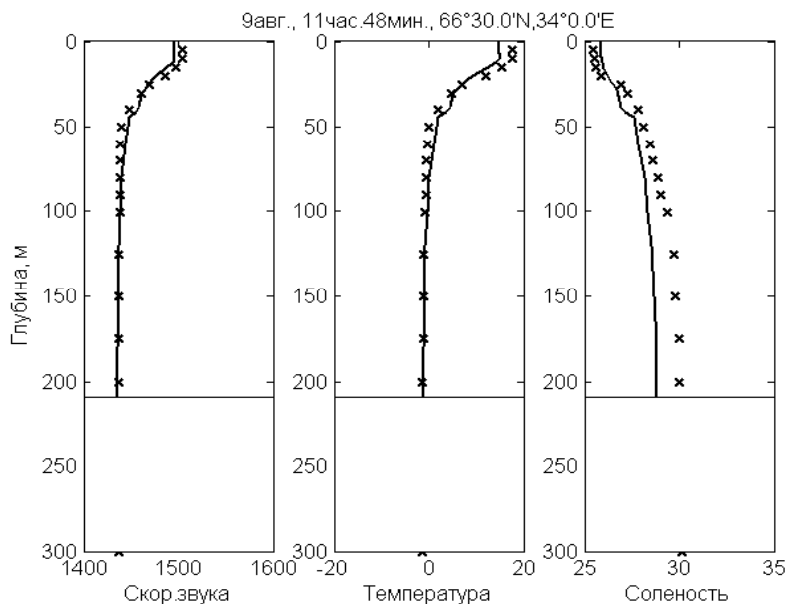


Рис. 7.13. Сравнения расчетных и измеренных профилей температуры, солености и скорости звука, полученные в экспедиции 2004г.: крестиками отмечены натурные данные, сплошные линии – модельные значения

Совпадение расчетных и натуральных данных можно считать удовлетворительным, учитывая недостаток оперативной входной информации, что особенно сказывается на расчете солености в связи с отсутствием оперативной информации о расходах рек.

В 2005г. работы проводились в период 21-й экспедиции на НИС «Ак. Вавилов» в начале июня. Методика выполнения тестирования предлагалась также представителем заказчика и состояла, исходя из ограниченности судового времени, в следующем: из пяти выполненных полностью станций, три использовались для корректировки начальных условий в глубоководной части моря. Коррекция выполнялась, начиная с горизонта 60 м, и весовая функция от этого горизонта линейно росла ко дну, достигая непосредственно у дна значения, равного единице. Две другие станции использовались для выполнения сравнения с расчетными данными. На рис. 7.14 приведены расчетные (сплошные линии) и измеренные (отмеченные крестиками) профили температуры, солености и скорости звука для этих двух станций.

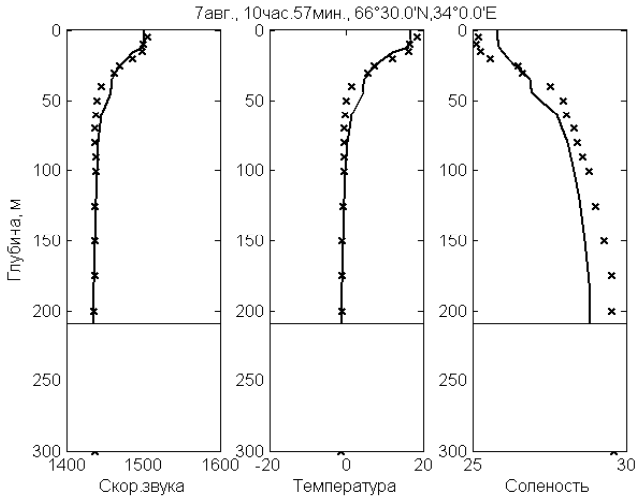


Рис. 7.14. Сравнения расчетных и измеренных профилей температуры, солености и скорости звука, полученные в экспедиции 2004г.: крестиками отмечены натурные данные, сплошные линии – модельные значения

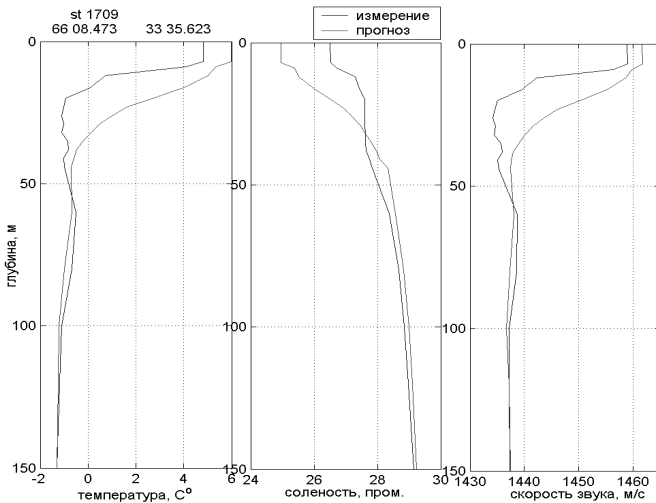


Рис. 7.15. Расчетные и фактические (измеренные) профили температуры и солености для тестовой станции № 1709

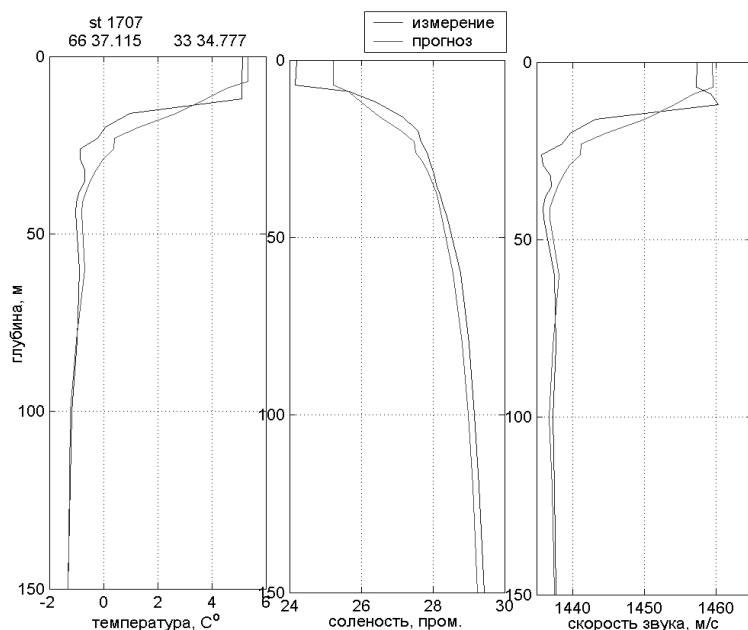


Рис. 7.16. Расчетные и фактические (измеренные) профили температуры и солености для тестовой станции № 1707

Из приведенных результатов сравнения видно, что совпадение расчетных и измеренных вертикальных профилей для двух станций различное. Если для станции 1707 совпадение вполне удовлетворительное, то в случае станции 1709 совершенно очевидно сказывается неучет начальных условий и наличие в данном месте подъема вод в верхнем слое моря, что может быть связано с локальным молодым циклоническим вихрем. Исключение таких ошибок возможно только путем задания начальных условий, и ошибки станции 1709 – реальная плата за их отсутствие.

Расхождения имеют место для солености, как и в 2004 г., и причины те же, что и в 2004 г. Эти отклонения говорят лишь о том, что климатические значения, в данном случае солености, не должны быть использованы для практических расчетов без риска допустить существенные ошибки.

По результатам апробации СОМ БМ во время 21-й экспедиции в итоговом Протоколе указывается: «первичные результаты обработки, проведенной в ходе экспедиции, показали удовлетворительную работу модели

СОМ Белого моря, что подтверждается сопоставлением результатов моделирования и экспериментально полученных ВРСЗ, приведенных в настоящем Протоколе, и подтверждает результаты, полученные в ходе апробации модели СОМ Белого моря в 2004 г..».

Для калибровки решения СОМ Белого моря в 2006 г., в отличие от предыдущих лет, использовались данные наблюдений за уровнем моря, проводимых на ГМС «Соловки». Наблюдения на данной ГМС выполняются квалифицированными специалистами, поставлены хорошо и обладают необходимой надежностью и точностью. Как указывалось, ранее выполненные работы по калибровке решения СОМ БМ 2004-2005 г.г. строились на основе сравнения с натурными термохалинными измерениями, и результаты получались удовлетворительными по отношению к количеству и качеству имеющейся оперативной информации. Качество расчета непосредственно приливной циркуляции определять казалось не столь важно, поскольку термохалинная структура вод в значительной мере определяется именно приливной циркуляцией, а с другой стороны, численная модель весьма неплохо воспроизводила известные из наблюдений точки амфидромий, что свидетельствовало об удовлетворительном описании приливной циркуляции. Тем не менее, результаты калибровки по данным ГМС «Соловки» сразу показали необходимость внесения корректировок в работу модели. На рисунке 7.17 приведены результаты этой калибровки.

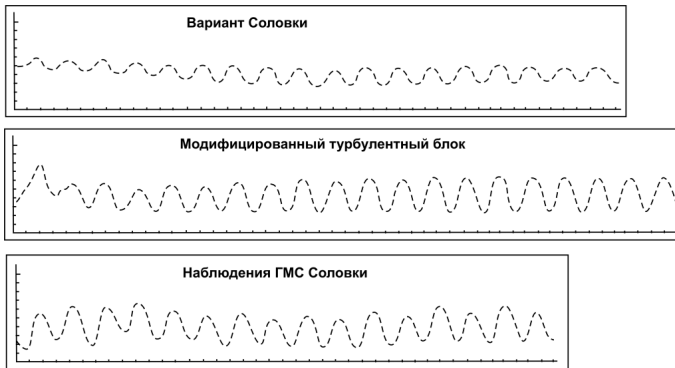


Рис. 7.17. Результаты калибровки решения СОМ Белого моря 2006 г.

Нижняя кривая – натурные данные измерений уровня моря на ГМС «Соловки». Верхняя кривая – расчет уровня по принятой ранее версии СОМ БМ. Средняя кривая – расчет уровня при измененных параметрах шероховатости и фоновых значений турбулентных потоков импульса в турбулентном блоке

Нетрудно заметить (рис. 7.18), что первоначальный вариант – верхняя кривая, апробированный в 2004-2005г.г. на основе термохалинных измерений, заметно отличается от данных прямых измерений уровня как по амплитуде (порядка 40%), так и по фазе (модельные значения фазы опережают наблюдаемую примерно на два часа). Требовалось установить причину данных расхождений. В итоге, после проведенного анализа и специально выполненных тестовых расчетов, было выяснено, что сдвиг по фазе модельного решения связан с имевшим место сдвигом по фазе при задании времени на входе приливной волны в Горле Белого моря. Заданные в итоге параметры времени соответствуют местному времени для Горла Белого моря.

Сложнее оказалось скорректировать амплитуду прилива. Вообще говоря, было ясно, что заниженные амплитуды прилива могут быть связаны с двумя причинами. Возможно, расхождение связано с неучтенными в модели местными прибрежными эффектами, поскольку пространственное разрешение порядка четырех километров слишком велико для описания мелкомасштабных эффектов в бухте в районе ГМС «Соловки». Правда, различие амплитуд достаточно велико, чтобы сводить дело только к недостаточному пространственному разрешению. Следует признать, что в ряде выполненных экспериментов удалось увеличить значения модельных амплитуд прилива за счет улучшения пространственного описания прибрежной циркуляции.

В итоге хорошего совпадения модельных и натуральных значений амплитуд прилива удалось достичь при понижении уровня трения путем модификации некоторых параметров турбулентного блока модели. Достоинством используемой в расчетах полуэмпирической $b - \varepsilon$ модели турбулентности Лаундера и др. считаем отлаженность достаточно большого количества числовых параметров, традиционно присутствующих во всех полуэмпирических моделях турбулентности. Поэтому вариантов модификации параметров было немного. С одной стороны, это параметр шероховатости, принятая оценка которого находится в диапазоне 0.1-0.01. Следует напомнить, что, как правило, эмпирические параметры оцениваются по данным лабораторных исследований, и остается нерешенным вопрос о значении этих параметров для реальных морских условий, поскольку об универсальности эмпирических параметров пока говорить не приходится. Следует сказать, что по нашему опыту в абсолютном большинстве параметры модели, взятые по принятым авторами значениям, показали неплохие результаты для весьма непростых условий Белого моря. Речь будет идти лишь о модификации параметров, так или иначе связанных с трением. Параметр шероховатости был уменьшен до величины 0.001.

Далее при расчете значений коэффициентов турбулентного обмена по вертикали при достижении числом Rf критических значений формула (7.33) вырождается и, как оказалось, в этой ситуации весьма существенно, что именно задавать в качестве фоновых значений. Задавшись фоновыми значениями интенсивности и скорости турбулентной энергии (b_o, ε_o), необходимо рассчитывать значения коэффициентов турбулентного обмена q_o и числа Прандтля Pr_o , задавшись фоновыми значениями функции $F(Rf)$. Уменьшение фоновых значений функции $F(Rf)$ означает, по-существу, уменьшение относительной роли фоновых турбулентных потоков импульса и, соответственно, уменьшение трения в системе при достижении динамическим числом Ричардсона критических значений. Фоновое значение $F(Rf)$ было уменьшено от значения 0.09 до величины 0.002. В итоге были получены значения амплитуд прилива, неплохо совпадающие с натурными данными.

Приведем некоторые результаты расчетов 2006г. для конкретных сроков (рис. 7.18–7.23).

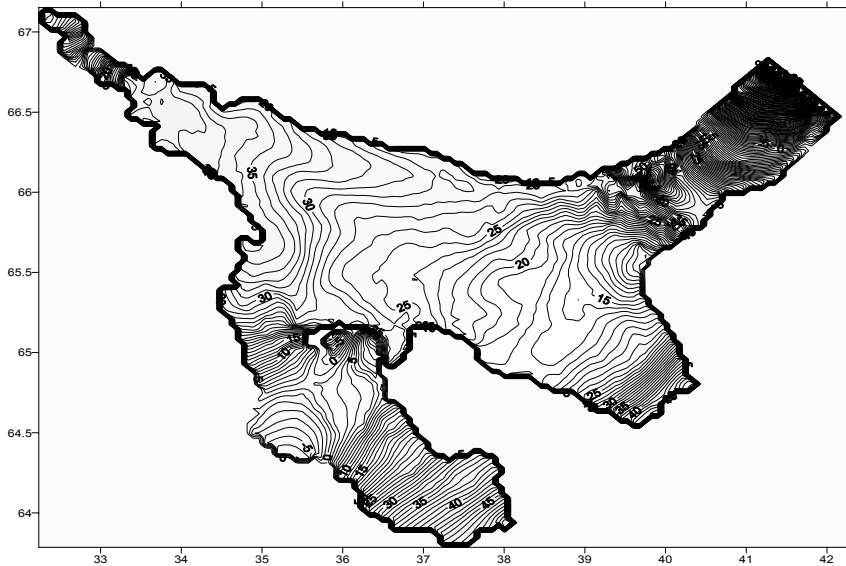


Рис 7.18. Поверхность уровня (см) 26 июля 2006 г. в 16 часов

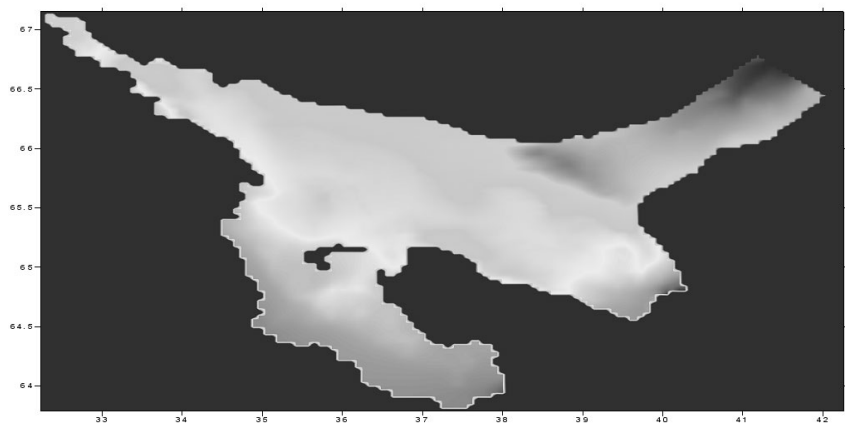


Рис 7.19. Температура воды на поверхности 26 июля 2006 г. в 16 часов

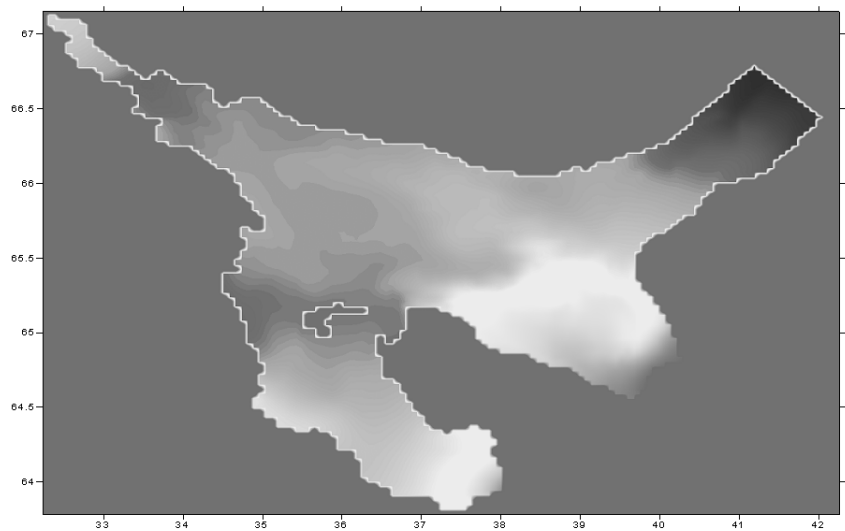


Рис 7.20. Соленость на поверхности 26 июля 2006 г. в 16 часов

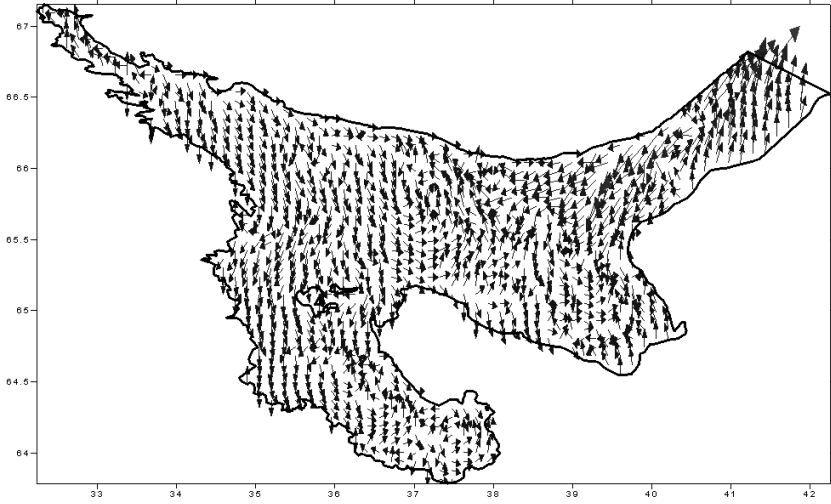


Рис 7.21. Горизонтальные скорости течений на поверхности
26 июля 2006 г. в 16 часов

