

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи

УДК 551.464.32 (268.45)

ТИТОВ ОЛЕГ ВЛАДИМИРОВИЧ

**МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО
РЕЖИМА И ЭКОСИСТЕМЫ БАРЕНЦЕВА МОРЯ**

25.00.36 – Геоэкология

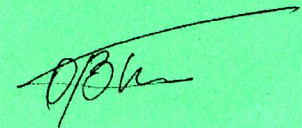
25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени доктора
географических наук

Санкт-Петербург

2003



Работа выполнена в Полярном научно-исследовательском институте морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича (ПИНРО)

Научный консультант:

доктор географических наук, профессор,
член-корреспондент РАЕН

Сапожников Виктор Вольфович

Официальные оппоненты:

доктор географических наук, профессор **Дмитриев Василий Васильевич**
доктор географических наук, профессор **Измайлов Владлен Васильевич**
доктор химических наук **Леонов Александр Васильевич**

Ведущая организация:

Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт

Защита состоится 24 апреля 2003 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д.212.232.21 при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199178 Санкт-Петербург В.О., 10 линия, д. 33, ауд. 74

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: Санкт-Петербург, Университетская набережная. Д. 7/9.

Автореферат разослан «18» марта 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

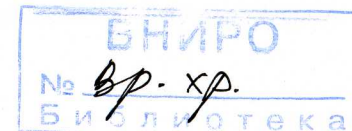
Мосолова Г.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Функционирование экосистемы Баренцева моря тесно связано с циклическими биогеохимическими процессами в морской среде. Материальной основой этих процессов являются растворённые в морской воде органогенные (биогенные) элементы (Вернадский, 1934), подвергающиеся обратимой трансформации в процессе жизнедеятельности гидробионтов.

Изучение пространственно-временной изменчивости содержания биогенных веществ в морской среде является одной из важнейших задач, решаемых в химии моря. С.В.Бруевичем (1978) эта область научных изысканий была выделена в самостоятельную дисциплину – химическую динамику. На специальном уровне исследований химическая динамика является составной частью океанологии, на комплексном уровне её изучение не отделимо от исследования функционирования морских геозкосистем - задачи, решаемой в геоэкологии (Алхименко, 1990; Петров, 1990).

Актуальность темы определяется необходимостью комплексного изучения крупномасштабных изменений в экосистеме Баренцева моря. Гидрохимические исследования, являющиеся частью комплексного мониторинга природной среды и биоты Баренцева моря, проводятся уже многие десятки лет. Основной объём наблюдений составляют измерения содержания в морской воде важнейших биогенных элементов - кислорода и минерального фосфора. Изменения этих гидрохимических параметров обусловлены, с одной стороны, гидрометеорологическими процессами и динамикой водных масс, а с другой - продукционно-деструкционными процессами. Поэтому исследование многолетней динамики гидрохимического режима является ключевым звеном в изучении экосистемы Баренцева моря как функциональной единицы, изменяющейся во времени и пространстве под воздействием ряда причинно-следственных связей.



Актуальность темы в настоящее время возрастает в связи с необходимостью разработки научных основ рациональной эксплуатации биоресурсов Баренцева моря, а также ближайшей перспективой начала промышленной разработки месторождений нефти и газа, находящихся на баренцевоморском шельфе.

Цель работы: исследовать многолетние изменения гидрохимического режима во взаимосвязи с изменениями экосистемы Баренцева моря.

Основные **задачи** исследования заключались в следующем:

- формирование и обработка ретроспективной базы данных о содержании кислорода и минерального фосфора в Баренцевом море;

- восстановление многолетних рядов гидрохимических параметров, оценка качества восстановления, статистический анализ этих рядов, анализ пространственных масштабов многолетней изменчивости гидрохимического режима;

- исследование многолетних изменений системы «атмосфера-гидросфера-криосфера» (АГК-система) Баренцева моря и определение роли физических факторов в многолетних изменениях гидрохимического режима;

- изучение взаимосвязи многолетних изменений климата, гидрологического и гидрохимического режима с изменениями в биоте Баренцева моря; сопоставление многолетних изменений экосистемы моря с современными теоретическими представлениями о характере функционирования водных экосистем; оценка вероятности антропогенной модификации баренцевоморской экосистемы;

- совершенствование методических подходов к прогнозированию пополнения популяций промысловых рыб Баренцева моря;

- исследование особенностей «полузамкнутой» экосистемы реликтового озера Могильное в сопоставлении с многолетними изменениями в открытой части Баренцева моря;

Научная новизна. Диссертация представляет собой первое обобщение закономерностей многолетних изменений гидрохимического режима

Баренцева моря. Впервые восстановлены длительные временные ряды содержания кислорода и фосфатов на разрезе «Кольский меридиан», даны количественные оценки диапазонов их изменчивости, частотной структуры и трендов, показаны основные особенности крупномасштабных изменений гидрохимического режима на всей акватории Баренцева моря и за его пределами.

Впервые на достаточно длительных временных рядах изучены связи многолетних изменений химических, физических и биологических параметров экосистемы шельфового моря, характеризующегося относительно свободным массо- и энергообменом с открытыми районами Мирового океана. Предложена методика численной оценки процессов взаимодействия водных масс в районе климатической фронтальной зоны и трансформации океанических вод при их поступлении на шельф.

Диссертация является одной из первых попыток разработки теоретической схемы функционирования экосистемы Баренцева моря в многолетнем аспекте.