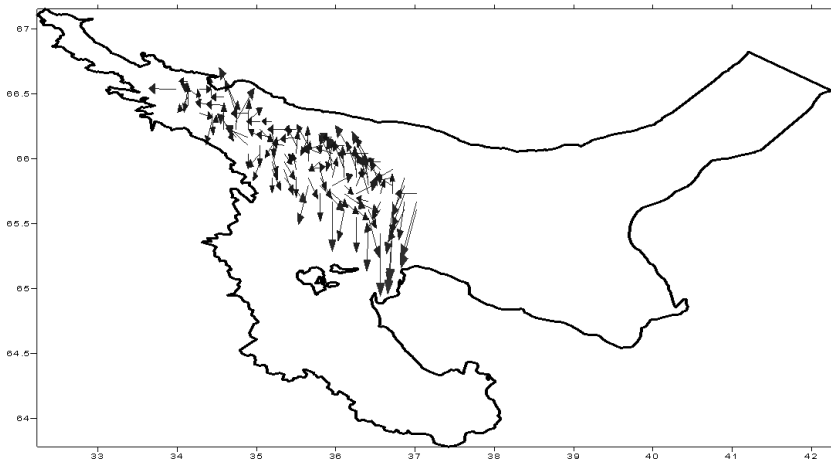


Рис 7.22. Горизонтальные скорости течений на горизонте 180м 26 июля 2006 г.
в 16 часов

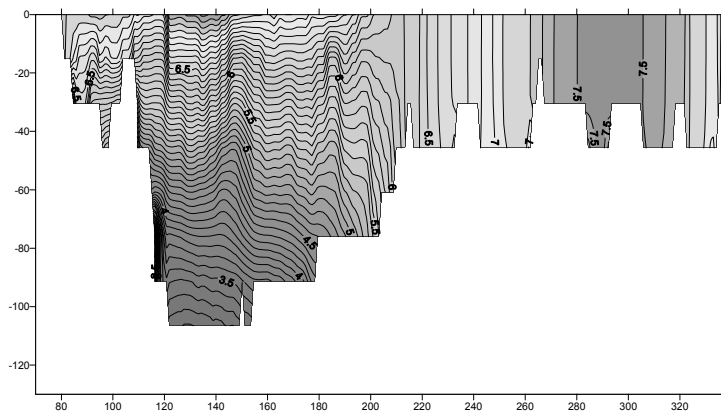


Рис 7.23. Распределение температуры воды вдоль разреза от Соловецких островов через Горло 26 июля 2006 г. в 16 часов

Итогом выполненных в период с 2004 по 2006 годы калибровок предлагаемой схемы оперативного мониторинга вод Белого моря является вывод о том, что на первом этапе для реализации поставленной задачи можно воспользоваться предлагаемым подходом на основе решения непосредственно краевой задачи.

Постановка задачи может быть существенно улучшена при восстановлении гидрометеопостов на входе в Горло Белого моря и обеспечении расчетов оперативной информацией о расходах рек (имея в виду расходы воды и тепла, часть из которых имеется, но недоступна в оперативном режиме).

7.3. Численные эксперименты по динамике биохимических полей Белого моря

Экосистемные исследования являются одной из важных прикладных задач исследований моря. Эти исследования объединяют комплексные химико-биологические и гидрофизические исследования, а также численное моделирование.

В данной работе наряду с моделированием гидрофизических полей Белого моря были объединены: точечная модель химико-биологических циклов азота и фосфора Якушева и Михайловского (Якушев и др., 1993) для Белого моря с гидродинамической моделью, изложенной в данной работе, а также опубликованной ранее (Касьянова, Лунева, Семенов, 2001). Аналогичный подход был использован в работе Неелова и Савчука

(Neelov et al., 2005). Несколько другой подход с использованием боксового метода, когда водообмен между боксами рассчитывается по результатам ранее выполненных расчетов течений, был применен для Белого моря А.В.Леоновым с соавторами (Leonov et al., 2005 см. в кн. Filatov et al., 2005).

Суть в том, что динамика морских экосистем существенно нелинейна из-за структуры химико-биологических источников, входящих в эволюционные уравнения. Зачастую это приводит к тому, что некоторые гидрофизические процессы наиболее ярко могут проявляться как раз в химико-биологических характеристиках.

При моделировании экосистемы зачастую ряд гидрофизических параметров могут проявиться по химико-биологическим характеристикам. Так, например, синоптические вихри и особенно ринги открытого моря могут определяться по химико-биологическим характеристикам, причем с четкими пространственными границами. Были реализованы две постановки задач по моделированию экосистемы вод Белого моря. В одной моделировалось весеннее цветение планктона в мае – июне, во второй исследовалось влияние гидрофизических факторов (турбулентного обмена, гравитационного оседания, изменчивости температуры моря, солнечной радиации) на сезонную динамику химико-биологических циклов Белого моря. В настоящем разделе кратко представим новые результаты, наиболее интересные с позиций гидрофизики.

В качестве химико-биологического блока была использована модель Якушева и Михайловского (Якушев и др., 1993), которая описывает процессы трансформации вещества, при этом рассмотрены особенности распределения по вертикали и сезонный ход фито- и зоопланктона, биогенов в Белом море, а также распределение по вертикали и сезонный ход гидродинамических условий.

Проведены численные эксперименты, воспроизводящие сезонную динамику элементов экосистемы в следующих случаях:

1а. Численный эксперимент с учётом солнечной радиации и температуры, зависящих от глубины, но без учёта гидрофизических процессов.

1б. Численный эксперимент с учётом гравитационного оседания взвешенных компонент экосистемы (серия экспериментов для разных значений скоростей гравитационного оседания).

2. Численный эксперимент с учётом вертикального турбулентного перемешивания с постоянным по глубине коэффициентом турбулентного обмена (серия экспериментов для различных значений коэффициента турбулентного обмена).

3. Численный эксперимент с учётом гравитационного оседания и вертикального турбулентного обмена (серия экспериментов для различных значений коэффициента турбулентного обмена при постоянной скорости гравитационного оседания).

4. Численный эксперимент с учётом гравитационного оседания и вертикального турбулентного обмена, переменных по глубине и по времени.

Показано, что в зависимости от интенсивности гидрофизических процессов гравитационного оседания и вертикального турбулентного обмена качественно меняется сезонная динамика экосистемы. По отдельности, каждый из этих процессов замедляет развитие экосистемы. Так, с увеличением скорости гравитационного оседания или коэффициента турбулентного обмена количество пиков цветения фитопланктона может уменьшиться с четырех до одного, при этом начало первого весеннего пика цветения сдвигается на более позднее время (больше, чем на месяц), увеличивается продолжительность цветения и глубина распространения компонент системы (с 20 м до 150 м).

Совместное влияние этих процессов на динамику экосистемы зависит от относительной величины потоков гравитационного оседания и вертикального турбулентного обмена. Поток концентрации за счёт гравитационного оседания всегда направлен вниз, а турбулентный поток направлен в сторону уменьшения градиента концентрации, поэтому эти процессы в некоторых ситуациях могут компенсировать друг друга. В том случае, когда потоки одного порядка, влияние этих процессов минимально, и экосистема имеет максимальное число пиков цветения.

В работе моделируется сезонная динамика химико-биологических циклов азота и фосфора, которая соответствует двум различным типам вертикальной термохалинной структуры Белого моря – перемешанной, квазиоднородной по вертикали и стратифицированной. В первом случае в системе наблюдается меньшее число более продолжительных пиков цветения фитопланктона. Во втором количество пиков больше, и они менее продолжительны.

В работе используется одномерная модель с биохимическими источниками из работы Якушева и Михайловского (Якушев и др., 1993), в которой рассматриваются следующие компоненты: фитопланктон ($F, i=1$), зоопланктон ($Z, i=2$), формы фосфора: взвешенный органический фосфор ($POP, i=3$), растворенный органический фосфор ($DOP, i=5$), фосфаты ($PO_4, i=7$), формы азота: нитраты ($NO_3, i=10$), нитриты ($NO_2, i=9$), аммонийный азот ($NH_4, i=8$), взвешенный органический азот ($POH, i=4$) и растворенный органический азот ($DON, i=6$).

Ось z направлена вертикально вниз и для каждой из компонент модели эволюционное уравнение имеет вид:

$$\partial_t C_i = \partial_z (q \partial_z C_i) - w_{gi} \partial_z C_i + Q_i(C, T, I_z), \quad (7.1)$$

$$i = 1, \dots, 10$$

где: символы t и z снизу имеют смысл дифференцирования по времени и вертикальной координате, соответственно; $C = (C_1, \dots, C_{10})$, C_i – концентрация i -й компоненты; q – коэффициент вертикального турбулентного обмена; w_{gi} – скорость гравитационного оседания i – компоненты, $w_{gi} \neq 0$ для взвешенных компонент $i=1,2,3,4$, таких как фитопланктон, зоопланктон и детрит; Q_i – биохимические источники, зависящие от концентраций компонент системы, температуры $T(t, z)$ и освещенности на горизонте z :

$$I_z = I_0(t) \exp(-k_a z), \quad (7.2)$$

где: $I_0(t)$ – освещенность на поверхности моря, k_a – коэффициент экстинкции (в расчетах принят равным 0.15 м^{-1}). Вид источников и значения коэффициентов в экспериментах совпадают с работой Якушева и Михайловского.

Рассмотрим проведенные эксперименты, не останавливаясь на деталях расчета, которые можно найти в работе Касьяновой, Луневой и Семенова (2001).

В эксперименте 1 рассматривается случай, когда в системе присутствуют только гравитационное оседание и биохимическое взаимодействие. Результаты приведены на рис. (7.24)

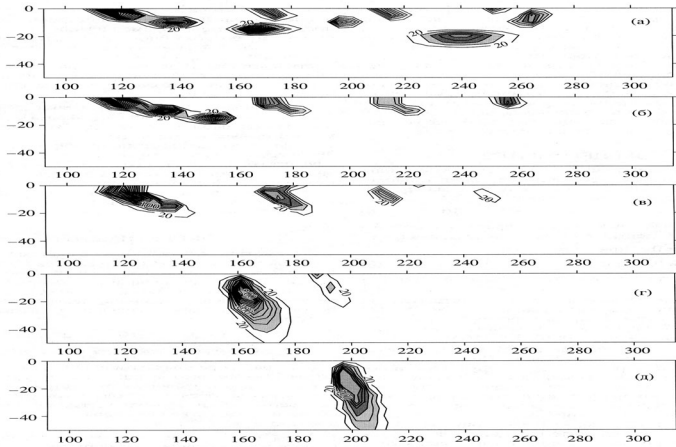


Рис. 7.24. Распределение фитопланктона ($\text{мг}/\text{м}^3$) в зависимости от времени (в сутках года) и глубины при различных скоростях оседания взвешенных компонент экосистемы. Пояснения в тексте

Хорошо видно, что в системе без учёта гидрофизических процессов (только биохимические связи) имеются автоколебания (рис. 7.24а). Первый пик цветения фитопланктона в слое до 10 м глубины начинается в конце апреля, второй – во второй половине июня, третий – в начале августа и четвёртый – в середине сентября. Ниже 20 м имеется только один слабый, но продолжительный ник, развивающийся в августе.

С возрастанием скорости оседания взвешенных компонент экосистемы происходит уменьшение количества пиков цветения от 4-х (рис.7.24 а, б) до одного (рис.7.24 д). Наблюдается постепенное смещение первого пика цветения фитопланктона на более позднее время: с конца апреля (рис.7.24 а) до начала июня (рис.7.24 г).

Для больших значений скоростей гравитационного оседания, имеется только один пик цветения фитопланктона, который начинается во второй половине июля (рис.7.24 д) и охватывает весь слой до глубины 50 м.

Усиление гравитационного оседания приводит к смещению абсолютного максимума фитопланктона в глубинные слои. Увеличивается глубина распространения компонент экосистемы. Такое действие гравитационного оседания на экосистему объясняется постоянным заглублением формирующегося в верхних слоях фитопланктона из наиболее продуктивного поверхностного слоя в менее теплые и освещенные глубинные слои, что замедляет развитие экосистемы в верхнем слое, но способствует ее развитию на глубине.

Таким образом, при возрастании скорости гравитационного оседания происходит уменьшение числа пиков цветения, смещение начала цветения на более позднее время и заглубление компонент экосистемы.

Эксперимент 2. Рассматривается случай, когда присутствуют только вертикальный турбулентный обмен и биохимические взаимодействия. В эксперименте считалось, что вертикальный коэффициент турбулентного трения q не зависит от глубины. Были проведены расчёты для следующих значений $q = 0.1 ; 1.0 ; 10 ; 20 ; 100 \text{ см}^2/\text{с}$.

На рис.7.25 приведено распределение фитопланктона для этих значений q .

При увеличении коэффициента вертикального турбулентного обмена происходит уменьшение количества пиков от четырех (рис. 7.25 а, б) до одного при $q = 100 \text{ см}^2/\text{с}$ (рис.7.25 д).

Также происходит постепенное смещение начала первого цветения на более позднее время: с конца апреля (рис. 7.25 а), затем – середина мая (рис. 7.25 в), конец мая – начало июня (рис. 7.25 г), и в последнем эксперименте имеется только один пик цветения, который начинается в начале июля. Наблюдается увеличение глубины распространения компонент экосистемы от 30 м (рис. 7.25 а) до глубины 150м (рис. 7.25 д).

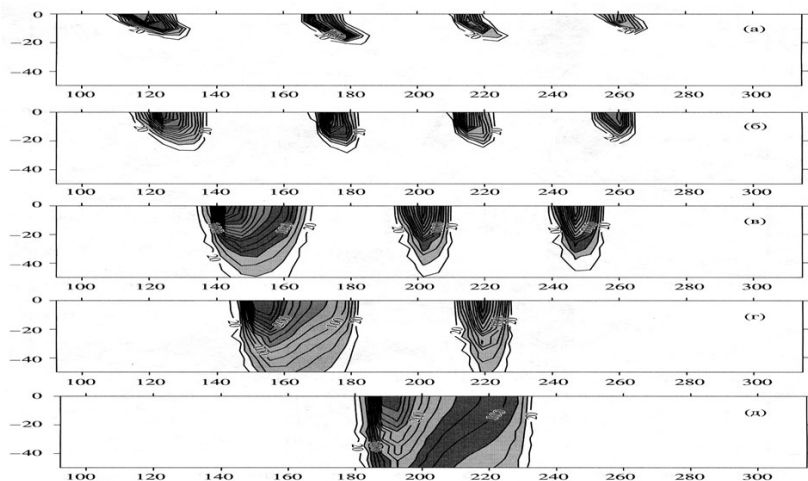


Рис. 7.25. Распределение фитопланктона (мг/м^3) в зависимости от времени (в сутках года) и глубины при различных значениях коэффициента турбулентного обмена (пояснения в тексте)

Качественное отличие действия вертикального турбулентного перемешивания от гравитационного оседания проявляется в весьма существенном возрастании продолжительности пиков, гораздо большей глубине проникновения цветения и расположении областей максимумов цветения на поверхности.

Действительно, вертикальное турбулентное перемешивание способствует заглублению наиболее интенсивно формирующегося вблизи поверхности фитопланктона, и в этом действие обоих процессов близко.

С другой стороны, вертикальное турбулентное перемешивание приводит к постоянному притоку биогенов из глубинных слоев в поверхностные, где они быстро выедаются, что поддерживает продолжительность и интенсивность цветения. В целом же, качественное действие процессов турбулентного обмена на поведение экосистемы похоже на воздействие гравитационного оседания.

Численные значения, характерные для пиков фитопланктона, меньше примерно в 2–4 раза, чем в натуральных наблюдениях, Конопля (1971). Это расхождение можно объяснить тем, что в численной модели учтены не все происходящие гидродинамические процессы, в частности, не учитывается важный эффект горизонтального и вертикального адвективного притока биогенных элементов в расчётную область.

В Белом море наиболее богаты биогенами глубинные области и районы стока рек, и потому влияние адвективного переноса может быть значительным.

Эксперимент 3. Рассмотрим случай, когда в системе присутствует биохимическое взаимодействие, гравитационное оседание и вертикальный турбулентный обмен. На рис. 7.26 приведены распределения фитопланктона. Значения коэффициента q были такими же, как и в эксперименте 2. Совместное действие турбулентного обмена и гравитационного оседания зависит от относительной величины соответствующих потоков. На поверхности, в силу граничных условий, эти потоки компенсируют друг друга, однако с глубиной их соотношение значительно меняется. При малых коэффициентах турбулентного обмена, порядка $0.1 \text{ см}^2/\text{с}$ диффузионный поток значительно меньше, чем поток взвешенных компонент за счёт гравитационного оседания. В результате этого в системе наблюдается один выраженный пик цветения фитопланктона в начале мая и слабо выраженный пик в начале сентября (рис. 7.26а).

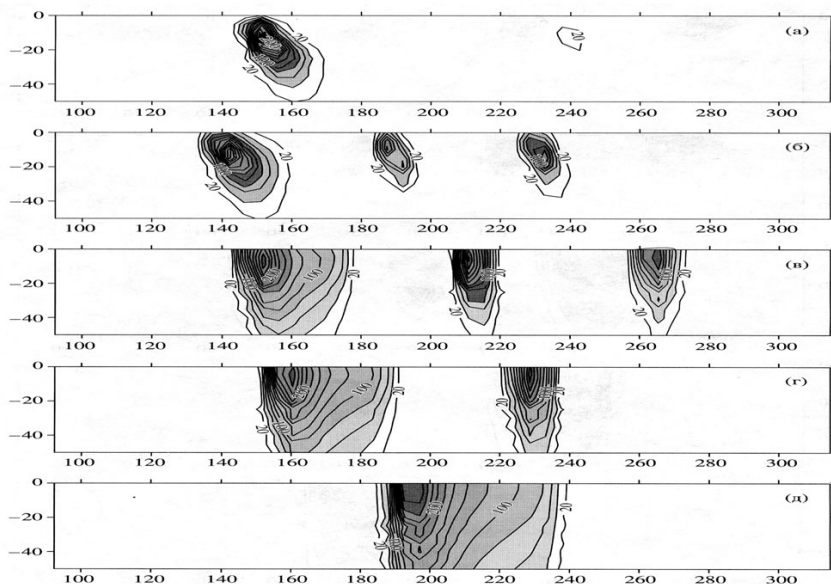


Рис. 7.26. Распределение фитопланктона ($\text{мг}/\text{м}^3$) в зависимости от времени (в сутках года) и глубины с учетом процессов вертикального турбулентного обмена и гравитационного оседания. Пояснения в тексте.