Практическая значимость. Полученные результаты включены в ряд режимно - справочных пособий по гидрохимии и гидробиологии Баренцева моря, а также электронный «Гидрохимический Атлас Баренцева моря». Эти пособия являются основой для анализа текущей гидрохимической и экологической ситуации в морских экспедиционных исследованиях. Методические подходы, разработанные в диссертации, использовались при составлении опытных прогнозов численности пополнения популяций основных промысловых рыб (треска, сельдь, мойва), ранние стадии развития которых проходят в Баренцевом море (протокол №14 от 23.11.99 заседания Методического совета ПИНРО).

Личный вклад автора. Диссертация (идеи, текст и графические материалы) подготовлена лично автором. Теоретические положения, материалы и программные средства, заимствованные в литературе и из других источников сопровождаются соответствующими ссылками.

Основные результаты были получены при осуществлении плановых научно-исследовательских работ. Автор непосредственно проводил гидрохимические исследования в 17 научно-исследовательских рейсах и в 2 полевых экспедициях, материалы которых использованы в данной работе, а в последние годы руководил проведением морских гидрохимических исследований ПИНРО. Автор готовил техническое задание и руководил переводом основной части первичной информации в электронную форму, формировал ретроспективную базу данных гидрохимических наблюдений, разрабатывал методы и программные средства для их обработки. По инициативе и лично автором начато и осуществлено исследование многолетних изменений гидрохимического режима Баренцева моря, их взаимосвязи с изменениями климата, гидрологических условий и биоты, проанализированы полученные результаты, сделаны обобщения и выводы.

Апробация работы. Результаты работы представлялись на Конференции-конкурсе молодых специалистов ПИНРО (Мурманск, 1995); Ежегодных научных конференциях ICES (Альборг, Дания, 1995; Рейкьявик, Исландия, 1996; Каскаис, Португалия, 1998; Стокгольм, Швеция, 1999; Осло, Норвегия, 2001); X Международной конференции по промысловой океанологии (Санкт-Петербург, 1997); Международной конференции BASIS (Санкт-Петербург, 1998); Международной конференции “Экспедиционные исследования Мирового океана и информационные океанографические ресурсы (ОИР-98)” (Обнинск, 1998); отчетных сессиях Ученого Совета ПИНРО (Мурманск, 1998; Мурманск, 2000); Международной конференции “Современное состояние планктона и бентоса, проблемы сохранения биоразнообразия арктических морей» (Мурманск, 1998); Международной конференции “Морской перигляциал и оледенение баренцево-карского шельфа в плейстоцене” (Мурманск, 1998); IX региональной конференции “Комплексное изучение бассейна Атлантического океана” (Калининград, 1999); X и XII Всероссийских конференциях по промысловой океанологии (Калининград, 1999; 2002); II Международном симпозиуме по

исследованиям окружающей среды в Арктике (Токио, Япония, 2000); Всероссийской конференции “Биологические ресурсы окраинных и внутренних морей России” (Ростов-на-Дону, 2000); VIII Всероссийской конференции по проблемам рыбопромыслового прогнозирования (Мурманск, 2001); Международной конференции ICES 1990-1999 (Абердин, Шотландия, 2001); Конференции Межведомственной ихтиологической комиссии (Обнинск, 2001); Международной конференция «Современные проблемы океанологии шельфовых морей России» (Ростов-на-Дону, 2002).

По теме диссертации опубликовано 33 работы, в том числе 3 монографии (2 в соавторстве) и 6 статей в реферируемых журналах.

Базисные положения диссертации, выносимые на защиту:

- гидрохимический режим Баренцева моря претерпевает значительные многолетние и интердекадные изменения; пространственно-временные масштабы изменений содержания минерального фосфора в морской воде значительно превышают масштабы изменений её насыщения кислородом;

- сформулирована теоретическая схема функционирования экосистемы Баренцева моря в многолетнем аспекте.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, включающих 30 разделов, заключения, списка литературы. Рукопись содержит 329 страниц текста, включая 76 рисунков и 16 таблиц. Список литературы содержит 353 наименования, из них 104 на иностранных языках.

Автор выражает искреннюю признательность С.С.Дробышевой, Г.И.Несветовой, В.К.Ожигину, В.В.Сапожникову, В.В.Терещенко, В.Л.Третьяку, чья помощь была неоценимой в течение всей подготовки данной работы, и благодарит С.В.Беликова, Б.И.Беренбойма, В.А.Боровкова, Ю.А.Бочкова, В.Д.Бойцова, А.Б.Карасева, А.И.Крысова, Н.В.Мухину, М.А.Новикова, И.Я.Пономаренко, Э.Л.Орлову, Н.Г.Ушакова, А.А.Филина, Н.А.Ярагину за советы и консультации, а также Н.Т.Лорви и Н.В.Таранькину за большой труд по первичной обработке материала.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **ВВЕДЕНИИ** даётся общая характеристика работы.

ГЛАВА 1. Район исследований и теоретические подходы к его изучению

Краткая физико-географическая и экологическая характеристика Баренцева моря. Баренцево море расположено на шельфе Северного Ледовитого океана между северным побережьем Европы и тремя большими архипелагами - Новая Земля, Земля Франца-Иосифа и Шпицберген. По сравнению с другими арктическими морями баренцевоморский шельф более глубоководен, что обуславливает «открытость» моря для водообмена с сопредельными акваториями. Проникновение теплых атлантических вод в Баренцево море создает особые климатические условия, резко отличающие его по природным характеристикам от других морей Арктики. Промежуточное положение моря между арктической и бореальной океаническими системами обуславливает наличие обширной Полярной фронтальной зоны. Южная часть Баренцева моря не замерзает в течение круглого года, а его расположение в зоне полярных широт обуславливает значительную внутригодовую изменчивость инсоляции водной толщи, гидрологического и гидрохимического режимов. Вследствие этого экосистема Баренцева моря отличается сравнительно высокой биопродуктивностью, богата различными видами гидробионтов.

История исследований и состояние изученности гидрохимического режима Баренцева моря. Первые гидрохимические исследования Баренцева моря были проведены в 1870 г. (Миддендорф, 1871). К настоящему времени получены детальные представления о сезонной изменчивости гидрохимического режима, физических и биохимических факторах, её определяющих. В 90-е годы эти данные были обобщены в ряде научных публикаций.

Многолетние изменения гидрохимического режима Баренцева моря; их механизмы и влияние этих изменений на экосистему Баренцева моря до последнего времени практически не исследовались. Во всех предыдущих публикациях временные рамки выборок не превышали 5-лет, поэтому было «трудно в таких условиях говорить о многолетних колебаниях» (Бруевич, 1948).

Теоретические подходы к изучению многолетних изменений гидрохимического режима и экосистемы Баренцева моря. Опыт изучения многолетней динамики морских экосистем чрезвычайно мал. Тем не менее анализ литературы позволил выделить ряд положений, определивших стратегию исследований:

- прежде всего необходимо выявить связи между различными компонентами экосистемы (Федоров, Гельманов, 1980);

- наряду с «экстенсивными» характеристиками (концентрация, биомасса и т.п.), необходимо исследовать параметры, характеризующие «возмущения» в среде обитания, которые чаще всего определяют функционирование морской экосистемы (Савчук, Матишов, 1990; Кочиков, 1999);

- особое внимание следует уделить изучению динамических процессов (Факторы, определяющие..., 1993);

- за теоретическую основу следует принять учения об экологических сукцессиях, о процессах эвтрофикации водоемов, о типах трофических взаимоотношений в морских экосистемах;

- понимание естественных механизмов функционирования морской экосистемы является фундаментом для интерпретации её зависимости от человека (Towards the 21st..., 2000);

- конечной целью исследований должна быть разработка теоретической схемы, описывающей наиболее общие закономерности функционирования экосистемы (Савчук, Матишов, 1990).

ГЛАВА 2. Материалы и методы проведения наблюдений

Материалы гидрохимических наблюдений. Первичная информация получена в период 1929-2001 гг. в 485 морских экспедициях, выполненных в основном по программе рыбохозяйственных научных исследований. Наблюдения выполнялись во все сезоны года. Всего использованы данные 51 978 глубоководных океанологических станций.

Наиболее часто выполнялись станции стандартных гидрологических разрезов, расположенных в соответствии с направлениями основных ветвей течений. Самым продолжительным и обеспеченным гидрохимическими данными среди других разрезов в Баренцевом море и, вероятно, в Северной Атлантике, является разрез «Кольский меридиан». В 1957-2001 гг. на «реперных» 3-7 станциях (70°30'-72°30' с.ш.; 33°30' в.д.; глубины от 215 до 280 м) разреза выполнено 248 серий наблюдений за содержанием кислорода и 215 серий наблюдений за содержанием фосфатов (рис. 1).

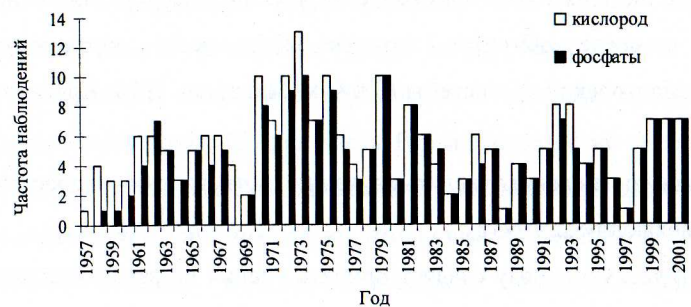


Рис. 1 Количество случаев выполнения гидрохимических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в период 1957-2001 гг.

Концентрация кислорода и фосфатов в морской воде чаще всего определялись на стандартных горизонтах.

В работе использованы литературные данные о содержании кислорода и минерального фосфора на разрезах в Норвежском море и отдельных районах Северо-Восточной Атлантики (СВА).

Методы гидрохимического анализа. Гидрохимические исследования, выполняемые ПИНРО, проводилась в соответствии со стандартными общепринятыми методиками (Инструкции и наставления,

1980). Пробы морской воды обрабатывались в судовой лаборатории непосредственно после отбора. Содержание кислорода в морской воде определялось методом Винклера, фосфора фосфатного - методом Дениже-Аткинса. Во времени изменялись только способы отбора проб воды и аналитические приборы. Весь массив данных рассматривался как однородный, без учёта влияния изменений методического характера.

Материалы и методы проведения гидрометеорологических, гидробиологических и ихтиологических наблюдений. Материалы заимствованы из литературных источников и различных информационных баз и получены с использованием стандартных общепринятых методик.

ГЛАВА 3. Методы обработки и анализа данных

Этапы формирования базы данных гидрохимических наблюдений.

Осуществлялись перенос информации на магнитные носители, экспертный контроль качества данных, исключение дубликатов наблюдений, контроль диапазонов выборки данных, интерполяция данных на стандартные горизонты, контроль статистической однородности и исключение резко отклоняющихся значений по критерию 3σ .