С возрастанием коэффициента q потоки начинают постепенно уравнивать друг друга, т.е. турбулентное перемешивание начинает заметно препятствовать оседанию компонент экосистемы. Это приводит к увеличению количества пиков цветения фитопланктона. Максимальное количество пиков достигает трёх (рис. 7.26 б,в). По мере дальнейшего возрастания коэффициента турбулентного обмена ($q = 20$ и $100 \text{ см}^2/\text{с}$) поток турбулентной диффузии начинает преобладать над потоком гравитационного оседания. В результате этого пики начинают постепенно размываться, и их число сокращается до одного (рис. 7.26 д). Глубина распределения компонент экосистемы увеличивается с увеличением коэффициента турбулентного обмена. Гидрофизические условия, моделируемые в этом эксперименте, соответствуют перемешанной или однородной вертикальной структуре, которая обычно наблюдается в мелководных районах Белого моря (кроме Двинской губы), глубина таких районов меняется от 10–20 м (Онежская губа) до 30–50 м (Горло). Интенсивный турбулентный обмен в мелководных районах может приводить к сокращению возможного числа пиков цветения фитопланктона до минимума. Однако, следует отметить, что для реалистичного воспроизведения поведения экосистемы в районах с интенсивным течением необходимо учесть также и адвективный перенос, который способствует дополнительному притоку биогенных элементов в рассматриваемую область.

Эксперимент 4. Решалась задача для переменного по вертикали и зависящего от времени коэффициента турбулентного обмена q .

Эта задача моделирует стратифицированный тип вертикальной структуры вод Белого моря, который характерен для глубоководных районов и Двинского залива. Полученные распределения компонент экосистемы приведены на рис. (7.27).

В основное время функционирования экосистемы вертикальный турбулентный обмен менее интенсивен, чем в случае однородной вертикальной термохалинной структуры (рис. 7.27 д). Это приводит к тому, что в системе остаётся два пика цветения фитопланктона – первый начинается в конце мая, а второй – в конце июля (рис. 7.27 а).

О доминирующем влиянии гравитационного оседания свидетельствует также смещение абсолютного максимума концентрации всех компонент с поверхности на глубину порядка 20 м. Соответствующие пики зоопланктона следуют сразу за пиками фитопланктона (рис. 7.27 б). Два пика взвешенного органического фосфора (РОР) также соответствуют этим пикам (рис. 7. 27 в). Таким образом, изменение внешних

гидрофизических параметров качественно меняет динамику экосистемы. В зависимости от того, насколько интенсивен турбулентный обмен в верхнем перемешанном слое (или существенно гравитационное оседание взвешенных компонент системы), начало весеннего цветения фитопланктона и, соответственно, зоопланктона, может смещаться на более позднее время (почти на 2 месяца). Количество пиков при этом изменяется от 4-х до 1. Чем больше коэффициент вертикального турбулентного обмена или интенсивнее гравитационное оседание, тем меньше пиков цветения возникает в рассматриваемой системе. Соответственно, возрастает глубина распространения компонент экосистемы.

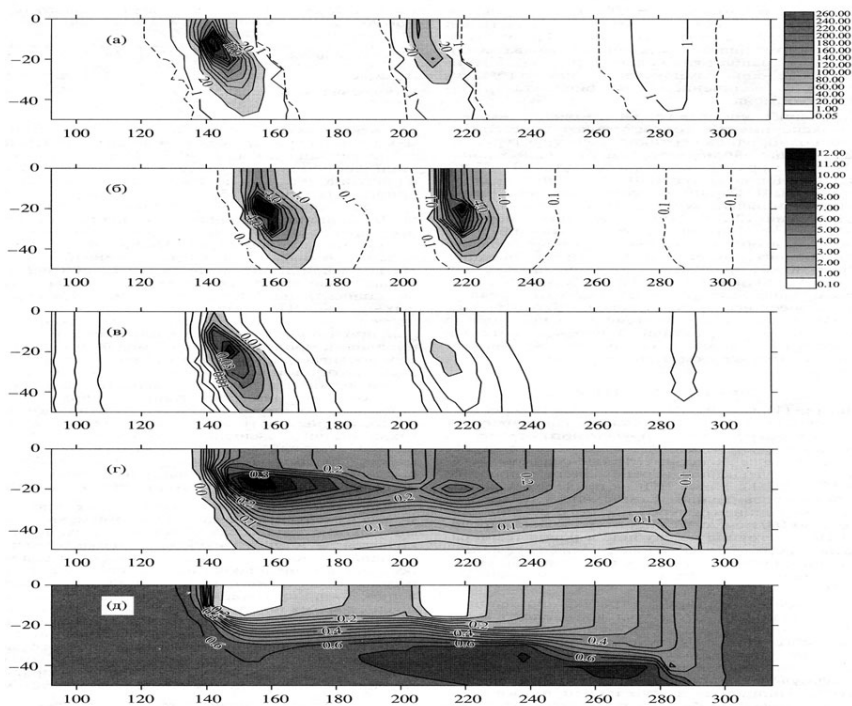


Рис. 7.27. Распределение компонент экосистемы в зависимости от времени (в сутках года) и глубины: а – фитопланктон ($\text{мг}/\text{м}^3$), б – зоопланктон ($\text{мг}/\text{м}^3$), в – взвешенный органический фосфор ($\mu\text{кг-ат}/\text{л}$), г – растворенный органический фосфор ($\mu\text{кг-ат}/\text{л}$), д – фосфаты ($\mu\text{кг-ат}/\text{л}$)

При учете совместного эффекта вертикального турбулентного перемешивания и гравитационного оседания взвешенных компонент экосистемы решение зависит не от интенсивности каждого по отдельности процесса, а от их соотношения.

Поток концентрации за счёт гравитационного оседания всегда направлен вниз, а турбулентный поток направлен в сторону уменьшения градиента концентрации и может компенсировать гравитационное оседание вещества, если эти потоки одного порядка. В этом случае влияние этих процессов на экосистему минимально, а количество пиков цветения максимально.

Если доминирует один из процессов, то его можно идентифицировать по продолжительности цветения и глубине максимума концентрации фитопланктона. Если максимум находится на поверхности, а цветение продолжительно (до 2-х месяцев), то доминирует вертикальное турбулентное перемешивание. Смещение максимума концентрации с поверхности свидетельствует о преобладающем влиянии гравитационного оседания.

В экспериментах 3 и 4 моделируются два гидрологических типа вертикальной структуры Белого моря – перемешанный и стратифицированный. В первом случае вертикальный турбулентный обмен более интенсивен, чем во втором, и поэтому турбулентность значительно изменяет развитие экосистемы, оставляя минимальное число пиков цветения, длительностью почти 2 месяца. В эксперименте 4 величины обоих потоков близки, поэтому в системе может наблюдаться больше, чем один пик. Следовательно, при одинаковых внешних условиях (температуре, солнечной интенсивности) и одинаковом описании биохимических процессов, протекающих в экосистеме, в районах со стратифицированной вертикальной структурой вод (Бассейн, Кандалакшский и Двинской заливы) должно наблюдаться больше пиков цветения, чем в мелководных районах с однородной вертикальной структурой вод (Воронке, Горле и Онежском заливе).

Глава 8

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ ЭКОСИСТЕМЫ МОРЯ ПРИ АНТРОПОГЕННЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Введение

В настоящей монографии представлена новая версия трехмерной математической модели термогидродинамики и экосистемы моря, описанной ранее И.А.Нееловым и О.П.Савчуком в работах (Neelov et al., 2003; см. в кн. Filatov et al., 2005; Климат..., 2004). С использованием трехмерной модели экосистемы (эвтрофирования) проведены исследования экосистемы моря для изучения ее реакции на антропогенные и климатические изменения. В сценарных расчетах на моделях экосистемы моря используются сведения об изменчивости гидрологического режима и климата водосбора, а также сведения и сценарии социально-экономического развития региона, которые отражаются на состоянии окружающей среды, влияют на поступление биогенных и загрязняющих веществ с водосбора в Белое море, т.е. определяют особенности развития процесса эвтрофирования моря. Изменения климата на водосборе изучены по данным длительных измерений, а сценарии изменения климата на перспективу получены по данным численных экспериментов на моделях глобального климата.

8.1. Модель термогидродинамики моря

Для моделирования термогидродинамических характеристик Белого моря используется трехмерная модель ААНИИ-ИО, основанная на полных уравнениях движения со свободной поверхностью в приближении Буссинеска и гидростатическом приближении (Отчет по проекту ИНКО-Коперникус, 2003; Neelov, 1996; Neelov, Savchuk, 2003). Уравнения записаны в сферической системе координат.

Уравнения движения:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u}{r \sin \theta} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial u}{\partial \theta} + w \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{wu}{r} + \frac{uv}{r} \operatorname{ctg} \theta = \\ & = -\frac{g}{r \sin \theta} \frac{\partial \zeta}{\partial \lambda} - \frac{g}{\rho_0 r \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \int_{-z}^0 \rho dz + lv + \frac{\partial}{\partial z} k_m \frac{\partial u}{\partial z} + A \Delta u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u}{r \sin \theta} \frac{\partial v}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + w \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{wv}{r} - \frac{v^2}{r} \operatorname{ctg} \theta & = -\frac{g}{r} \frac{\partial \zeta}{\partial \theta} - \frac{g}{\rho_0 r} \frac{\partial}{\partial \theta} \int_{-z}^0 \rho dz - lv + \frac{\partial}{\partial z} k_m \frac{\partial v}{\partial z} + A \Delta v \end{aligned}$$

Уравнение переноса тепла и солей:

$$\frac{\partial(T, S)}{\partial t} + \frac{1}{r \sin \theta} \left[\frac{\partial u(T, S)}{\partial \lambda} + \frac{\partial v(T, S) \sin \theta}{\partial \theta} \right] + \frac{\partial w(T, S)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k_{t,s} \frac{\partial(T, S)}{\partial z} + A_{(T,S)} \Delta(T, S)$$

Уравнение неразрывности:

$$\left[\frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{\partial v \sin \theta}{\partial \theta} \right] \frac{1}{r \sin \theta} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Уравнение гидростатики:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g;$$

Уравнение состояния UNESCO в общем виде:

$$\rho = f(T, S, P),$$

Здесь λ – долгота; θ – широта; z – вертикальная координата, направленная вверх; t – время; u, v, w – компоненты скорости по осям λ, θ, z , соответственно; r – радиус Земли; g – гравитационное ускорение; T – температура; S – соленость; $l = 2\Omega \cos \theta$ – параметр Кориолиса; Ω – угловая скорость вращения Земли;

$$\Delta u = \frac{1}{r^2 \sin \theta} \left[\frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial u}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{\sin \theta} \frac{\partial^2 u}{\partial \lambda^2} \right] - \text{лапласиан};$$

k и A – коэффициенты горизонтального и вертикального турбулентного обмена; P – давление; ρ – плотность; ρ_0 – средняя плотность.

На поверхности моря задается условие

$$\tau_{x,y} = -\rho_0 k_m \frac{\partial(u, v)}{\partial z}$$

На дне задается условие теплоизоляции

$$k_{t,s} \frac{\partial(T, S)}{\partial z} = 0$$

На горизонтальных границах задаются условия непрелипания

$$v_n = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial n} = 0,$$

где n направлена перпендикулярно к берегу; v_n, v_τ – нормальные и тангенциальные компоненты скорости.

На берегу задается условие:

$$\frac{\partial(T, S)}{\partial n} = 0.$$

Для расчета свободной поверхности используются следующие уравнения:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\frac{1}{r \sin \theta} \left(\frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{\partial V \sin \theta}{\partial \theta} \right)$$

$$U = \int_{-H}^{\zeta} u dz; \quad V = \int_{-H}^{\zeta} v dz$$

Для замыкания системы используется уравнение:

$$\frac{\partial b}{\partial t} = k_m \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 + \frac{g}{\rho_0} \alpha_\rho \frac{\partial \rho}{\partial z} \right] - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial z} k_b \frac{\partial b}{\partial z},$$

где b – кинетическая энергия турбулентности; α_b, α_ρ – параметры; ε – скорость диссипации энергии турбулентности в соответствии с гипотезой Колмогорова-Обухова:

$$\varepsilon = c_\varepsilon b^2 / k_b; \quad k_b = 0.2 L \sqrt{b}; \quad k_m = S_{mom} L \sqrt{b}; \quad k_{t,s} = S_{heat} L \sqrt{b},$$

$$L = \min(L_d, L_u, L_b);$$

где:
$$L_d = \frac{\chi}{H} Z_H Z_\eta Z_0;$$

Z_H - расстояние от дна до рассматриваемой точки ;

Z_η - расстояние от поверхности до этой точки;

$$Z_0 = 1 - \beta_1 H^{-2} Z_H Z_\zeta;$$

$0 \leq \beta_1 \leq 4$ -параметр, в данном случае равный 1,2

$$L_u = \frac{c_d \sqrt{b}}{\sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}}$$

$$L_b = \frac{c_b \sqrt{b}}{\sqrt{-\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho_w}{\partial z}}}$$

где: $c_d = 0.53$, $c_b = 1.41$

$$S_{mom} = \frac{(Sm_1 - Gh \cdot Sm_2)}{(1 - Sm_3 \cdot Gh)(1 - Sm_4 \cdot Gh)}, \quad S_{heat} = \frac{Sh_1}{1 - Sh_2 \cdot Gh},$$

где $(Sh_1, Sh_2) = (0.493928, 34.6764)$, $(Sm_1, Sm_2, Sm_3, Sm_4) = (0.42747, 5.805, 34.6764, 6.1272)$,

$$Gh = -\frac{L^2 N^2}{b},$$

где N^2 – частота Вайсяля-Брендта;

функция Gh находится в интервале: $-0.28 < Gh < 0.0233$.

Пространственный шаг модели по долготе составляет шесть, по широте – три угловые минуты. По вертикали уравнения модели аппроксимируются 22 уровнями переменной толщины. Для параметризации вертикального турбулентного обмена решается уравнение баланса турбулентной энергии с привлечением гипотез Колмогорова-Обухова и термодинамической функции Гальперина (Galperin et al., 1998). Состояние ледового

покрова воспроизводится с помощью термодинамической модели с вязкопластической реологией (Hibler, 1979). В настоящем варианте модели используется зависимость температуры замерзания морской воды от солености (формула Крюммеля). Для аппроксимации адвективных членов в уравнениях переноса используется схема третьего порядка точности по пространственным координатам, что позволяет существенно уменьшить счетную вязкость. В качестве атмосферного воздействия взяты среднесуточные данные реанализа NCEP за 1948–2002 годы. Потоки тепла, влаги и импульса на границах раздела сред вода-лед-снежный покров-атмосфера параметризованы согласно методике, предложенной в работе Паркинсона (Parkinson, 1979). Таким образом, использовалась так называемая климатическая модель с учетом сезонных и мезомасштабных составляющих. К последним относятся приливные движения, имеющие в Белом море временные масштабы около суток и 12 часов. Показано, что роль постоянно действующих приливных движений важна при формировании течений Белого моря (Neelov et al., 2003).

Начальные и граничные условия

В качестве начальных условий задавалась покоящаяся устойчиво стратифицированная жидкость. Начальная концентрация биогенных элементов считалась постоянной по пространству. На северной (жидкой) границе температура, соленость и свободная поверхность задавались из решения задачи о крупномасштабной циркуляции Северного Ледовитого океана (Neelov, 1996).

Сток рек и содержание в них химических элементов (рис. 8.1) определялись по среднемесячным климатическим значениям.

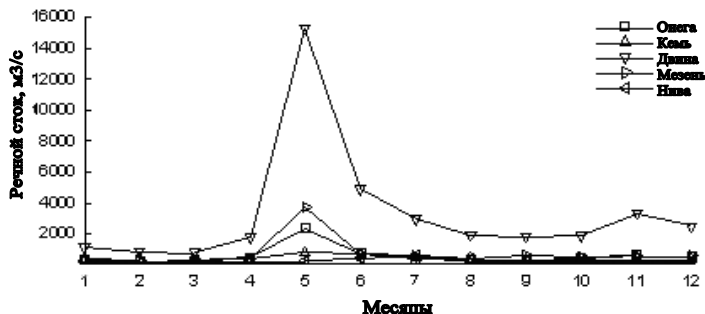


Рис. 8.1. Климатический суммарный среднемесячный расход ($\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$) основных рек водосбора

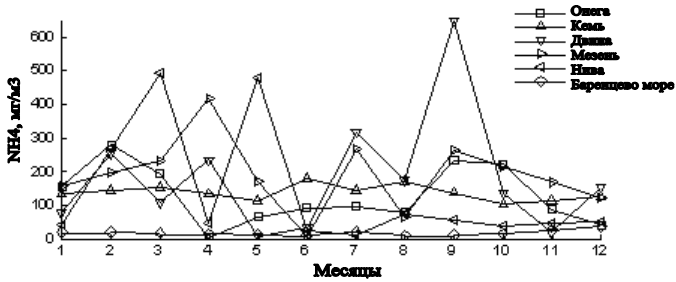


Рис. 8.2. Климатический среднемесячная концентрация аммония ($\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) в реках Белого моря и на северной границе.

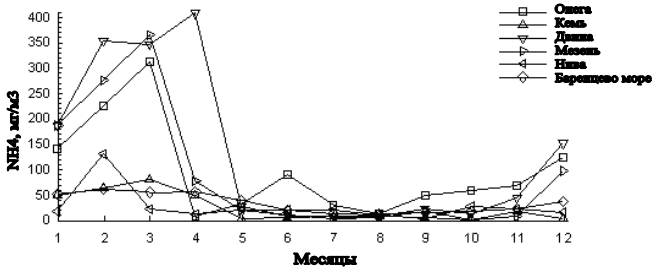


Рис. 8.3. Климатическая среднемесячная концентрация нитратов ($\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) в реках Белого моря и на северной границе.

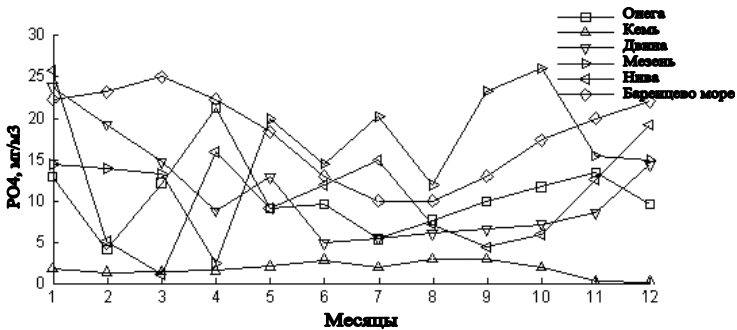


Рис. 8.4. Климатическая среднемесячная концентрация фосфатов ($\text{мг}\cdot\text{м}^{-3}$) в реках Белого моря и на северной границе.