Расчёт полей гидрохимических параметров. Использовался прикладной пакет «OceanDataView». Производилась трансформация системы координат из равноугольной в сферическую, интерполяция данных в узлы нерегулярной сеточной области. Радиус корреляции полей гидрохимических параметров зависел от плотности распределения данных. Его максимальное значение, вычисленное с использованием технологии моделирования вариограмм прикладного пакета «Surfer», составило 108 км.

Восстановления многолетних рядов гидрохимических наблюдений на стандартных разрезах. В качестве характеристики изменений содержания кислорода и фосфатов в Баренцевом море использовались их отклонения от среднемноголетнего сезонного хода (аномалии) в придонных слоях 3-7 станций разреза «Кольский меридиан». Эти станции

расположены в стрежне атлантического потока, и на границе распространения придонных баренцевоморских вод. В придонных слоях разреза минимальна сезонная изменчивость гидрохимических параметров, а межгодовая изменчивость отражает изменения во всей водной толще и максимальна по амплитуде (Титов, 2001).

Восстановление пропусков в рядах среднемесячных значений гидрохимических параметров за период 1957-2001 гг. производилось при помощи численной модификации метода “графической интерполяции”, применяемого при расчете термохалинных характеристик на разрезе (Терещенко, 1997). В этом методе предполагается, что значения аномалий параметров среды изменяются во времени квазилинейно. Обработаны ряды наблюдений на каждой станции разреза. Так как многолетняя изменчивость гидрохимических параметров на отдельных станциях достаточно синхронна, производилось осреднение по группе станций.

Оценка доверительных интервалов восстановления пропусков во временных рядах показала, что возможные погрешности восстановления данных достаточно малы по сравнению с амплитудой их многолетней изменчивости. Восстановление пропусков в рядах гидрохимических параметров при помощи альтернативных методов (полиномами 2-й степени и полиномами Чебышева) привело к результату, весьма схожему с тем, что получен методом “графической интерполяции”.

Для анализа пространственных масштабов и сопряженности многолетней изменчивости гидрохимических параметров в Баренцевом море использовались наблюдения стандартного разреза «м. Нордкап – о-в Медвежий» ($71^{\circ}33' - 73^{\circ}35'$ с.ш., $25^{\circ}02' - 20^{\circ}46'$ в.д.), второго по обеспеченности данными среди стандартных разрезов, расположенных в Баренцевом море. Основные особенности многолетних изменений на этом разрезе оценивались путём расчёта медиан значений параметра и дат наблюдений для ансамблей выборок (около 40 значений), сформированных по неэквидистантным временным интервалам (Шпаер, Мякишева, 1988).

Обработка данных гидрометеорологических наблюдений. В работе производилось численное сопоставление изменений температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и ледовитости Баренцева моря (расчёт индекса ЛТ). Значения индекса ЛТ вычислялись как разности (остатки) среднемесячных значений ледовитости и её значений, рассчитанных по данным температуры воды с помощью линейной регрессии.

Многолетние изменения стратификации водной толщи на разрезе «Кольский меридиан» оценивались по разности плотности воды между придонным (150-200 м) и вышележащими слоями (0-50 и 50-150 м); для выявления тенденций интердекадных изменений стратификации водной толщи вычислялись «накопленные» суммы этих характеристик.

Производилась численная оценка смещения фаз многолетних изменений плотности воды с глубиной (расчёт индекса ФСП). Значения индекса ФСП соответствовали оптимальному сдвигу, соответствующему максимуму функции взаимной корреляции во временной изменчивости аномалий плотности воды в придонных слоях относительно вышележащих.

Статистический анализ и визуализации данных. Данные, имеющие месячную временную дискретность, сглаживались скользящим осреднением с базой в 12 месяцев (см. далее табл. 1). Учитывая то, что в этих рядах присутствует достаточно большая доля значений, восстановленных тем или иным математическим способом, использовался более «строгий» критерий значимости связей - $|r| > 0,32$, $p < 0,001$, хотя длина любого из рядов превышала 468 значений. Во всех иных случаях использовались несглаженные данные. Связи считались статистически значимыми при $p < 0,05$.

Расчёты и их визуализация производились посредством стандартных прикладных пакетов.

Оценка первичной продукции по материалам гидрохимических наблюдений. Годовые величины первичной продукции вычислялись по стехиометрической модели (Redfield, 1934) с учётом сезонной изменчивости концентраций фосфатов в водной толще, зависимости скорости их

регенерации от температуры воды, влияния течений и ледовой кромки (Титов, 1995; Денисенко, Титов, 2001).

ГЛАВА 4. Многолетние изменения гидрохимического режима Баренцева моря

Изменения содержания кислорода и фосфатов на разрезе «Кольский меридиан» и их статистический анализ. Ввиду того, что абсолютное содержание кислорода в водной толще Баренцева моря чаще всего является «зеркальным отражением» теплового состояния среды, в работе оно практически не анализируется.

Среднегодовое насыщение кислородом придонных слоёв составляет 92.5%, максимальный диапазон изменений - 9.6%. Многолетняя изменчивость аномалий кислородонасыщения характеризуется относительно глубокими минимумами, чередующимися с более продолжительными периодами, когда аэрация незначительно превышает норму (рис. 2а).

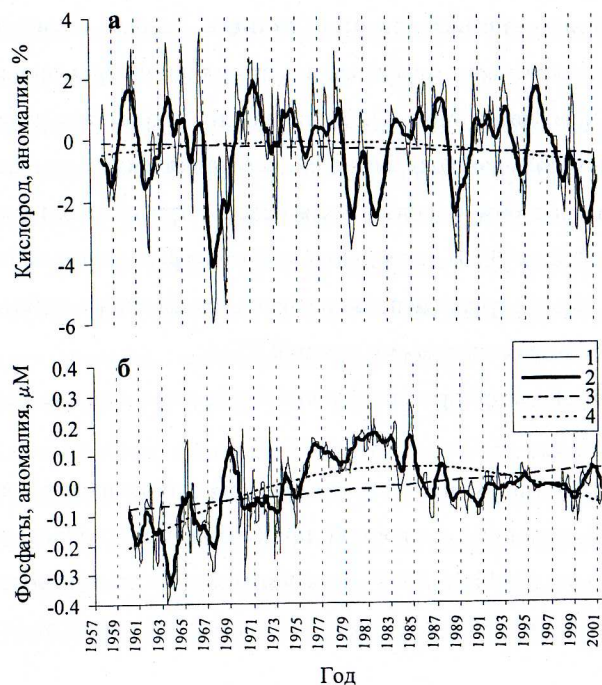


Рис. 2. Многолетняя изменчивость гидрохимических параметров на разрезе «Кольский меридиан»: аномалии насыщения кислородом (а), концентраций фосфатов (б), среднемесячные (1), сглаженные скользящим осреднением по 12 месяцам (2), их линейные (3) и квадратичные (4) тренды

Среднегодовое содержание фосфатов в придонных слоях составляет $0.84 \mu\text{M}$, диапазон изменений - $0.69 \mu\text{M}$. Основной особенностью многолетней изменчивости концентраций фосфатов (рис. 2б) является их значительное увеличение с начала 60-х до середины 80-х годов. Со второй половины 80-х до начала 90-х годов содержание фосфатов понизилось, а затем стабилизировалось на уровне, близком к среднегодовому.

Линейные и квадратичные трендовые составляющие многолетних изменений насыщения кислородом не значимы, поэтому при дальнейшем анализе не принимались во внимание. Многолетние тренды в изменениях содержания фосфатов статистически значимы (см. рис. 2).

На рис. 3 представлены периодограммы рядов гидрохимических параметров. В изменчивости кислорода выделяются 3, 6,4 и 11,2-летняя квазипериодические составляющие. Основной вклад в изменчивость концентраций фосфатов вносит долгопериодная составляющая, которая сравнима с длиной выборки или превышает её.

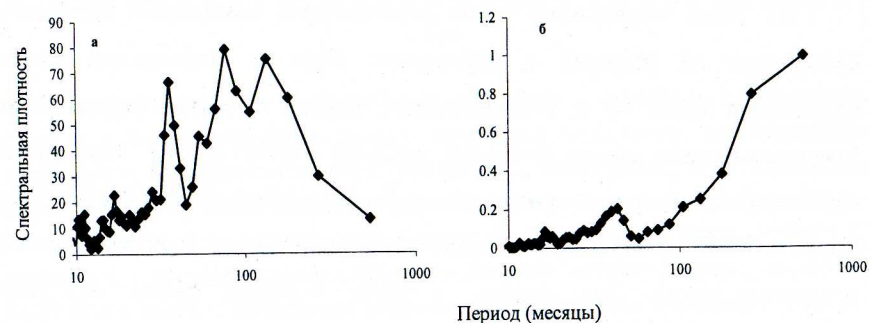


Рис. 3 Функции спектральной плотности рядов среднемесячных аномалий процентного содержания кислорода (а) и концентраций фосфатов (б) в придонном слое на разрезе «Кольский меридиан»

Учитывая известную из литературы (Ottersen, Adlandsvik, Loeng, 2000 и др.) периодичность многолетних изменений основных гидрометеорологических и биологических параметров в Баренцевом море, а

также данные о природных механизмах (эффект Эль-Ниньо, Северо-Атлантическое Колебание, цикл солнечной активности и т.п.), индуцирующих эти периодические изменения, можно утверждать, что изменчивость насыщения кислородом придонных слоёв в Баренцевом море определяется подобными же механизмами. Изменчивость содержания фосфатов явно представлена нестационарным временным рядом, механизм управления которым не достиг статистического равновесия.

Основные особенности изменения содержания кислорода и фосфатов на разрезах в Баренцевом, Норвежском морях и Северо-Восточной Атлантике (СВА). Кросс-корреляционный анализ рядов многолетних наблюдений гидрохимических параметров на разрезах «Кольский меридиан» и «м.Нордкап - о-в Медвежий» показал достаточно хорошую синхронную связь изменчивости содержания фосфатов ($r=0.59$, $n=25$, $p<0.01$) и отсутствие значимой связи для кислорода ($r=0.14$, $n=25$, $p>0.05$) в пределах Баренцева моря.

Не было обнаружено связи многолетних изменений насыщения кислородом на разрезах в Баренцевом море и Норвежском морях. Визуальный (рис. 4) и статистический анализ показал существование значимых прямых связей ($r=0,4-0,6$; $n=22-30$; $p<0.001-0.050$) межгодовых изменений концентраций минерального фосфора в Баренцевом, Норвежском морях и СВА на некотором диапазоне отрицательных и положительных временных лагов. Эти данные, а также большой объем материала, привлеченного для сравнения, позволяют с достаточной уверенностью утверждать, что многолетние изменения содержания фосфатов в исследованных районах имеют квазисинхронный характер.