Сценарии расчетов реакции Белого моря на изменения климата и нагрузки биогенными элементами

Как показало сопоставление с имеющимися данными наблюдений, модель ААНИИ-ИО правдоподобно воспроизводит современную динамику биогенных элементов в Белом море и может использоваться для исследования реакции Белого моря на возможные сценарии климатических изменений и антропогенных воздействий. В соответствии со сценариями изменений климата на водосборе Белого моря, предложенными в работах (Климат..., 2004; Filatov et al., 2002), и предвидимыми антропогенными изменениями (Terzhevik et al., 2005) были проведены следующие численные эксперименты: 1) контрольный численный эксперимент (CR); 2) эксперимент, направленный на изучение влияния полусуточного прилива на формирование средних характеристик Белого моря (TR); в этом расчете на северной границе Белого моря в дополнение к среднему изменению уровня задавалась амплитуда и фаза волны M_2 ; 3) численный эксперимент, имитирующий увеличение антропогенной нагрузки (LR) при оптимистическом сценарии развития региона (водосбора Белого моря), в котором в последующие 5–10 лет существенно возрастет региональный валовой продукт (ВВП) из-за роста сельскохозяйственного производства и промышленности, что, в свою очередь, приведет к увеличению поступления биогенов на водосбор и, в конечном итоге, отразится в увеличении химического стока рек на 20% (Filatov et al., 2005); 4) эксперимент, имитирующий сценарий потепления климата (CLR), в котором среднегодовая температура воздуха увеличивается на 2 градуса (за последующие 5–20 лет), а сток рек при таком росте температуры воздуха уменьшается.

С уменьшением водного стока при той же антропогенной нагрузке несколько уменьшается и химический сток. Заметим, что расчеты на климатической модели ЕСНАМ-4 при потеплении климата дают несколько меньшее снижение водного стока (Климат..., 2004; Иванов и др. 2003), однако для получения более заметной реакции экосистемы нами задавались заниженные от расчетных значения водного и химического стока рек.

Решение использовалось как начальное условие для контрольного численного эксперимента, также просчитанного с 1948 по 2000 год. За этот период модельная задача полностью адаптировалась к граничным условиям, и решение вышло на квазистационарный сезонный ход. Задача на установление (модельная адаптация) рассчитывалась на семь лет, что примерно в два раза больше, чем условный водообмен Белого моря,

который составляет порядка 2-3 лет. Время разгона модели при этом в несколько раз меньше периода инициализации, равного 53 годам. Этого вполне достаточно, чтобы модель полностью адаптировалась к граничным и начальным условиям, и решение вышло на квазистационарный сезонный ход.

Средняя температура (рис. 8.6) Белого моря колеблется от -1.2°C в зимний период до $+4.2^{\circ}\text{C}$ в летнее время. Толщина льда меняется от 45 см до 80 см (рис. 8.7).

На рис. 8.6 приведено изменение средней солености в Белом море. Интегральная соленость меняется от 27.4 в летнее время до 28.4‰ в зимний период, что связано со значительным сезонным ходом речного стока. Заметная межгодовая изменчивость солености и других интегральных характеристик обусловлена соответствующими крупномасштабными процессами в атмосфере, влияющими на решение как непосредственно через верхнее граничное условие, так и через обмен с Баренцевым морем, что хорошо видно на примере среднемесячных колебаний уровня на северной границе области.

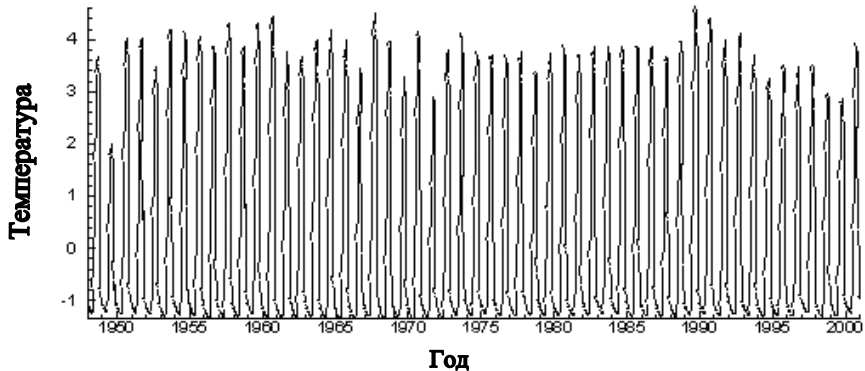


Рис. 8.5. Изменение средней температуры воды Белого моря

Таким образом, изменения температуры воды, солености и ледовитости испытывают квазипериодические флуктуации с масштабами несколько лет, что согласуется с данными анализа длительных наблюдений, выполненных на постах Росгидромета (см. Главу 6 наст. книги). За весь контрольный период расчета с 1950 г. по настоящее время отмечается увеличение солености на 0.5 ‰. При этом интегральная температура воды и толщины ледяного покрова не имеют заметных флуктуаций.

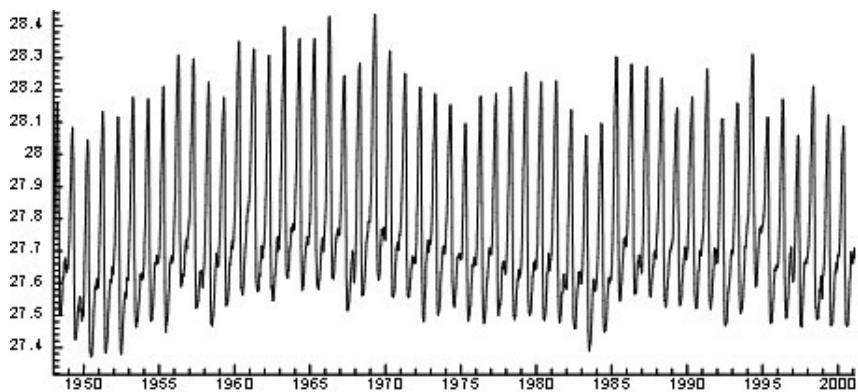


Рис. 8.6. Изменение средней солености вод Белого моря

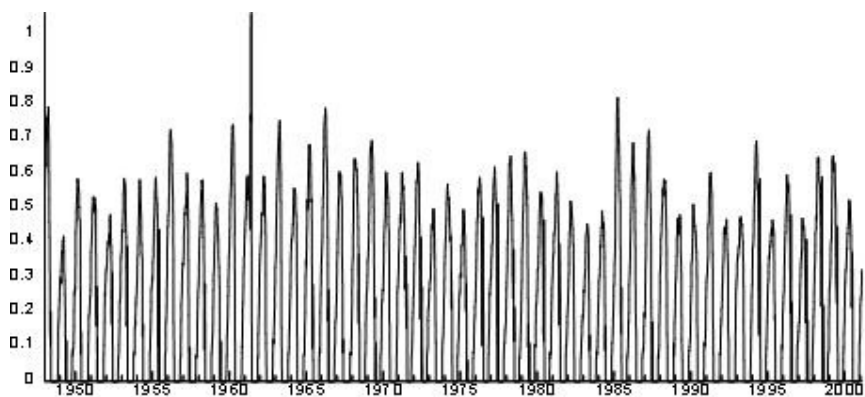


Рис. 8.7. Изменение средней толщины льда в Белом море

Расчетное поле температуры воды для августа 2000 г. хорошо совпадает с измеренными дистанционными методами для того же месяца 2000 г. При этом как смоделированные, так и дистанционно измеренные поля ТПВ описывают основные известные из многолетних наблюдений черты океанографического режима моря: фронты на границах Горла и Бассейна, в Двинском и Онежском заливах, апвеллинги в районе Соловецких островов и у берегов (рис. 8.8).

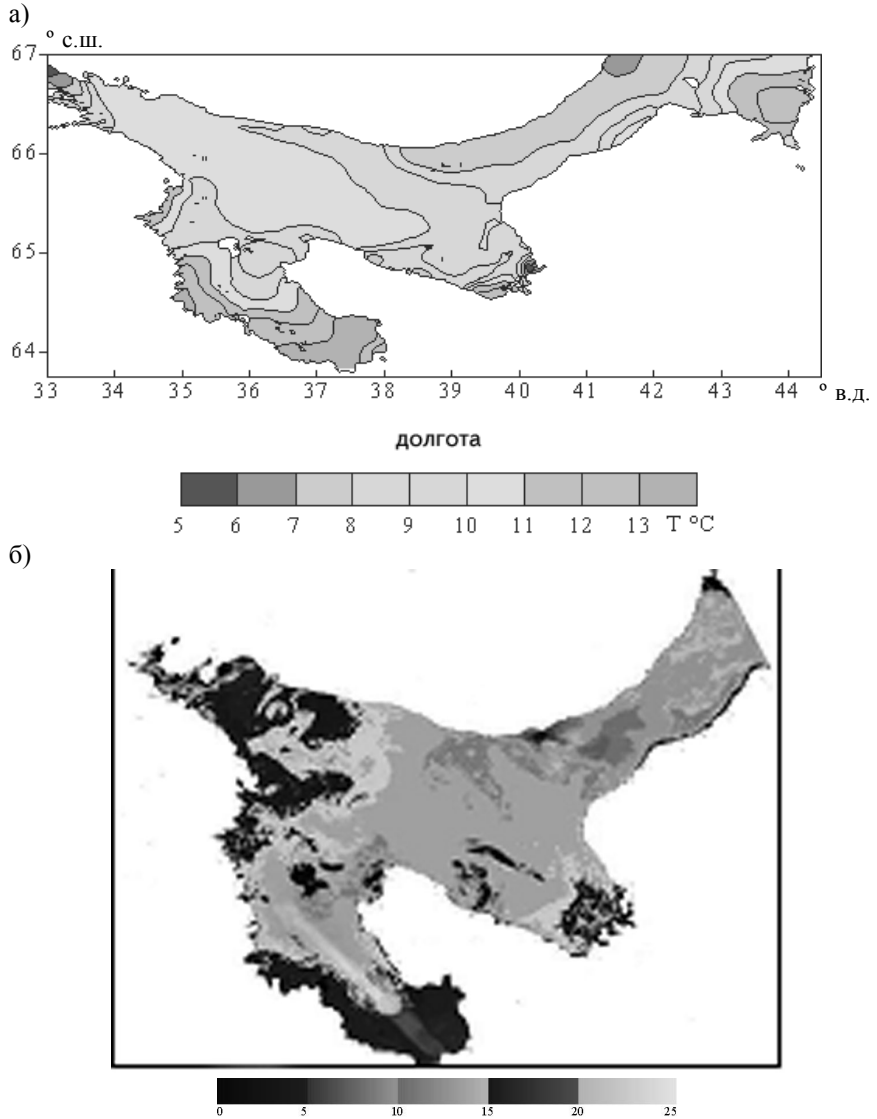


Рис. 8.8. Распределение ТПВ в августе 2000 г.: а) по данным моделирования, б) по измерениям со спутника НОАА

По солёности на отдельных временных участках отмечаются изменения на 0.2-0.3 промилле. Изменения солёности с 1986 по 2002 г. согласуется с данными натуральных наблюдений Беломорской Биологической станции ЗИН РАН на станции Каргеш (см. Главу 6 наст. книги).

Течения в Белом море генерируются за счет неоднородности поля плотности, стока рек, приливов и атмосферных процессов. Известны несколько схем крупномасштабных поверхностных течений. Общим для них является наличие устойчивого течения вдоль Зимнего берега, обусловленное стоком Двины, и циклонические циркуляции вод в Кандакшском и Онежском заливах. Схемы течений отличаются в основном особенностями циркуляции вод в Бассейне. В настоящей работе подробно выполнены расчеты циркуляции вод, полей температуры и солёности, уровня моря и оценен водообмен между Белым и Баренцевым морем. Пример расчета течений для климатической модели приведен на рис. 8.9.

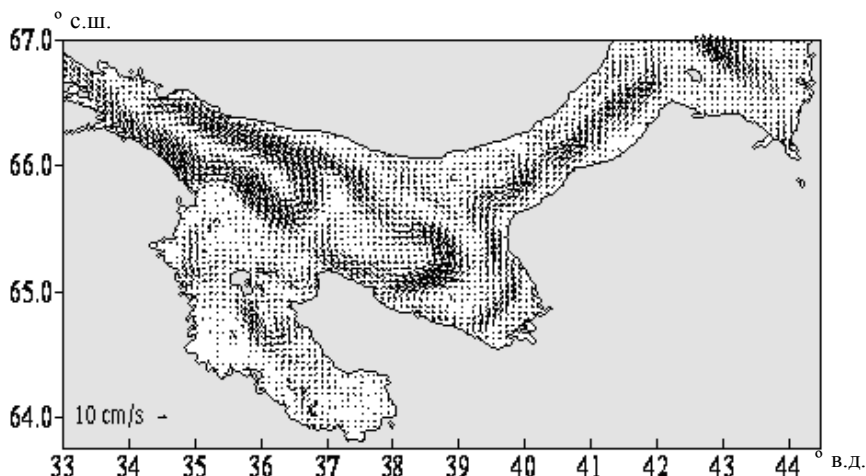


Рис. 8.9. Скорости поверхностных течений в августе (усреднено за период с 1995 по 2000 год) (по Neelov, Savchuk, 2005 см. в кн. Filatov et al., 2005)

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

Приведенные поля скорости включают в себя остаточную приливную циркуляцию, генерируемую полусуточной волной M_2 . Как видно из сравнения рисунков, расчетная система поверхностных течений качественно согласуется с известными схемами течений (см. Главу 6 наст. книги).

Циркуляция в центральной части Белого моря и его заливах имеет циклоническую завихренность. Четко прослеживается стоковое течение вдоль Зимнего берега, а также антициклонический вихрь у Летнего берега в июле. В марте, в период минимального стока Двины, этот вихрь не прослеживается. Следует также заметить, что течение из Двинского залива в летнее время разделяется на две ветви, первая из которых следует в Горло Белого моря вдоль Зимнего берега, а вторая проникает в Бассейн, включаясь в циклонический круговорот. Придонные течения имеют компенсационную природу. Особенно наглядно это проявляется в Двинском заливе, а также в Онежском заливе восточнее Соловецкого архипелага. Придонное, питающее по терминологии В.В.Тимонова, течение в Горле, поставляющее в Белое море соленую баренцевоморскую воду, имеет четко выраженную сезонную изменчивость: если в марте оно по выходе из Горла поворачивает на запад в Кандалакшский залив, то в летний период основной поток проникает в Двинский залив. Как уже говорилось, важным фактором, определяющим циркуляцию Белого моря, являются приливные движения. В настоящей модели мы учли только полусуточную гармонику, которая является основной. Поля течений в поверхностном и придонном слое в июле, рассчитанные без учета и с учетом приливных движений, различаются. Особенно это касается Кандалакшского залива, где при приливах циклоническая циркуляция ослаблена, а антициклонический вихрь в Двинском заливе при учете приливов отсутствует.

Для крупномасштабной модели экосистемы необходимо оценить, имеет ли смысл включать влияние мезомасштабных процессов на формирование термогидродинамики моря. Влияние остаточной приливной циркуляции сказывается и на водообмене с Баренцевым морем. Результат сравнения среднемесячного расхода баренцевоморской воды через Горло при разных сценариях приведен на рис. 8.10. Как видно на этом рисунке, в случае учета приливных движений расход существенно меньший, чем без учета последних, что, в общем-то, естественно, т.к. формирование придонного пограничного слоя приводит к значительному увеличению диссипации энергии. При потеплении климата расход между Баренцевым и Белым морем сокращается примерно на 10%.

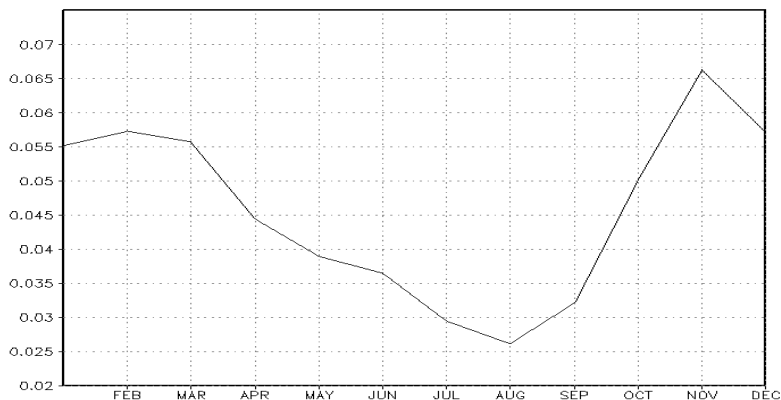


Рис. 8.10. Изменение средмесячного прихода баренцевоморских вод в Белое море (в свердрусах) осреднено за период 1980–2001 гг.

Учет приливных движений существенно меняет горизонтальное распределение температуры и солености воды. Особенно это касается Горла Белого моря, где формируется резкий температурный фронт, и района Соловецких островов, где получена обширная область низких температур – апвеллинг с температурой около 5°C. Результаты показывают значительную роль приливов в формировании средней циркуляции Белого моря. Если для сравнения вычисленной средней циркуляции с натурными данными мы имеем только качественные схемы поверхностных течений, определенных по данным разрозненных гидрологических съемок, то приливную компоненту циркуляции можно верифицировать по данным наблюдений за уровнем на береговых станциях. Равнение амплитуд и фаз прилива, полученные расчетным путем на модели и по данным береговых постов показывает их хорошее соответствие. Эти результаты согласуются с расчетами по альтернативным моделям (Неелов, 2003; Дианов и др., 1990; Семенов, 2004).

Таким образом, при расчетах на модели экосистемы даже для климатических, сезонных масштабов необходимо учитывать приливы, что усложняет задачу моделирования экосистемы.

На рис. 8.11 приведен график изменения средней солености в контрольном расчете (норма) и расчете, имитирующем потепление в регионе по сценарию, приведенному в Главе 3 настоящей книги. Уменьшение расхода рек при потеплении климата на 20% вызвало увеличение средней солености более чем на 1‰.

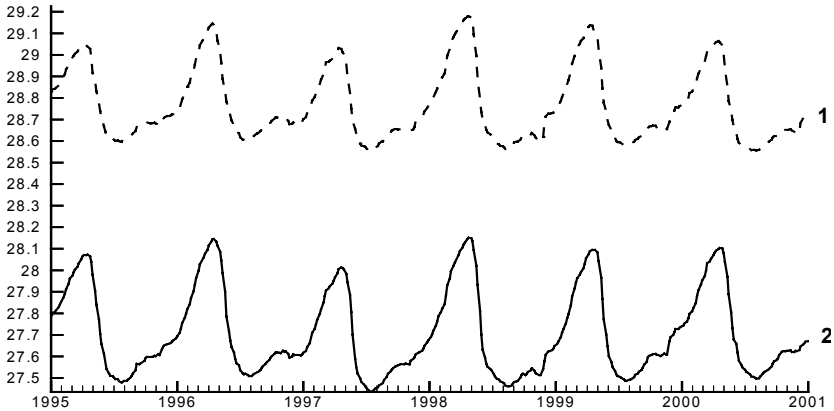


Рис. 8.11. Изменение средней солености моря. 2 – контрольный счет на установление климатической модели. 1 – при изменении температуры воздуха на 2°C при потеплении климата. Сток рек уменьшен на 20% по сравнению с нормой

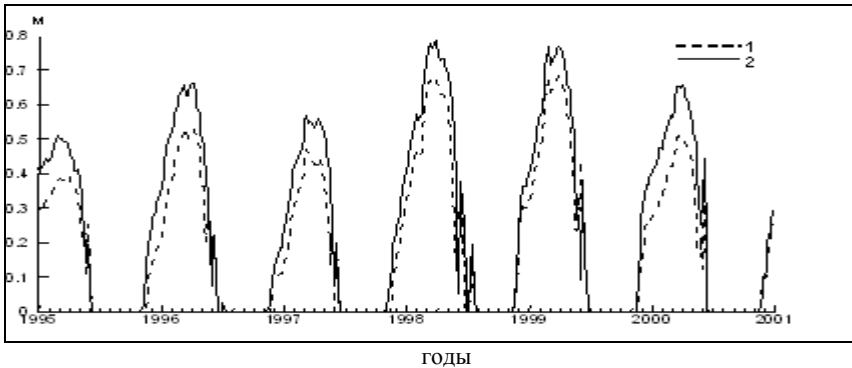


Рис. 8.12. Изменение среднеклиматической толщины ледяного покрова: 2 – контрольный счет, 1 – потепление климата

8.2. Модель экосистемы моря

Для описания экосистемы Белого моря используется трехмерный вариант модели О.П. Савчука и Ф. Вульфа (Savchuk et al., 1996), см. также (Neelov et al., 2005). Общая блок-схема модели показана на рис. 8.13.