Если учесть, что фоновое содержание биогенных веществ в морской воде менее подвержено влиянию местных условий, чем режим аэрации, быстро изменяющийся при варьировании локальных особенностей обменных процессов между океаном и атмосферой, то вероятность того, что изменение содержания фосфатов в Баренцевом море является следствием

аналогичных изменений в более южных районах (Норвежское море и СВА), представляется достаточно высокой.

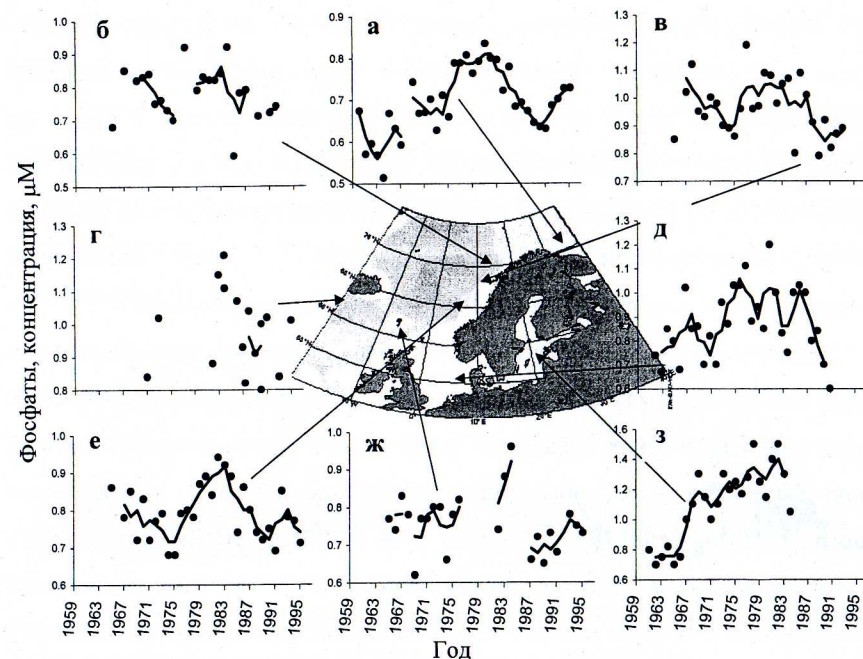


Рис. 4. Многолетние изменения содержания фосфатов в деятельном слое: а – Баренцево море, разрез «Кольский меридиан», среднегодовые значения; б – Норвежское море, разрез 7 С, июнь-июль; в – Норвежское море, разрез 6 С, июнь-июль; г – море Ирмингера, разрез 3 К, март-май; д – Северное море, Гельголанд, январь-март; е – Норвежское море, разрез 5 С, июнь-июль; ж – Норвежское море, Фареро-Шетландский канал, июнь; з – Балтийское море, Готландская впадина, среднегодовые величины. Точки – исходные данные; линии - их скользящее осреднение по 3 годам.

Сравнительная характеристика гидрохимического режима Баренцева моря по данным наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» и данным площадных съемок (на примере осени 2000 года). В настоящее время проблема того, насколько оценки многолетних изменений гидрохимических параметров, полученные в отдельных точках океана могут быть распространены на обширные акватории, остаётся открытой (Постнов,

Лапшин, Овинова, 2002). Применительно к нашим задачам, её решение производилось путём сравнения данных наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» и данных площадных съемок акватории Баренцева моря. В двух рейсах с 10 октября по 19 декабря 2000 г. гидрохимические наблюдения были выполнены почти на всей площади Баренцева моря и 3 раза - на разрезе «Кольский меридиан». Анализ полученных данных показал, что отклонения от нормы (аномалии) гидрохимических параметров на разрезе в целом соответствовали распределению аномалий этих параметров, вычисленных по материалам наблюдений на всей акватории моря.

Многолетние изменения гидрохимического режима Баренцева моря. Выводы предыдущего раздела получили подтверждение при анализе полей гидрохимических параметров в придонном и подстилающем (100 м) слоях Баренцева моря, полученных обобщением данных за отдельные многолетние периоды (для фосфатов 5-14 лет, для кислорода 3-4 года). Выбор периодов обобщения соответствовал «характерным» временным промежуткам, в течение которых значения параметров на разрезе «Кольский меридиан» или значительно отличались от среднемноголетнего, или сохраняли близкие к норме значения. Возможность выполнения таких временных обобщений определялась также тем, что глубже 100 м сезонная изменчивость гидрохимических параметров и влияние ледовой кромки, существенно искажающих осреднённую картину в поверхностных слоях, относительно невелики.

Изменения полей насыщения кислородом придонных слоев и на глубине 100 м в различные периоды времени неплохо соответствуют изменениям этого параметра на разрезе «Кольский меридиан». Основные отличия прослеживаются в районе Центрального жёлоба. Например, в 1967-1970 и 1979-1983 гг., когда на разрезе аномалии процентного содержания кислорода были отрицательными, в районе Центрального желоба на большой площади аэрация придонных слоев составляла 82-85% насыщения. В 1971-1975 и 1984-1988 гг. насыщение кислородом придонных слоёв на

разрезе превышало норму, в эти же периоды процентное содержание кислорода в баренцевоморских водах было 87-92%. Юго-западной Полярного фронта, в зоне распространения прибрежных и атлантических вод многолетние изменения не превышают 3% насыщения.

Как и на разрезе, с 60-х до середины 80-х годов увеличение содержания минерального фосфора отмечалось практически во всех районах моря. После 80-х годов концентрации фосфатов уменьшились также на всей акватории Баренцевом море, за исключением юго-восточных мелководных районов (рис. 5).

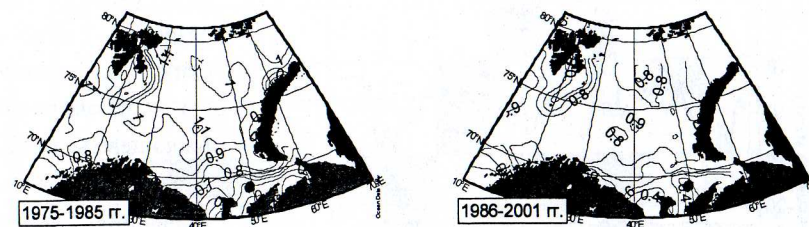


Рис. 5 Распределение концентраций фосфатов (μM) в придонных слоях, осредненное за периоды 1975-1985 гг. и 1986-2001 гг.

ГЛАВА 5. Многолетние изменения системы «атмосфера-гидросфера-криосфера» Баренцева моря.

Изменения климата и проявления дисбаланса в подсистеме «гидросфера-криосфера». Статистические связи параметров, характеризующих многолетние изменения в системе «атмосфера-гидросфера-криосфера» (АГК-система) Баренцева моря, приведены в табл. 1. Достаточно тесная связь некоторых из них хорошо известна и соответствует данным предыдущих исследований (Гирдюк, Дементьев, Зубакин, 1984; Терещенко, 1997 и др.). В таблице мы попытались при помощи порядковой нумерации расположить параметры по их положению в «причинно-следственной цепи». При этом мы прежде всего принимали во внимание величины лагов, которые не превышали 12 месяцев и соответствовали

наиболее тесным кросс-корреляционным связям. Многолетние изменения подсистемы «гидросфера-криосфера» показаны на рис.6а (использован обратный порядок значений по шкале ледовитости).

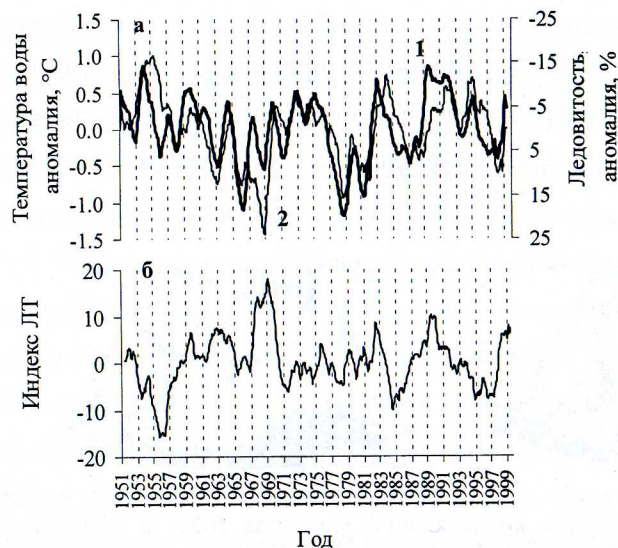


Рис. 6. Многолетние изменения сглаженных значений аномалий: а – температуры воды в слое 0-200 м на разрезе «Кольский меридиан» (1) и ледовитости Баренцева моря (2, обратный порядок значений); б – индекса ЛТ

Судя по величинам лагов, приведенных в табл. 1, наблюдается следующая временная последовательность регистрации многолетних изменений в различных средах: температура воздуха – уровень моря – температура воды – ледовитость. Одна из основных причин этого явления – различия в физических свойствах указанных сред и, следовательно, различная «инерционность» их реагирования на изменения АГК-системы Баренцева моря. Эта инерционность обуславливает наличие временных периодов, в течение которых происходит несинхронное изменение свойств в различных средах, вызванное, тем не менее, одним и тем же внешним механизмом. Согласно ряду теоретических концепций, динамика экосистемы, в том числе и морской, часто определяется «возмущениями» окружающей среды. По нашему мнению, достаточно очевидно, что такие «возмущения» будут происходить прежде всего в периоды нарушения определённого баланса во взаимодействии её компонентов.

Таблица 1. Статистические связи параметров АГК-системы Баренцева моря*.

Параметры	№	1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		
		r	lag	r	lag	r	lag	r	lag	r	lag	r	lag	r	lag	r	lag	r	lag	r	lag	r	lag	r	lag	
Температура воздуха	1																									
Градиент плотности воды 0-50м/150-200м	2	0.48	1																							
	3	0.48	2	0.38	1																					
Уровень моря	4	0.39	4	0.78	1	0.52	1																			
	5			-0.56	2	0.41	24	-0.64	0																	
Градиент плотности воды 50-150м/150-200м	6	0.76	6	0.42	6	0.56	4	0.41	4																	
	7	-0.46	6			-0.32	30																			
Температура воды	8	-0.49	12			-0.33	8																			
	9																									
Ледовитость	10																									
	11																									
Градиент температуры воды «запад-восток»	12																									
	1																									
Индекс ЛТ	2																									
	3																									
Насыщение кислородом	4																									
	5																									
Индекс ФСП 50-150м/150-200м	6																									
	7																									
Индекс ФСП 0-50м/150-200м	8																									
	9																									
Насыщение кислородом	10																									
	11																									
Индекс ФСП 50-150м/150-200м	12																									
	1																									

* В ячейках таблицы попарно представлены максимальные по модулю значения коэффициентов кросс-корреляции ($r > 0.32$, $n=468-598$) и значения положительных лагов в месяцах, соответствующие запаздыванию изменений параметра, краткое название и порядковый номер которого указаны в крайних слева столбцах относительно изменений параметра, порядковый номер которого указан в верхней строке таблицы; значения лагов, превышающие 12 месяцев - в «темных» ячейках. Жирным ирифтом выделены статистические связи насыщения кислородом.