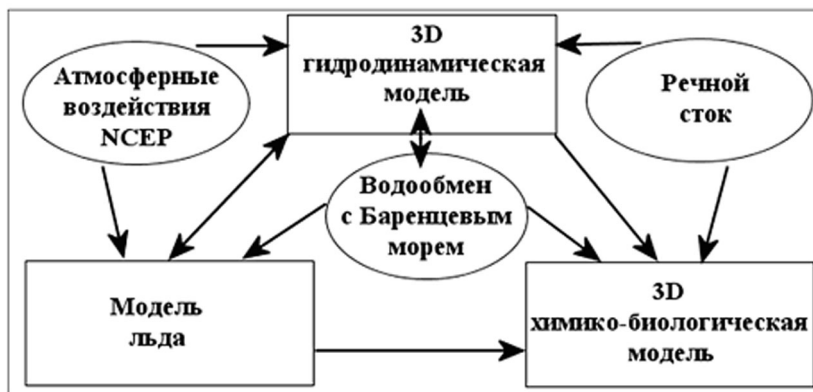


Рис. 8.13. Блок-схема экологической модели Белого моря. (Климат Карелии, 2004; Neelov, Savchuk, 2005; Filatov et al., 2005)
 Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

В качестве важнейших уровней экосистемы моря, которыми и через которые осуществляется круговорот биогенов в сезонном масштабе, выбраны сообщества гетеротрофов, автотрофов, косное органическое вещество (детритный фосфор и азот) и биогены (аммонийный азот, нитраты и фосфаты). В модели учтен двусторонний обмен с донными отложениями, который может играть значительную роль в замыкании круговоротов в межгодовом и сезонном масштабах времени. Для учета этой обратной связи, динамически зависящей от комбинации предыстории системы и текущих условий, складывающихся в пелагиали, в модель введены бентальный азот и фосфор. Динамика растворенного в воде кислорода, определяемая взаимодействием процессов транспорта и транслокации, используется в качестве важнейшего экосистемного регулятора азота и фосфора. В настоящей модели под термином «гетеротрофы» подразумеваются все планктонные животные, способные потреблять автотрофов и косное органическое вещество с населяющими его бактериями. Автотрофы представляют всех фотоавтотрофных продуцентов органического вещества – от пикопланктона до крупных динофлагеллят и диатомовых. Под детритом понимается лабильная часть взвешенного органического вещества с адсорбированными органическими молекулами, населенного бактериями. Бентальные компоненты представляют собой пополняемые оседающим детритом и расходующиеся в ходе минерализации запасы азота и фосфора в верхнем слое донных отложений (рис. 8.14).



Рис. 8.14. Генерализованная схема биохимических потоков в модели Белого моря (Neelov, Savchuk, 2005; Filatov et al., 2005)
Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

Временная изменчивость средней концентрации поступающих биогенов показывает, что концентрация нитратов колеблется от $5.5 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$ в конце зимы до $3 \text{ ммоль} \cdot \text{м}^{-3}$ осенью, после периода цветения, см. рис. 8.14. Подобные изменения отмечаются и в концентрации фосфатов. На графиках изменчивости биогенов заметна не только сезонная мода, но и более низкочастотная, обусловленная, возможно, взаимодействием с донными отложениями, которые могут как аккумулировать биогены, так и отдавать их в воду.

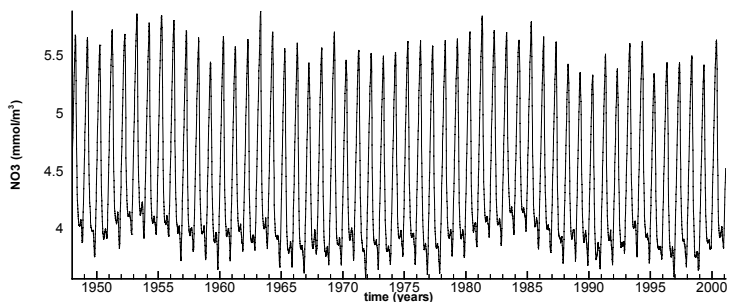


Рис. 8.15. Изменение средней концентрации нитратов ($\text{ммоль}\cdot\text{м}^{-3}$) в Белом море за 50 лет

Средняя концентрация аммония, а также детритов азота и фосфора отражает процессы жизнедеятельности в экосистеме Белого моря и имеет максимумы в период обильного цветения и отмирания фитопланктона. Цветение фитопланктона происходит дважды в год – весной, сразу после схода ледяного покрова, и осенью, в октябре. Зоопланктон развивается в июне-июле, после цветения фитопланктона. Цветение фитопланктона начинается в марте-апреле, сразу за сходом ледяного покрова и продолжается до июня. К этому времени запас биогенных элементов в верхнем слое заканчивается, и цветение ослабевает или вообще прекращается до осени. В сентябре-октябре наблюдается второе, менее интенсивное осеннее цветение фитопланктона, заканчивающееся с образованием ледяного покрова. Периоды цветения связаны с температурой воды, световым режимом и запасом биогенных элементов в верхнем слое.

В бассейне Белого моря сезонный ход биогенных элементов обусловлен изменчивостью притока баренцевоморских вод, имеющего два максимума – весной и осенью. При этом весенний максимум, в марте связан с минимумом речного стока, а осенний – с осенними штормами в Арктике и соответствующим повышением уровня на северной границе Белого моря. Как уже указывалось выше, цветение фитопланктона начинается сразу после начала схода ледяного покрова, вначале в Онежском заливе. Полностью ледяной покров в данном расчете исчезает в начале мая. Цветение появляется в Двинском заливе и распространяется вдоль Зимнего берега на север. Максимальное цветение наблюдается в начале мая, затем, по мере уменьшения запасов биогенов в верхнем слое, цветение ослабевает. При потеплении климата изменяется стратификация вод. Несмотря на уменьшение притока пресной воды в локальных районах, в основном в Двинскую губу, термо-

клин в летний период становится более устойчивым, что препятствует попаданию биогенов в поверхностные слои моря.

При потеплении климата отмечается следующая картина изменения биогенов в море. Как видно из графиков, изменение средней концентрации фосфатов незначительно (рис. 8.16). Это связано с тем, что основная масса фосфатов приносится в Белое море из Баренцева моря. Концентрация фосфатов в реках относительно невелика, а приход баренцевоморских вод на порядок больше речного стока.

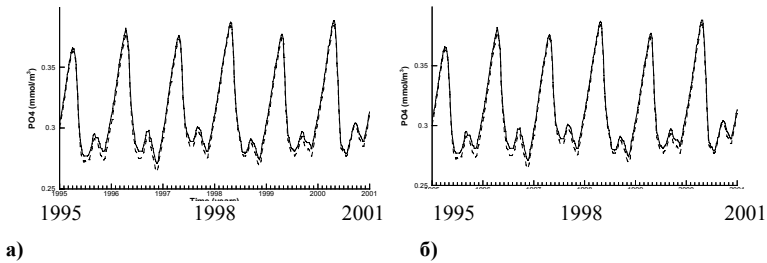


Рис. 8.16. Средняя концентрация фосфатов (в ммоль/м³). Сплошная линия – контрольный счет, пунктирная – потепление климата (увеличение температуры воздуха на 2°C). а) при уменьшении стока рек на 20% , б) при увеличении стока рек на 20%

Графики изменения концентрации нитратов приведены на рис. 8.17. Как видно на рисунках, содержание нитратов в Белом море существенно уменьшилось в результате сокращения речного стока. Это связано с тем, что, в отличие от фосфора, неорганический азот попадает в море в основном с речным стоком.

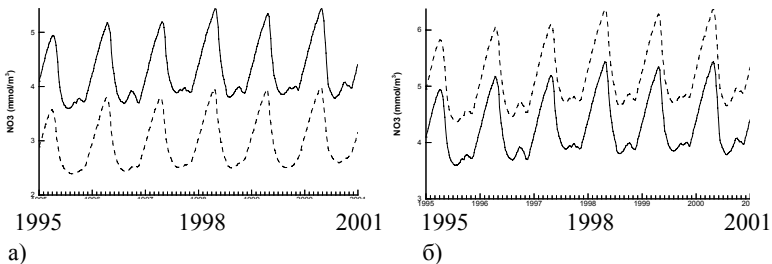


Рис. 8.17. Средняя концентрация нитратов (в ммоль/м³). Сплошная линия – контрольный счет, пунктирная – потепление климата (увеличение температуры воздуха на 2°C). а) при уменьшении стока рек на 20% , б) при увеличении стока рек на 20%

Сравнение осредненных значений, полученных на модели и по данным наблюдений, показывает, что модель правильно описывает такую важную черту режима биогенных элементов в Белом море, как относительное снижение их концентрации в восточных заливах и по направлению к Баренцеву морю (табл. 8.1). В некоторых районах концентрация нитратов представляется несколько завышенной (например, в Бассейне и Кандалакшском заливе), тогда как концентрация фосфатов выглядит несколько заниженной (в особенности, в Онежском заливе). Сопоставление модельных средних для 1975–1985 и 1995–2000 гг. подтверждает устойчивость крупномасштабной сезонной динамики биогенных элементов, что позволяет при дальнейшем анализе изменения климата и антропогенной нагрузки ограничиться интервалом контрольного счета.

Таблица 8.1

Многолетние средние концентрации биогенных элементов, осредненные по отдельным районам моря за период 1978–1983 гг. по данным наблюдений (Максимова, 1991) и по результатам моделирования для контрольных расчетов за 1975–1985 and 1995–2000 гг.

Биогенные элементы	Нитраты+нитриты (mg N m ⁻³)			Фосфаты (mg P m ⁻³)		
	1978-1983	1975-1985	1995-2000	1978/1983	1975/1985	1995-2000
Горло	42.1	32.8	32.7	14.9	12.0	12.0
Центральный бассейн	56.4	90.0	87.2	20.9	22.3	22.5
Кандалакшский залив	58.9	105.3	103.4	20.6	24.4	26.4
Онежский залив	46.1	49.5	46.2	17.9	2.3	2.3
Двинский залив	49.7	61.9	61.6	19.7	11.3	11.6
Мезеньский залив	38.0	38.0	38.0	15.0	6.5	6.6

Отчасти указанные расхождения между модельными и натурными данными могут объясняться различиями в конфигурации сравниваемых районов, а также отличиями между средними, получаемыми по редким асинхронным наблюдениям, и рассчитываемыми по четырехмерным модельным полям. Поэтому поучительно также сопоставить пределы изменений характеристик (табл. 8.2), присущие определенным водным массам, выделенным Максимова (Максимова, 1991). Несмотря на меньшую изменчивость модельных значений, такое сопоставление указывает на значительно лучшую сравнимость природы и модели в Бассейне и Кандалакшском заливе. Однако смоделированные пределы концентрации фос-

фатов в Онежском заливе всё же остаются ниже наблюдаемых, что может объясняться высокими значениями соотношения минеральных азота и фосфора N:P, поступающих с речным стоком в юго-восточную часть Белого моря по сравнению с другими районами моря.

Таблица 8.2

Диапазон изменений абиотических параметров (температура и соленость) и биогенных элементов различных водных масс Белого моря, полученных из наблюдений Максимовой (Максимова, 1991), и расчетных значений на модели за период и рассчитанных за 1995–2000 гг.

Водные массы районов моря	Набл. модель	T °C	S ‰	DIN	DIP
Бассейн и Кандалякский залив					
Поверхностные водные массы (0–15 м)	Набл.	3.1 – 12.9	19.2 – 28.0	9.7 – 83.4	0.2 – 34.0
	модель	1.6 – 8.5	25.2 – 27.6	0.3 – 72.2	5.5 – 14.2
Промежуточные водные массы (15–60 м)	Набл.	-1.7 – 5.1	26.5 – 29.2	22.6 – 105	4.9 – 27.8
	модель	-1.1 – 1.5	28.0 – 28.5	50.5 – 75.8	15.8 – 20.4
Глубоководные водные массы (> 60 м)	Набл.	-1.2 – -1.5	25.5 – 30.5	56.3 – 211	18.7 – 40.6
	модель	-1.3 – -1.4	29.3 – 29.7	150 – 163	34.2 – 38.8
Двинский залив					
Поверхностные водные массы (0–15 м)	Набл.	15.4 – 16.4	9.7 – 25.7	10.2 – 39.8	3.3 – 21.8
	модель	7.0 – 8.8	18.5 – 23.7	23.1 – 148	4.1 – 15.2
Промежуточные водные массы (15–60 м)	Набл.	2.8 – 4.2	26.6 – 27.0	38.2 – 38.2	14.1 – 17.3
	модель	-1.2 – 2.4	27.4 – 27.8	40.4 – 56.2	13.2 – 16.0
Онежский залив					
Вся толща вод	Набл.	2.8 – 12.2	19.6 – 27.9	19.7 – 95.4	4.2 – 17.0
	модель	-1.1 – 10.3	21.2 – 24.9	20.2 – 3.6	1.5 – 7.8

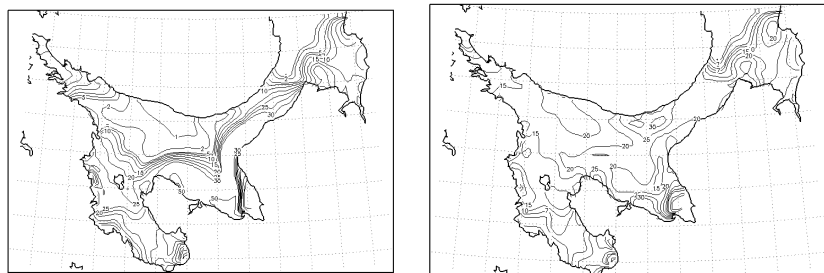
Пространственно-временная динамика биогенов определяется как развитием планктонного сообщества, так и их поступлением с речным стоком. Зимнее накопление неорганических питательных веществ в модели достигает своего максимума в марте, с наиболее высокими концентрациями в заливах, принимающих речную нагрузку. В период весеннего цветения интенсивное потребление биогенов сообществом фитопланктона уравновешивается увеличением их поступления при половодье. И, как результат, концентрация биогенов остается относительно высокой в течение всего лета, хотя и различающейся по районам моря. Как показывают

осредненные результаты моделирования (Табл. 8.2), в открытом море и в Кандалакшском бассейне соотношение неорганических N:P (в единицах веса) остается ниже 4.5 в течение всего года, что в сравнении с классическим соотношением Редфильда, равным 7.2, указывает на лимитирующую роль азота в развитии фитопланктонного сообщества. В Онежском заливе, напротив, рост фитопланктона жестко ограничен дефицитом фосфора, тогда как в Двинском и Мезенском заливах ресурсы биогенов более сбалансированы. Лимитирование роста фитопланктона азотом в модели полностью соответствует результатам обобщения натуральных наблюдений (Максимова, 1991; Berger et al., 2001). В Онежском заливе осредненные концентрации хлорофилла-а (Мордасова, 1999; Berger et al., 2001) и биомассы зоопланктона оказываются меньше, чем в других районах моря (табл. 8.2.), что может свидетельствовать о пониженной продуктивности этого залива вследствие её лимитации фосфором.

В модели весеннее цветение фитопланктона начинается еще под льдом в конце марта – начале апреля и распространяется по морю вслед за тающим ледовым покровом (рис. 8.18). Кульминация цветения с биомассами, превышающими 50 мг N м^{-3} , приходится на конец апреля – начало мая. После весенней вспышки биомасса фитопланктона постепенно уменьшается и летом остается достаточно низкой, на уровне $10\text{-}15 \text{ мг N м}^{-3}$. Происходит это как из-за нехватки биогенных элементов, так и вследствие выедания растений развивающимся сообществом зоопланктона. Осенью биомасса фитопланктона не превышает 5 мг N м^{-3} , но в модели вегетационный сезон длится, возможно, дольше, чем в природе.

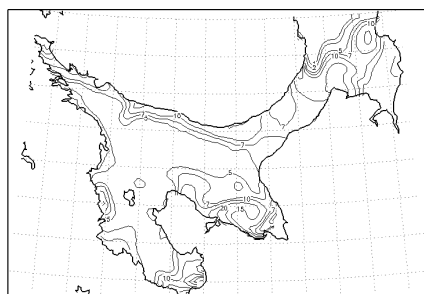
При уменьшении стока рек на 20% исчезает второй летний максимум цветения, при возрастании стока – характер распределения средней концентрации фитопланктона остается как при контрольном счете, т.е. при норме.

Далее приводятся результаты расчета пространственного распределения концентрации фитопланктона в мгN/м^3 на разрезе Воронка-Горло-Бассейн – Гридино (Рис. 8.20): а) Май, б) Август 2000 г. для нормы (контрольный счет).



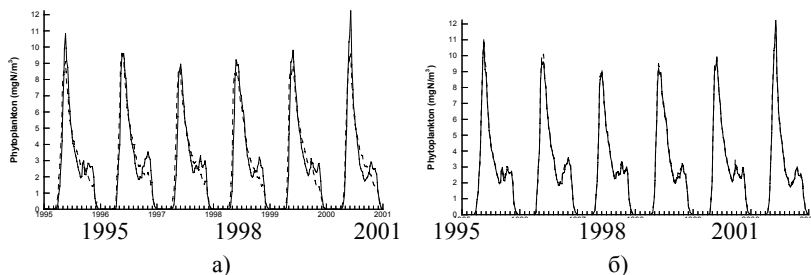
а)

б)



в)

Рис. 8.18 Динамика концентрация диатомовых в поверхностном слое Белого моря 2 (а), 7 (б) и 17 (в) мая 1992 (в мг N м^{-3})



а)

б)

Рис. 8.19. Средняя концентрация фитопланктона (мгN/м^3) для контрольного периода (сплошная линия), и при потеплении климата (увеличение температуры воздуха на 2°C) – пунктирная; а) при уменьшении стока рек на 20% , б) при увеличении стока рек на 20%

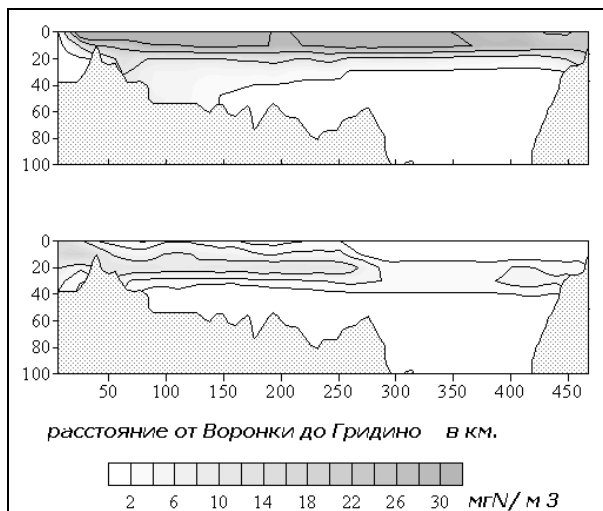


Рис. 8.20. Пространственно-временное распределение концентрации фитопланктона в мгN/м³ на разрезе Воронка-Горло-Бассейн – Гридино. Расстояние от границы Белого и Баренцева моря в км.: а) Май, б) Август. Контрольный счет

Ниже показана сезонная изменчивость концентрации диатомовых с глубиной. На рис. 8.21 видно, что в разные сезоны года флагаелляты наблюдаются до глубин порядка 40 м в среднем для Бассейна в квадрате, ограниченном координатами 65-66.5 С.Ш. и 35-38 В.Д.

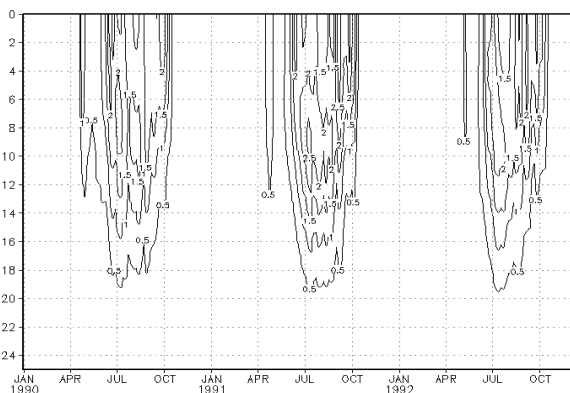


Рис. 8.21. Сезонная изменчивость концентрации флагаеллятовых с глубиной (мгN/м³)

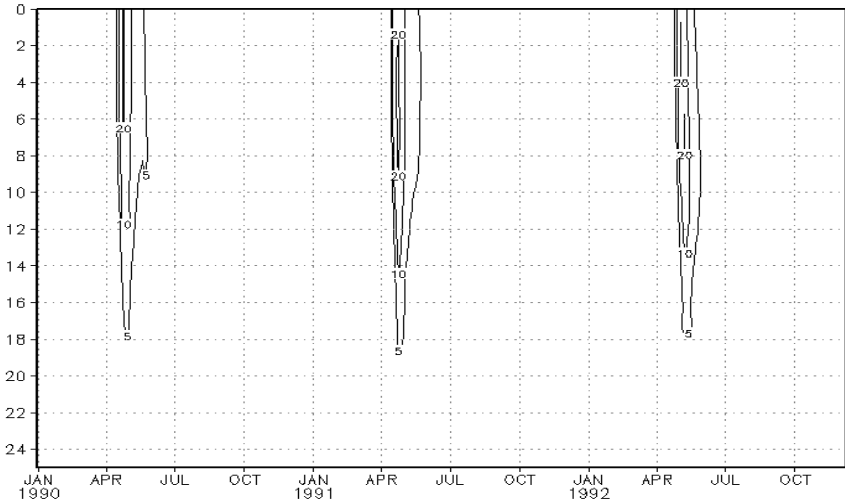


Рис. 8.22. Многолетняя изменчивость концентрации флагеллятовых с глубиной (mgN/m^3) для контрольного счёта в среднем для Бассейна в квадрате, ограниченном координатами 65-66.5 С.Ш. и 35 -38 В.Д.

Полагая, что содержание азота составляет 0.5% для диатомовых и 1.0% для остальных представителей фитопланктонного сообщества, весенний максимум биомассы может достигать $10 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ (сырого веса), а летние значения не превышают $1.0\text{--}1.5 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$. Полагая, что соотношение углерода и концентрации хлорофилла-а $\text{C}:\text{Chl-}^{\text{a}}$ находится в диапазоне 30-60, а весовое соотношение Редфильда $\text{C}:\text{N}$ равно 6, модельные значения весной и летом соответствуют диапазонам 5-10 и $0.5\text{--}3.0 \text{ мг Chl-}^{\text{a}} \cdot \text{м}^{-3}$, соответственно. Биомасса зоопланктона (рис.8.23) в модели постепенно увеличивается и достигает своего максимума $5\text{--}10 \text{ мг N} \cdot \text{м}^{-3}$ или $0.5\text{--}1.0 \text{ г} \cdot \text{м}^{-3}$ (сырого веса) в июле-августе, при этом повышенные значения приходится на районы с более интенсивным развитием фитопланктона. Сезонная динамика биомассы фито- и зоопланктона (рис. 8.19-8.25), полученная в модели, хорошо сопоставима с наблюдаемыми типичными и пиковыми значениями, полученными Зоологическим институтом РАН и представленными в ряде работ, например, в книге (Berger et al., 2001).

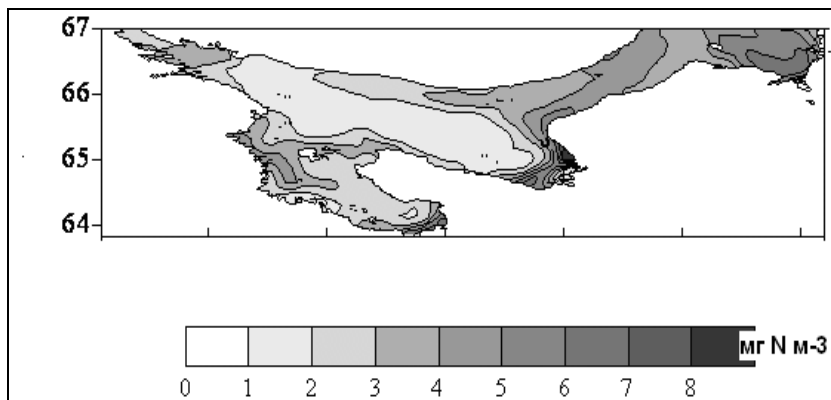


Рис. 8.23. Распределение биомассы зоопланктона ($\text{mg N} \cdot \text{m}^{-3}$) в поверхностном слое моря по данным моделирования в августе. Контрольный счет

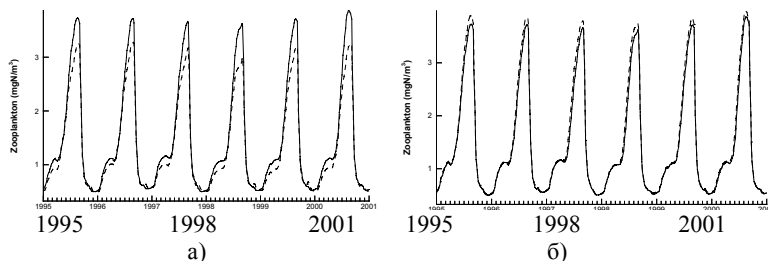


Рис. 8.24. Средняя концентрация зоопланктона (mgN/m^3). Сплошная линия – контрольный счет, пунктирная – потепление климата (увеличение температуры воздуха на 2°C). а) при уменьшении стока рек на 20%, б) при увеличении стока на 20%

Эффект лимитирования биогенами фитопланктона совпадает с началом роста сообщества зоопланктона, что приводит к формированию летнего минимума биомассы фитопланктона. Относительно однородное вертикальное распределение зоопланктона поддерживается потреблением фитопланктона в верхних слоях и оседающего детрита – в нижних. С другой стороны, летнее потребление биогенов фитопланктоном до определенной степени компенсируется регенерацией азота вследствие экскреции продуктов метаболизма зоопланктоном и детритной минерализацией, что приводит к образованию летнего максимума аммония в поверхностных и глубоководных слоях.

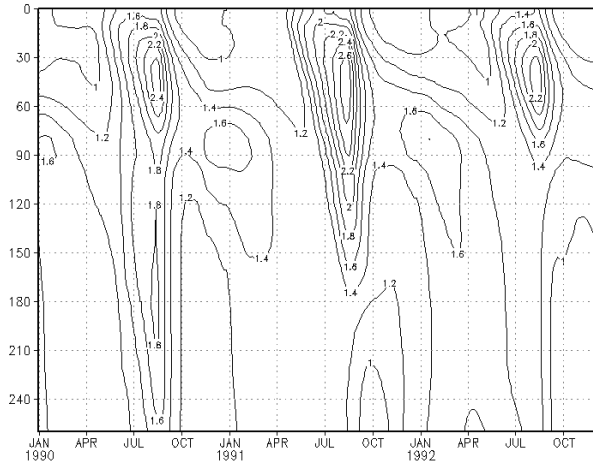


Рис. 8.25. Сезонная изменчивость концентрации зоопланктона с глубиной ($\text{mg N}\cdot\text{m}^{-3}$) в среднем для Бассейна в квадрате, ограниченном координатами 65-66.5 С.Ш. и 35-38 В.Д.

В модели осенне-зимнее конвективное перемешивание моря начинается в сентябре. Однако соответствующее накопление биогенов в верхних слоях воды может для некоторых лет и районов моря несколько запаздывать из-за продолжающегося их потребления фитопланктоном.

Таким образом, обобщая результаты моделирования биогеохимической динамики азота и фосфора, можно заключить, что расчеты по модели выглядят вполне разумными, что дает возможность использовать ее в сценарных расчетах.

Расчеты на модели временной и пространственной динамики концентраций фитопланктона и зоопланктона ($\text{mg N}\cdot\text{m}^{-3}$), детритного азота ($\text{mg N}\cdot\text{m}^{-3}$), аммония ($\text{mg N}\cdot\text{NH}_4\cdot\text{m}^{-3}$), нитратов ($\text{mg N}\cdot\text{NO}_3\cdot\text{m}^{-3}$), фосфатов ($\text{mg P}\cdot\text{PO}_4\cdot\text{m}^{-3}$) за 1998–2000 гг., были выполнены для различных акваторий Белого моря и в целом для моря. Как показало сопоставление модельных расчетов с имеющимися данными натуральных наблюдений, модель ААНИИ-ИО правдоподобно воспроизводит современную динамику биогенных элементов в Белом море и может использоваться для исследования реакции Белого моря на возможные сценарии климатических изменений и антропогенных воздействий. В соответствии со сценариями изменений климата на водосборе Белого моря, предложенными в работах (Климат., 2004), и предвидимыми антропогенными изменениями (Druzhinin, Terzhevik et al., в кн. Filatov et al., 2005 и в Главе 2 наст. кни-

ги) были проведены серии численных экспериментов. Впервые такие расчеты были проведены и опубликованы в книге (Filatov et al., 2005). В качестве начальных условий для сценариев 2-4 использовалось решение контрольного (CR) эксперимента на 01 января 1980 г. Разница между контрольным и сценарными расчетами в дальнейшем анализировалась путем осреднения по всему Белому морю за 1996-2000 гг. Все представленные расчеты за этот период справедливы и на настоящее время, т.е. на 2007 г., так как климатические условия за этот период сохранились.

Расчеты показали, что воздействие сравнительно малых изменений климатических факторов на биогеохимический круговорот биогенных элементов в экосистеме моря оказывается незначительным (рис. 8.26-8.27).

В соответствии со сценарием потепления климата, уменьшившийся речной сток приводит, как и ожидалось, к увеличению средней солености моря примерно на 0.6‰. Толщина льда и покрытие моря ледовым покровом также уменьшаются, однако довольно незначительно – менее чем на 0.1 м и на 10%, соответственно. А более раннее формирование термоклина с более резким градиентом температуры приводит к ослаблению вертикального перемешивания и меньшему прогреву глубинных слоев. В результате, несмотря на возрастание температуры воздуха, средняя температура воды моря летом несколько снижается. При потеплении влияние уменьшения стока р. Онеги будет более заметно, чем увеличение солености в Кандалакшском заливе и Бассейне. Возможно смещение в сторону р. Онеги и границ фронта маргинального фильтра.

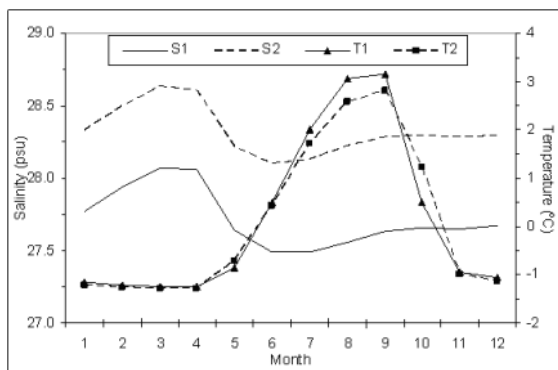


Рис. 8.26. Сезонная динамика солености (S) и температуры (T) вод Белого моря по данным расчетов за пять лет (1996-2000 гг.) в контрольном эксперименте (1) и по климатическому сценарию (2). (По Neelov, Savchuk, 2005 в кн. Filatov et al., 2005)

Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

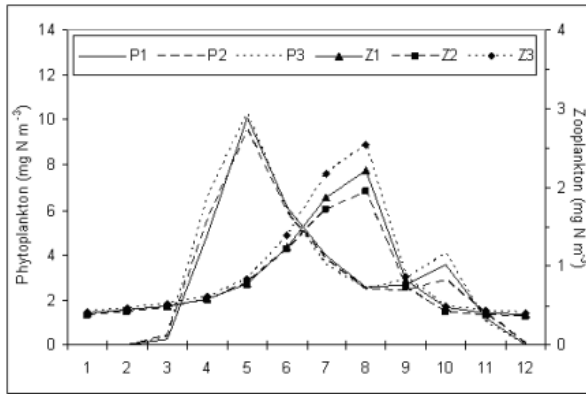


Рис. 8.27. Сезонная динамика биомассы фитопланктона (P) и зоопланктона (Z) в Белом море по данным расчетов за пять лет (1996–2000 гг.) в контрольном тесте (1), по климатическому сценарию (2) и при антропогенном воздействии (3).
(По Neelov, Savchuk, 2005 в кн. Filatov et al., 2005)
Печатается с разрешения издательства Springer-Praxis

Воздействие сравнительно малых изменений климатических факторов на биогеохимический круговорот также оказывается незначительным. Вследствие уменьшения поступления питательных веществ с речным стоком на 20% зимнее накопление неорганического азота снижается на 15% по сравнению с контрольным экспериментом. В результате биомасса фитопланктона, развитие которой лимитируется азотом (в море в целом), а в Онежском заливе фосфором, уменьшается всего на несколько процентов, что приводит и к весьма незначительному снижению биомассы зоопланктона. Летняя же динамика фосфора меняется по-другому, т.к. уменьшение поступления фосфатов с речным стоком компенсируется их недоиспользованием фитопланктоном, потребности которого в фосфоре ограничены нехваткой имеющегося азота.

В сценарии с усилением антропогенного воздействия в виде возрастания на 20% речной нагрузки биогенными элементами характерная реакция экосистемы вызвана сходными механизмами, но действующими в противоположном направлении. Несмотря на десятипроцентное увеличение зимнего накопления неорганического азота, летняя биомасса фитопланктона почти не увеличивается из-за усилившегося выедания растений зоопланктоном, развитие которого обеспечивается взрослой

первичной продукцией. На увеличение же первичной продукции и, соответственно, возросшее потребление фосфора, указывает снижение летних концентраций фосфатов. В свою очередь, летняя интенсификация регенерации биогенов приводит к некоторому возрастанию осенней биомассы фитопланктона.

Обобщая результаты сценарных расчетов, необходимо подчеркнуть, что как климатические, так и антропогенные пертурбации, положенные в основу сценариев, привели к незначительным изменениям основных показателей эвтрофирования Белого моря, которые вряд ли удалось бы обнаружить по редким полевым измерениям характеристик, подверженных многомасштабной природной изменчивости, от синоптических флуктуаций до межгодовых вариаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

На основе анализа многолетних системных исследований, выполненных в комплексных экспедициях ИВПС КарНЦ РАН, по данным анализа длительных натуральных наблюдений на постах Росгидромета, а также результатов экспериментов с использованием современных трехмерных численных моделей, выявлены закономерности изменений экосистемы Белого моря и его водосбора под влиянием климатических и антропогенных факторов.

В результате исследований были изучены закономерности географии водосбора, получены системные сведения о химическом и водном стоке рек, выявлены основные источники загрязнения моря. Эти данные использовались для численного моделирования экосистемы. Обобщены сведения о закономерностях океанографического режима моря, о пространственно–временных особенностях распределения некоторых абиотических и биотических параметров по данным контактных и спутниковых дистанционных измерений.

Показаны современные особенности климата и предложены возможные сценарии климатических изменений, основанные на результатах длительных измерений и численных расчетов на модели глобального климата ЕСНАМ-4. Эти сценарии использовались при моделировании изменений экосистемы при возможных климатических вариациях.

Впервые для водосбора Белого моря выполнено обобщение сведений о современном состоянии социально-экономического развития водосбора Белого моря. Сформулированы сценарии экономического развития бассейна Белого моря для оценки возможных изменений в экосистеме моря как отклик на колебания внешнего воздействия и выработаны рекомендации по рациональному использованию ресурсов Белого моря и его водосбора.

Проведенные исследования, а также сравнение с результатами предшествующих работ показали, что состояние водной среды, уровень загрязнения вод эстуариев, открытых частей Белого моря в целом остаются устойчивыми. Эстуарные районы рек Северная Двина, Онега, Мезень продолжают испытывать достаточно сильное антропогенное воздействие, которое, однако, не выходит за рамки сложившегося в последние годы техногенного прессинга на водную экосистему моря.

Изучены возможные изменения в экосистеме, обусловленные естественными и антропогенными факторами. Выполнено сравнение данных расчетов на модели и наблюдений, собранных на опорной сети Росгидромета и в экспедициях ИВПС КарНЦ РАН. В результате показано, что:

- в данный период времени состояние экосистемы Белого моря является стабильным. За последние 10 лет отмечается некоторое улучшение качества воды во всех районах Белого моря. Увеличение на 10% и более средневзвешенной концентрации биогенных веществ не нарушает равновесия экосистемы моря в целом, исключение составляет Двинский залив, где качество воды продолжает ухудшаться;
- при возможном потеплении климата (и связанном с ним уменьшением речного стока на 20% и увеличением среднегодовой температуры на 2°C) произойдет уменьшение средней толщины морского льда на 10 см, увеличение средней солёности вод моря на 0,6‰, возрастание толщины верхнего квазигомогенного слоя и обострение летнего термоклима. Это, в свою очередь, ослабит вертикальный водообмен моря, что приведет к дефициту биогенов в поверхностных водах и ослаблению осеннего цветения фитопланктона;
- возможные изменения концентрации биогенных элементов в речном стоке не приведут к существенным изменениям экосистемы Белого моря и его эвтрофикации.

Полученные в результате проведенного исследования дают основы для разработки мероприятий по улучшению качества водной среды моря, а также по снижению риска от чрезвычайных антропогенных экологических ситуаций, возрождению региона ББМ. Можно констатировать, что современное состояние вод и биоты Белого моря является по-прежнему перспективным для развития мари-культуры.

ПОСЛЕСЛОВИЕ

Представленные в книге сведения об антропогенной нагрузке, социально-экономических проблемах, загрязнении водоемов и водотоков водосбора, биогенной нагрузке, закономерностях изменчивости термогидродинамических процессов и полей, климата, полученные на основе анализа натурных наблюдений и моделирования, позволили оценить реакцию экосистемы моря при разных сценариях климатических и антропогенных воздействиях. Полученные сведения могут быть использованы для дальнейших экспериментов по изучению изменений экосистемы Белого моря при других возможных сценариях развития, на более совершенных математических моделях с воспроизведением более высоких трофических уровней экосистемы. Мы надеемся, что выполненная нами работа будет востребована для совершенствования наших знаний об изменении экосистемы моря, разработке обоснованных подходов для рационального использования его ресурсов и их охране. Представляется, что это возможно осуществить на основе системного подхода, усилиями специалистов разных организаций (институтов, ведомств), объединенных общей идеей.

ЛИТЕРАТУРА

- Алексеев А.П., Бергер В.Я., Кулачкова В.Г.* Актуальные научно-прикладные направления исследований Белого моря // Мат. VIII регион. науч.-практ. конф. «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря». Беломорск. 2001. С. 5–6.
- Алимов А.Ф.* Предисловие // Мат. VIII регион. науч.-практ. конф. «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря». Беломорск. 2001. С. 3–4.
- Андроникова И.Н.* Структурно-функциональная организация зоопланктона озерных экосистем разных трофических типов. СПб.: Наука. 1996. 189 с.
- Арктика. Интересы России и международные условия их реализации. М: Наука, 2002.
- Арсеньева Н.Я.* Тепловой баланс Белого моря и его изменчивость во времени и пространстве // Тр. ГОИН. 1961. Вып. 64. С. 93–102.
- Атлас океанов. Северный Ледовитый океан. ГУГик, 1980. 184 стр.
- Афанасьев А.Н.* Колебания гидрометеорологического режима на территории СССР. М.: Наука, 1967. 231 с.
- Бабков А.И.* Гидрология Белого моря. СПб.: ЗИН РАН, 1998. 95 с.
- Барышев И.А. Веселов А.Е.* Количественная характеристика зообентоса некоторых рек бассейна Белого моря (Карельский, Терский и Архангельский берега). Лососевидные рыбы Восточной Фенноскандии. Петрозаводск. 2006. С. 23–30.
- Белое море. Биологические ресурсы и проблемы их рационального использования // Исследование фауны морей. Вып. 42. (50). СПб. 1995 (в 2 частях).
- Березкин В.А.* Влияние прилива на гидрологический режим Горла Белого моря // Записки по гидрографии. 1929. Т. 56. С. 81–114.
- Богомолов Г.В., Янишина М.С., Плотникова Г.Н., Флерова Л.И.* Подземные воды центральной и западной части Русской платформы. Минск, Изд-во АН БССР, 1962.
- Бородулина Г.С., Богачев М.А., Чесалина Г.Л., Перская Е.А., Сельшева И.С.* Эколого-геохимическая характеристика подземных вод Карелии. Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований. Петрозаводск. Карельский научный центр РАН. 2006. С. 294–312.
- Брызгалов В.А., Иванов В.В.* Сток растворенных веществ на замыкающих створах рек бассейнов Арктических морей России. Многолетняя и сезонная изменчивость // СПб: ТЕЗА, 2000. Т. 9. Вып. 2. С. 76–89.
- Будыко М.И., Ефимова Н.А., Строчкина Л.А.* Эмпирические оценки изменения климата к концу XX столетия // Метеорология и гидрология, 1999. № 12. С. 5–12.
- Будыко М.И., Винников К.Я.* Влияние изменений глобального климата на водные ресурсы // Тезисы докл. V Всесоюз. гидролог. съезда. Л. 1986. С. 11–12.

- Бусарова О.Е., Гусев Е.М. Использование результатов моделирования изменения климата для оценки изменения суммарного испарения для территории Европы // Метеорология и гидрология. 1995. № 10. С. 29–34.
- Бышев В.И. Синоптическая и крупномасштабная изменчивость океана и атмосферы. – М.: Наука, 2003. 344 с.
- Веселов А.Е., Казаков Р.В. Ретроспектива уловов и современная ревизия популяций атлантического лосося (*Salmo salar* L.) в России // Проблемы лососевых на Европейском Севере. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1998. С. 3–12.
- Воронков П.П. Основные закономерности формирования химического состава поверхностных вод. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. X, 1959, с. 7–18.
- Воронков П.П. Основные черты формирования режима ионного состава поверхностных вод в условиях севера. Труды Гос. гидрологич. ин-та, вып.33 (87), 1951. С. 64–128.
- Воронков П.П. Особенности формирования химического состава поверхностных вод в различных географических зонах. ДАН СССР, т. XCIV, № 2, 1954.
- Выбор стратегии и моделирование региональной экономики / Под ред. Ходачека В.М., Столбова Г.Ф., Ипатова Ю.М. – СПб.: Изд-во СЗАГС, 2000.
- Генкал С.И., Комулайнен С.Ф. Материалы к флоре *Vaccillariophyta* водоемов Карелии. IV. Реки Карельского побережья Белого моря // Ботанический журнал (в печати). 2007.
- Геологическая карта СССР, 1961.
- Геология Карелии. Ленинград. Изд. «Наука», 1987. 231 стр.
- Геология СССР, т. XXVII, Мурманская область, ч. I, м., Госгеолтехиздат, 1958.
- Геология СССР, т. XXXVII, Карельская АССР, ч. I, м., Госгеолтехиздат, 1960.
- Гидрогеология СССР. Т. XLIV. Архангельская и Вологодская область. М. Недра. 1969. 299 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 240 с.
- Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биопродуктивности. Л.: Гидрометеиздат, 1991. 192 с.
- Гилл А.Е. Динамика атмосферы и океана. М.: Мир. 1986. Т. 1, 2.
- Гирс А.А. Многолетние колебания атмосферной циркуляции и долгосрочные гидрометеорологические прогнозы. Л., 1971. 280 с.
- Голицын Г.С., Мелешко В.П., Ефимова Л.К., Говоркова В.А., Сомова Н.Г. Составляющие водного и теплового балансов на водосборе Ладожского озера по фактическим и модельным данным // Ладожское озеро. Мониторинг, исследование современного состояния и проблемы управления Ладожским озером и другими большими озерами. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000. С. 312–319.
- Государственный водный кадастр. Ежегодные данные по режиму и ресурсам поверхностных вод. Ч. 1. Реки и каналы. Архангельск. 1978–1992. Т. 0. Вып. 0–9.

- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 2005 г. – Петрозаводск: Скандинавия, 2006.
- Государственный доклад о состоянии окружающей природной среды Республики Карелия в 2004 г. – Петрозаводск, 2005.
- Груза Г.В., Бардин М.Ю., Ранькова Э.Я., Рочева Э.В., Соколов С.С., Самохина О.Ф., Платова Т.В.* Об изменениях температуры воздуха и атмосферных осадков на территории России в XX веке // Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений. М. 2001. С. 18–40.
- Давыдов Л.К.* Гидрография СССР, т. I. Л. Изд-во ЛГУ им.Жданова, 1951.
- Денисенко Е.* Надежда на переработку // Эксперт Северо-Запада, 2003, № 3.
- Дерюгин К.М.* К гидрологии Белого моря // Записки по гидрографии. 1923. Т. 47. С. 35–80.
- Дзенс-Литовский А.И.* Азональные явления в зональности природных вод СССР. Труды III Всесоюзного гидрологического съезда, т. X, 1959, с. 23–33.
- Дианов М.Б., Котов С.В., Некрасов А.В., Бояринов П.М., Петров М.П.* Результаты гидродинамического моделирования полусуточных приливов в Белом море. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1990. 19 с.
- Добровольский А.Д., Залогин Е.С.* Моря СССР. М.: МГУ, 1982. 191 с.
- Доктрина развития Северо-Запада России. – СПб.: ЦСР «Северо-Запад», 2002.
- Долотов Ю.С., Коваленко В.Н., Лифшиц В.Х. и др.* О динамике вод и взвеси в эстуарии р. Кереть (Карельское побережье Белого моря) // Океанология. 2002. Т. 42. № 5. С. 765–774.
- Долотов Ю.С., Римский-Корсаков Н.А., Теликовский А.А. и др.* Особенности рельефа, поверхностный донных осадков и строения осадочной толщи в различных зонах эстуария реки Кемь (Белое море) // Океанология, 2005. Т. 45, № 6. С. 927–935.
- Долотов Ю.С., Филатов Н.Н., Здоровеннов Р.Э., Платонов А.В., Шевченко В.П., Римский-Корсаков Н.А., Кутчева И.П., Денисенко Н.В., Немова Н.Н.* // О комплексных исследованиях эстуариев Карельского побережья Белого моря // Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований. 2006. Петрозаводск. С. 463–473.
- Долотов Ю.С., Филатов Н.Н., Петров М.П., Платонов А.В., Толстиков А.В., Шевченко В.П., Политова Н.В., Филиппов А.С., Кутчева И.П.* О характере природных процессов в фазы прилива и отлива в эстуариях Карельского побережья Белого моря // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 1–9.
- Дружинин П.В.* Развитие экономики приграничных регионов в переходный период. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2005.
- Дружинин П.В.* Структурные модели региональной экономики. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2000.
- Европейский Север России: прошлое, настоящее, будущее // Материалы междунар. науч. конф., Архангельск, 1999. 394 с.
- Евсеев А.В., Красовская Т.М.* Эколого-географические особенности состояния природной среды районов Крайнего Севера России. Смоленск: Изд-во СГУ, 1996. 232 с.

- Ежегодники качества поверхностных вод по гидрохимическим показателям на территории деятельности Мурманского, Северного УГМС за 1980–1999 г. (1981–2000) Мурманск. Архангельск.
- Елисов В.В.* Оценка водного, теплового и солевого балансов Белого моря // Метеорология и гидрология. 1997. № 9. С. 81–96.
- Елисов В.В.* Расчет теплового баланса Белого моря // Труды ГОИН. 1985. Вып. 174. С. 107–112.
- Елисов В.В.* Оценка водного, термического и солевого балансов Белого моря // Метеорология и гидрология, 1997. № 9. С. 83–93.
- Ефремова Т.В., Петров М.П.* Моделирование термического режима глубоководной зоны Большой губы Повенецкого залива // Большая губа Повенецкого залива Онежского озера. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 1992. С. 12–18.
- Залогин Б.С., Радионов Н.А.* Устьевые области рек СССР. М.: Мысль, 1969. 311 с.
- Захарова Е.А., Савенко В.С.* Биогенные элементы в эстуариях малых рек Кандалакшского залива Белого моря // Вестн. МГУ. Сер. 5. География. 1993. № 6. С. 64–67.
- Зверев В.П.* Химический состав атмосферных осадков Черноморского побережья Кавказа. ДАН СССР, т. 142, № 5, 1962.
- Иванов В.В.* Методические основы исследований устьевых областей Арктики // Мат. докл. V Всес. гидрол. съезда. Т. 9. Устья рек. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. С. 9–12.
- Иванов В.В.* Пресноводный баланс Северного Ледовитого океана // Тр. ААНИИ. 1976. Т. 323. С. 138–147.
- Иванов В.В., Соловьева З.С., Шикломанов А.И.* Оценка притока речных вод в Печорское море и его возможные изменения в условиях неопределенности климата // Тез. докл. итог. сесс. Уч. совета ААНИИ. СПб., 1996. С. 57–58.
- Иванов В.В., Хлебович В.В.* Эстуарные экосистемы и их место в устьевых природных комплексах // Тез. докл. итог. сесс. Уч. сов. ААНИИ по результатам работ 1996 г. СПб. 1996. Вып. 4. С. 76–77.
- Инжебейкин Ю.И.* Колебания уровня Белого моря. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. 152 с.
- Инжебейкин Ю.И.* О сейшевых колебаниях уровня Белого моря. // Сб. тр. VIII Всеросс. съезда по теор. и прикладн. механике. Екатеринбург: УрО РАН, 2001. С.
- Инжебейкин Ю.И.* Формирование экстремальных уровней в Белом море // Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. геогр. наук. М., 1988. 25 с.
- Ионов В.В., Шилов И.О.* Особенности распространения речных вод и динамики океанологических фронтов в Белом море по результатам спутниковых ИК-измерений и натурным наблюдениям в летний период. Вестник СПбГУ сер. 7, 1996, в.2, № 14 стр. 53–61.
- Калюжнин С.М.* Атлантический лосось Белого моря: проблемы воспроизводства и эксплуатации. Петрозаводск: Издательский Дом «Петропресс». 2003. 263 с.

- Каменский Г.Н., Толстихина М.М., Толстихин Н.И.* Гидрогеология СССР. М. Госгеолтехиздат, 1959.
- Карпечко В.А.* Некоторые закономерности многолетних колебаний суммарного стока рек Карелии // Гидрологические исследования на водоемах Карелии. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 1994. С. 37–40.
- Кендалл М. Дж., Стьюарт А.* Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
- Киселев И.А.* Планктон морей и континентальных водоемов. Т.1. Л. 1969. 657 с.
- Климат Карелии: Изменчивость и влияние на водные объекты и водосборы / Отв. Ред. Н.Н.Филатов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. 224. с.
- Комплексные исследования экосистемы Белого моря: Сб. научных трудов. М.: ВНИРО, 1994. 123 с.
- Комулайнен С.Ф.* Фитоперифитон в малых реках Кольского полуострова. Гидробиол. журн. Киев. 27 с. Деп. ВИНТИ. 22.08.94. N 2097–В94.1994.
- Комулайнен С.Ф.* Перифитон рек Ленинградской, Мурманской областей и Республики Карелия. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1996. 39с.
- Комулайнен С.Ф.* Фитоперифитон в реках Карельского берега Белого моря // Материалы 2-ой международной конференции "Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера". Петрозаводск. 1999. С. 140–143.
- Комулайнен С.Ф.* Фитоперифитон рек Республики Карелия // Ботанический журн. Т. 89. № 3. 2004а. С. 18–35.
- Комулайнен С.Ф., Круглова А.Н., Барышев И.А.* Гидробиологическая характеристика рек Терского берега Кольского полуострова. Труды Карельского НЦ РАН. Петрозаводск (в печати). 2007.
- Комулайнен С.Ф., Круглова А.Н., Барышев И.А.* Структура гидробиоценозов в некоторых реках Карельского побережья Белого моря // Мат-лы IX межд. конф. "Проблемы изучения, рацион. использов. и охраны ресурсов Белого моря". Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2005. С. 156–164.
- Комулайнен С.Ф.* Методические рекомендации по изучению фитоперифитона в малых реках. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2003. 43 с.
- Комулайнен С.Ф.* Экология фитоперифитона малых рек Восточной Финноскандии. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2004. 182 с.
- Комулайнен С.Ф., Круглова А.Н., Хренников В.В., Широков В.А.* Методические рекомендации по изучению гидробиологического режима малых рек Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1989. 41 с.
- Кравец А.Г.* Приливы и их моделирование в Белом море. Архангельск: Проблемы Белого моря. 1981. С. 36–38.
- Краткий справочник по геохимии. Изд. 2-е, М., Недра, 1977, 183 с.
- Круглова А.Н.* Зоопланктон малых рек Кольского полуострова // Гидробиол. журн. Т. 19. 5. 1983. С. 56–58.
- Круглова А.Н.* Зоопланктон озеро – речной системы р. Умба (бас. Белого моря) // Гидробиол. журн. Т. 27. № 4. 1991. С. 18–24.

- Круглова А.Н.* Фауна ракообразных и коловраток реки Кереть (бас. Белого моря) // Тр. КарНЦ РАН "Биогеография Карелии (флора и фауна таежных экосистем)". Серия биологическая. Вып. 4. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 2003. С. 199–202.
- Круглова А.Н.* Формирование сообществ зоопланктона р. Варзуги и ее некоторых притоков // Тр. КарНЦ РАН. Биогеография Карелии. Вып. 7. 2005. С. 96–99.
- Кузнецов В.В.* Белое море и биологические особенности его флоры и фауны. М.-Л., 1960. 322 с.
- Кузнецов О.Л.* Биоразнообразие болотных экосистем Прибеломорья // Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на Карельском побережье Белого моря. Петрозаводск. 1999. С. 46–54.
- Куликова Т.П.* Притоки Белого моря. Зоопланктон // Современное состояние водных объектов Республики Карелия. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1998. С. 169–170.
- Куликова Т.П., Власова Л.И.* Флора и фауна водных экосистем: характеристика и тенденции изменений. Зоопланктон // Разнообразие биоты Карелии: условия формирования, сообщества, виды. Петрозаводск.: КарНЦ РАН. 2003. С. 189–200.
- Кутикова Л.А.* Коловратки фауны СССР (Rotatoria). Л.: Наука. 1970. 744 с.
- Лебедев А.Н. Климат СССР, вып 1, Европейская территория СССР. Л. Гидрометеиздат, 1958.
- Левкин Ю.М., Сербя Б.И., Самохвалов В.А., Антонов С.А.* Грунты Карелии. Петрозаводск. 2002. 212 с.
- Лисицын А.П.* Маргинальный фильтр океанов // Океанология. 1994. Т. 34. № 5. С. 735–747.
- Лисицын А.П.* Новые возможности четырехмерной океанологии и мониторинга второго поколения – опыт двухлетних исследований на Белом море // Актуальные проблемы океанологии. М.: Наука, 2003. С. 503–556.
- Лисицын А.П., Шевченко В.П., Буренков В.И.* Взвесь и гидрооптика Белого моря – новые закономерности количественного распределения и гранулометрии // Актуальные проблемы океанологии. М.: Наука, 2003. С. 556–607.
- Литосфера и гидросфера европейского Севера России. Геоэкологические проблемы. //Российская академия наук. Институт экологических проблем севера // Екатеринбург. УрО РАН. 2001. 407 с.
- Лозовик П.А.* Притоки Белого моря. Химический состав воды. Современное состояние водных объектов Карелии. По материалам мониторинга 1992–1997 гг. Петрозаводск: изд-во КарНЦ РАН, 1998. С. 164–168.
- Лозовик П.А., Басов М.И., Литвиненко А.В.* Оценка поступления химических веществ в гидрографическую сеть с Водосборной территории Карелии. «Водные ресурсы». 2005. Том 32, № 6. С. 584–588.
- Лозовик П.А., Рыжаков А.В., Сабылина А.В., Мартынова Н.Н., Белкина Н.А., Калмыков М.В., Платонов А.В., Потапова И.Ю., Зобков М.Б.* Исследования процессов формирования химического состава поверхностных вод Карелии //

- Водные ресурсы Европейского Севера России: итоги и перспективы исследований. 2006. Петрозаводск. 537 стр.
- Лукин Л.Р., Снеговской С.В. Средняя многолетняя ледовитость Белого моря // Метеорология и гидрология. 1985. № 4. С. 72–78.
- Лукин Ю.Ф. Архангельская область: экономика и политика на пороге XXI века. – Архангельск: Изд-во Поморского госуниверситета, 1997.
- Май Р.И., Фукс В.Р. Нелинейные баротропные приливные явления и остаточная приливная циркуляция в Белом море. // VII Международная специализированная выставка и конференция «АКВАТЕРРА-2004». Сборник материалов по конференции. 2004. Санкт-Петербург. 197–201 с.
- Май Р.И., Фукс В.Р. Остаточные приливные явления в Белом море // Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря. Материалы IX международной конференции 11–14 октября 2004 г., Петрозаводск, Карелия, Россия, Петрозаводск, 2005. С. 202–207.
- Макимова М.П. Аннотированный Атлас Белого моря. Гидрохимия. Океанографические условия и биологическая продуктивность Белого моря. Мурманск. 1991^Б. С. 79–116.
- Макимова М.П. Гидрохимия Белого моря. // Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 2. Белое море. Вып. 2. Л.: Гидрометеиздат. 1991^А. С. 8–152.
- Макимова М.П. Комплексное исследование взаимосвязей гидрохимических характеристик и классификация рек, впадающих в Белое море // Повышение продуктивности и рациональное использование биоресурсов Белого моря. Л. 1982. С. 16–17.
- Макимова М.П. Сравнительная гидрохимическая характеристика рек Терского, Кандакшского, Карельского, Поморского, Лямецкого побережий Белого моря // Итоги и перспективы изучения биологических ресурсов Белого моря. Л. Наука. 1983. С. 18–30.
- Макимова М.П. Экосистема Белого моря и проблемы, связанные с её изучением // Мат. VIII регион. науч.-практ. конф. «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря». Беломорск. 2001. С. 14–18.
- Макимова М.П., Чугайнова В.А. Гидрохимический режим прибрежной зоны Белого моря (губы и шхерные районы). Деп. в ВИНТИ 11.04. 2006. № 404-В 2006. 110 стр.
- Макимова М.П., Чугайнова В.А. Типизация губ Белого моря. // Экологические системы и приборы. 2001. № 4. С. 29–35.
- Мануйлова Е.Ф. Ветвистоусые рачки (Cladocera) фауны СССР. М.-Л.: Наука. 1964. 326 с.
- Марченко. Почвы Карелии. М.-Л. Изд-во АН СССР, 1962
- Масанова М.Д. Межгодовая изменчивость компонентов общей увлажненности территории Европы. // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Л., 1979. 24 с.

- Матвеев А.А.* Химический состав снега в Антарктиде по наблюдениям на профиле Мирный – Восток. Гидрохимические материалы, т. XXXIV, 1961 г., с. 3–11.
- Михайлов В.Н.* Устья рек России и сопредельных стран: прошлое, настоящее и будущее. М.: ГЕОС, 1997. 412 с.
- Моделирование социо-эколого-экономической системы региона / Под ред. Гурмана В.И., Рюминой Е.В. – М.: Наука, 2001.
- Монин А.С., Каменкович В.М., Корт В.М.* Изменчивость Мирового океана. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 264 с.
- Мохов И.И., Хон В.Ч.* Гидрологический режим в бассейнах сибирских рек: модельные оценки изменений в XXI веке // Метеорология и гидрология. 2002. № 8. С. 77–93.
- Мурманская область: тенденции экономического и социального развития на рубеже тысячелетий / Гл.ред. Селин В.С. – Мурманск: КолНЦ РАН, 2001.
- Наумов А.Д., Федяков В.В.* Вечно живое Белое море. СПб. 1993. 334 с.
- Нежданова И.К., Свешников Г.Б., Суетин Ю.П.* О влиянии химического состава пород на характер гидрохимических аномалий в условиях Карело-Кольского региона. // Вестник Ленинградского университета. 1978, № 24. С. 38–45.
- Нечаев Д.А., Яремчук М.И.* Усвоение гидрофизической информации в квазигеострофической модели открытого океана // Океанология. 1992. Т 32, вып. 1. С. 49–59.
- Обзоры загрязненности окружающей среды в Российской Федерации за 1990–1999 гг. М.: Росгидромет, 1991–2000.
- Океанографические условия и биологическая продуктивность Белого моря. Аннотированный атлас. Мурманск, 1991. 216 с.
- Основные направления стратегии социально-экономического развития СЗФО РФ на период до 2015 г. – СПб.: Знание, 2003.
- Отчет по проекту ИНКО-Коперникус "Sustainable management of the marine ecosystem and living resources of the White sea" № ICA2-1999-10014. 2003. 176 с.
- Пантюлин А.Н.* Некоторые особенности структуры Белого моря // Биология Белого моря. Тр. Беломорской биологической станции. Т. 4. М.: МГУ, 1974. С. 7–13.
- Пантюлин А.Н., Повалишишникова Е.С., Захарова Е.А., Хоулэнд Р.* Гидрологические и гидрохимические особенности малых эстуариев Кандалакшского залива Белого моря. Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 1994, № 5. С. 86–96.
- Полонский В.Ф., Лупачев Ю.В., Скриптунов Н.А.* Гидролого-морфологические процессы в устьях рек и методы их расчета (прогноза). СПб.: Гидрометеиздат, 1992. с.
- Регионы России: Стат.сб. В 2 т.Т.2/ Госкомстат России. М.: 2006.
- Регионы Северо-Западного федерального округа России. Социально-экономические показатели. Стат. Сб. – Сыктывкар: ТО ФСГС, 2006.
- Республика Карелия в цифрах. Стат.сборник. – Петрозаводск: Госкомстат РК, 2006.

- Ресурсы поверхностных вод СССР. Основные гидрологические характеристики. Т. 1. Кольский полуостров. Л.: Гидрометеиздат, 1974. 235 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 1. Кольский полуостров. Л.: Гидрометеиздат, 1963. 133 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 611 с.
- Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3. Северный край. Л.: Гидрометеиздат, 1972. с.
- Рихтер Г.Д.* Север Европейской части СССР. М. ОГИЗ, 1946.
- Рожков В.А., Трапезников Ю.А.* Вероятностные модели океанологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 271 с.
- Романов А.А.* О климате Карелии. Петрозаводск., 1961. 139 с.
- Руководство по методам гидробиологического анализа поверхностных вод и донных отложений. Л.: Гидрометеиздат. 1983. 239 с.
- Рылов В.М.* Фауна СССР. Ракообразные. Т. III. Вып. 3. М.-Л.: Изд-во АН СССР. 1948. 318 с.
- Рябинкин А.В., Власова Л.И., Калинкина Н.М., Комулайнен С.Ф., Кухарев В.И., Литвиненко А.В., Хренников В.В., Чекрыжева Т.А., Широков В.А., Щуров И.Л.* Разнообразие флоры и фауны рек Карельского побережья Белого моря // Инвентаризация и изучение биологического разнообразия на Карельском побережье Белого моря. Петрозаводск: КарНЦ РАН. 1999. 140 с.
- Сабылина А.В., Селиванова Е.А.* Сравнительная характеристика стока растворенных веществ некоторых рек Поморского и Карельского побережий Белого моря. // Исследование некоторых элементов экосистема Белого моря и его бассейна. Петрозаводск: Изд-во КарФ АН СССР, 1985. С. 16–19.
- Сабылина А.В., Селиванова Е.А.* Химический состав и качество вод р. Кеми // Современный режим природных вод бассейна р. Кеми. Петрозаводск: Изд-во КарФ АН СССР, 1989. С. 165–180.
- Сало Ю.А.* Закономерности многолетних колебаний элементов водного баланса территории Карелии // Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2003. 24 с.
- Саруханян Н.И., Смирнов Н.П.* Многолетние колебания стока Волги. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 166 с.
- Семенов Е.В.* Основы динамики и мониторинга Белого моря // Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, 2004, с.190.
- Семенов Е.В.* Численное моделирование динамики Белого моря и проблема мониторинга // Изв. РАН. Сер. ФАО. 2004. Т. 40. № 1. С. 128–141.
- Семенов Е.В., Бирюк С.В.* Применение метода множителей Лагранжа к задачам усвоение натуральных данных // Известия АН СССР, Физика атмосферы и океана. 1991. Т. 27, № 12. С. 1316–1324.
- Семенов Е.В., Лунева М.В.* О совместном эффекте прилива, стратификации и вертикального турбулентного перемешивания на формирование гидрофизических полей в Белом море // Известия АН, Физика атмосферы и океана. 1999. Том 35, № 5, с. 660–678.

- Скибинский Л.Э. Роль геохимических барьеров в переносе и накоплении загрязняющих веществ в устьевых и прибрежных биотопах Белого моря // Тез. докл. 8-й рег. науч.-практ. конф. «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря» Беломорск, 2000. С. 51–53.
- Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Качанов С.Ю. Северо-Атлантическое колебание и климат. СПб: РГГУ, 1998. 122 с.
- Смирнова А.И., Терзиев Ф.С., Яковлева Н.П., Арсенчук М.О. Закономерности разномасштабной изменчивости элементов гидрометеорологического режима Белого моря, фоновые оценки их колебаний на современном этапе // Мат. VIII регион. науч.-практ. конф. «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря». Беломорск. 2001. С. 22–29.
- Социально-экономические проблемы Карельского Прибеломорья / Отв.ред. Суворов О.А. – Петрозаводск: КанЦ РАН, 1992.
- Тимонов В.В. К вопросу о гидрологическом режиме Горла Белого моря // Исследования русских морей. 1925. Вып. 1. С. 8–57.
- Тимонов В.В., Кузьмин П.П. Опыт приближенного определения теплового баланса Белого моря // Труды ГГИ. 1939. Вып. 8. С. 22–51.
- Тимонов В.В. Схема общей циркуляции Бассейна Белого моря и происхождение его глубинных вод // Тр. ГОИН. 1947. Вып. 1(13). С. 118–131.
- Толстиков А.В. Изменчивость температурного режима поверхностного слоя воды Белого моря // Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата географических наук. Петрозаводск. 2006. 24 с.
- Толстиков А.В., Петров М.П. Средний многолетний температурный режим поверхностного слоя воды прибрежных районов Белого моря // Океанология. 2006. Т. 46, № 3. С. 344–350.
- Федоров В.Д., Бобров Ю.А. Сезонные изменения некоторых показателей продуктивности фитопланктона Белого моря // Изв. АН СССР. Серия биологическая. 1977. С. 104–112.
- Федоров В.Д., Корсак М.Н., Бобров Ю.А. Некоторые итоги первичной продукции фитопланктона Белого моря // Гидробиологический журнал. 1974. Т. 10, № 5. С. 9–13.
- Феоктистов В.М. Химический состав вод и вынос растворенных веществ водами рек Карельского побережья в Белое море. «Водные ресурсы». 2004. том 31, № 6. С. 683–690.
- Филатов А.Н. Методы индикации барьерных зон на примере Финского залива Балтийского моря и заливов Белого моря. Автореферат дис. соискание степени к.г.н.
- Филатов Н.Н. Изменения климата Восточной Фенноскандии. Петрозаводск, 1997. 147 с.
- Филатов Н.Н., Бояринов П.М., Здоровеннов Р.Э. и др. Оценка изменений Белого моря и его водосбора под влиянием климатических и антропогенных изменений // Материалы международной конференции «Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения». ИЭПС. Архангельск. 2002. Т. 1 С. 403–408.

- Филатов Н.Н., Назарова Л.Е., Сало Ю.А.* Изменение климата, состояния водоемов и водосборов // Физические проблемы экологии (Экологическая физика). М., 2001. С. 76–88.
- Хренников В.В.* Сезонная динамика бентофауны в лососевых реках Карелии и Кольского полуострова // Вопросы лососевого хозяйства на Европейском Севере. Петрозаводск. 1987. С. 65–69.
- Хублярян М.Г., Добровольский С.Г., Найденов В.И.* Оценка возможных изменений речного стока вследствие изменений глобального климата // Тез. докл. Всемирной конференции по изменению климата. Москва. 29 сент. 3 окт. М., 2003. С. 254.
- Швер Ц.А.* Атмосферные осадки на территории СССР. Л. 1976. 302 с.
- Шевченко В.П., Лукашин В.Н., Клювиткин А.А. и др.* Количественное распределение взвеси в Белом море и в эстуариях рек, впадающих в Кандалакшский залив // Мат. 8-й рег. науч.-практ. конф. «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря». Беломорск. 2001. С. 58–59.
- Шикломанов И.А., Георгиевский В.Ю.* Влияние климатических изменений на водные ресурсы и водный режим рек России // Тез. докл. Всемирной конференции по изменению климата. Москва. 29 сент. 3 окт. М., 2003. С. 250.
- Шириков А.* Прагматичная экология // Эксперт Северо-Запада, 2005, № 27.
- Шнитников А.В.* Внутривековая изменчивость общей увлажненности бассейна Ладожского озера // Гидрологический режим и водный баланс Ладожского озера. Л.: Гидрометеоиздат, 1966. С. 5–57.
- Шустов Ю.А.* Экология молоди атлантического лосося. Петрозаводск. 1983. 153 с.
- Якушев Е.В., Михайловский Г.Е.* Моделирование химико-биологических циклов в Белом море // Океанология. 1993. Т.33, № 5. С. 695–702.
- Belkin I.M., Levitus S., Antonov J., Malmberg S.A.* “Great Salinity Anomalies” in the North Atlantic // Progress in Oceanography. Narragansett: Pergamon, 1998. V. 41. P. 1–68.
- Bengtsson L.* A Numerical Simulation of Anthropogenic Climate Change // AMBIO, 1997. V. 26. № 1. P. 58–65.
- Berger V., Dahle S., Galaktionov K., Kosobokova K., Naumov A., Rat'kova T., Savinov V., Savinova T.* White Sea. Ecology and Environment. St.-Petersburg; Tromso, 2001. 157 p.
- Filatov N., Nazarova L., Salo Yu.* Possible climate and water balance changes in Karelia (Russia) in the first half of XXI century // Large rivers. 2002. V. 13. № 3–4. Arch. Hydrobiol. Suppl. 141/3-4. P. 341–352.
- Filatov N.N., Pozdnyakov D.V., Johannessen O.M. et al.* White Sea. Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change. Chichester: Springer-Praxis Publishing, 2005. 472 p.
- Galperin B., Kantha L.H., Hassd S., Rosati A.* A quasi-equilibrium turbulent energy model for geophysical flows // J. Atmos. Sci. 1998. V. 45. P. 55–62.

- Georgievsky V.Yu., Zhuravin S.A., Ezhov A.V.* Assessment of trends in hydrometeorological situation on the Great Russian Plain under effect of climate variations // Proc. of American Geophysical Union, 15-th Annual Hydrology Days. 1995. P. 47–58.
- Gladkov G.L.* Hydraulic resistance in natural channels with movable bed // Proc. of the Int. Symp. East-West, North-South Enc. On the State of the art in Riv. Eng. Methods and Design Philosophies. St.-Petersburg. 1994. V. 1. P. 81–91.
- Grishanin K.V.* The relation between river channel dimensions and discharge of water. Study of erosion, river bed deformation and sediment transport in river basins as related to natural and man-made changes // IHP-V, Technical Documents in Hydrology. 1997. №.10. P. 195–204.
- Hibler W.D.* A dynamic thermodynamic sea ice model // J. Phys. Oceanogr. 1979. V. 9. P. 815–846.
- Houghton J., Meira Filho L., Callender B. A., Harris N., Kattenberg A., Maskel K.* Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of working group I. Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge: Cambridge Univer. Press, 1996. 367 p.
- Ivanov V.V.* River water inflow to the Arctic seas // Oceanography Atlas to the Summer Period. 1.0. 15 March 1998.
- Kivinen Y., Lepisto A.* The effect of climate change on the hydrology of a forested catchment in southern Finland // The Finnish Research Programme on Climate Change. Final Report. Publications of the Academy of Finland 4/96. Edita, Helsinki, 1996. P. 114–118.
- Kobayashi J.* A chemical study of the owerage quality and characteristics of river water of Iapan. «Ber. Chara Inst. Landwirtsch. Biol. Okayama Univ.»// № 3, 1960, p. 313–357.
- Lauder B.E., Reece G.J., Rody W.* Progress in the development of a Reynolds stress closure // J. Fluid Mech.. 1975. P. 68.
- Lauder B.E., Spalding D.B.* Mathematical models of turbulence.- L.-N.Y., Academic press. 1972.
- Maksimova M.P.* Ecosystematic Hydrochemistry of the White Sea // Oceanology. V. 43, Suppl 1. 2003. P. 32–62. МАИК «НАУКА/INTERPERIODIKA» PUBLISHING.
- Neelov I.A.* A model of the Arctic ocean circulation // Proc. of the ACSYS Conf. On the Dynamic of the Arctic Climate System. Goteborg, Sweden, 7-10 November 1994. WCRP-94, WMO/TD-No. 760, September 1996. P. 446–450.
- Neelov I.A., Savchuk O.P.* 3-D IO RAS AARI Coupled Hydrodynamic-biogeochemical model of the White sea (Final report of INCO-Copernicus Project “WHITESEA” No. ICA2-CT-2000-10014: “Sustainable management of the marine ecosystem and living resources of the White sea”. 2003. 220 p.
- Pantulyin A.N.* Hydrological System of the White Sea. // Oceanology, V.43, Suppl 1. 2003. P. 32–62. МАИК «НАУКА/INTERPERIODIKA» PUBLISHING.

- Parkinson C.L.* A large-scale numerical model of sea ice // *J. Geophys. Res.* 1979. V. 84. P. 311–377.
- Phillips O.M.* Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // *J. Fluid Mech.* 1985. Vol. 156. P. 505–531.
- Savchuk O., Wulf F.* Biogeochemical transformation of nitrogen and phosphorus in the marine environment // *Coupling hydrodynamic and biogeochemical processes in models for the Baltic Proper. System ecology contributions.* 1996. № 2. 79 p.
- Savchuk, O.P. and Wulff, F.* Long-term modelling of large-scale nutrient cycles in the entire Baltic Sea. *Hydrobiologia.* (In press, 2007).
- Scientific cooperation in the Russian Arctic Ecology of the White Sea with emphasis on its deep basin // Ed. By E.Rachor. *Berichte zur Polarforschung.* 359 (2000). 109 p.
- Terzhevik A.Yu., Litvinenko A.V., Druzhinin P.V., Filatov N.N.* Economy of the White Sea watershed // *White Sea: Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced By Global Change.* London: Springer-Praxis, 2005. P. 241–303.
- Tolpa S., Gorham E.* The ionic composition of waters from three Polish bogs. «*I. Ecol.*», 48, № 1, 1961. P. 127–133.

**БЕЛОЕ МОРЕ И ЕГО ВОДОСБОР
ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ
И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ**

*Печатается по решению Ученого совета
Института водных проблем Севера
Карельского научного центра РАН*

Фото на обложке И. Георгиевского

Серия ИД. Изд. лиц. № 00041 от 30.08.99 г. Сдано в печать 25.06.2007 г. Формат 60x84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная.
Уч.-изд. л. 22,0. Усл. печ. л. 20,3. Тираж 300 экз. Изд. № 33. Заказ № 662

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