Численным показателем дисбаланса в подсистеме «гидросфера-криосфера» является индекс ЛТ (рис. 6б). Положительные значения индекса ЛТ означают, что температура воды на разрезе «Кольский меридиан» превышает значение, характерное для существующей на момент наблюдений ледовитости Баренцева моря и, соответственно, что акватория Баренцева моря покрыта льдом в большей степени, чем обычно при определенных температурных условиях в морской среде (см. рис. 6а).

Отклонения температуры воды и ледовитости Баренцева моря от нормы определяются преимущественно адвекцией атлантических вод Норвежского течения, изменчивость динамического и теплового состояния которых носит крупномасштабный характер во времени и пространстве и связана с циклоническими процессами в атмосфере (Ижевский, 1961, 1964; Adlandsvik, 1989; Climatic variability..., 1992; Гирдюк, Дементьев, Зубакин, 1984). Ледовый покров, являясь своеобразным «резервуаром холода», сглаживает последствия адвективного притока тепла (Гидрометеорология и гидрохимия..., 1990), и вследствие его большей инерционности межгодовые изменения площади ледового покрова Баренцева моря запаздывают на 3-6 мес по сравнению с изменениями температуры воздуха и воды (см. табл. 1), т.е. обострение суперпозиции «ледовитость-температура воды» является естественным этапом перехода от «арктических» условий на шельфе Баренцева моря к «бореальным». Этот этап обусловлен не только нарастанием поступления тепла, но и реакцией самой системы на усиление внешнего воздействия, что зависит от ее состояния в этот период времени.

В арктических районах изменение температурных градиентов в пространстве зависит от площади, занятой морскими льдами. Чем больше эта площадь, тем выше температурный градиент вблизи ледовой кромки (Лебедев, Айзатуллин, Хайлов, 1974). С другой стороны, достаточно очевидно, что в Баренцевом море повышение температуры воды с удалением ото льдов должно происходить тем быстрее, чем интенсивнее адвективное поступление тепла. Следовательно, можно ожидать, что обострения

Полярной фронтальной зоны происходят в периоды увеличения индексов ЛТ.

Изменения стратификации водной толщи. Практически вся толща вод Баренцева моря относится к поверхностной структурной зоне океана. Поверхностные воды постоянно подвергаются воздействию различных внешних сил, определяющих их стратифицированность. Изменчивость термохалинных свойств воды по вертикали обуславливает основные закономерности структуры гидрофизических и гидрохимических полей и оказывает огромное влияние на протекание биологических процессов в морской среде (Степанов, 1983). Следовательно, при изучении многолетней изменчивости экосистемы Баренцева моря вертикальный градиент плотности воды на разрезе «Кольский меридиан» можно рассматривать в качестве важной «режимной» характеристики.

Устойчивость вод возрастает при интенсификации поступления тепла на акваторию Баренцева моря (см. табл. 1). В течение 1954-1982 гг. плотностная стратификация водных масс в южной части Баренцева моря была ослабленной, в 1983-1993 гг. – усиленной. Указанные временные промежутки в целом соответствуют периодам похолодания и потепления в Баренцевом море и приатлантической Арктике (Дементьев, Зубакин, Потанин, 1985; Иванов, Кораблев, 2000 и др.). После 1993 г. определённых тенденций в изменениях стратификации не наблюдалось.

Изменения горизонтальных градиентов температуры вдоль атлантического потока. Из-за отсутствия длительных рядов наблюдений за температурой воды в холодных водных массах, контактирующих с атлантическими, нельзя напрямую оценить многолетнюю изменчивость горизонтальных градиентов свойств воды в районе Полярной фронтальной зоны.

Однако даже в пределах атлантической водной массы горизонтальные градиенты температуры воды должны быть достаточно высоки. Это объясняется тем, что атлантические воды по мере распространения с запада

на восток испытывают значительную трансформацию вследствие теплообмена. В качестве показателя интенсивности их выхолаживания использовалась разность температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и восточней его, на разрезе № 37 (ст. 12-16, координаты $71^{\circ}00' - 71^{\circ}40'$ с.ш., $43^{\circ}15'$ в.д.). Обнаружено, что наиболее интенсивная трансформация атлантических вод происходит непосредственно после завершения периода экстремально суровых климатических условий, на начальной фазе увеличения температуры воздуха и воды и предшествует обострению суперпозиции «ледовитость-температура воды» (см. табл. 1). Это подтверждает предположение о том, что на начальном этапе усиления атлантического потока наблюдается обострение фронтальных зон.

Нарушения синхронности изменений плотности воды на различных глубинах. Хорошо известен феномен смещения фаз сезонных процессов при переходе из атмосферы в водную толщу и с удалением от поверхности океана (Степанов, 1983). Эффект «отставания» многолетних изменений плотности воды с глубиной ранее в литературе описан не был. Сложная структура графика, представленного на рис. 7, объясняется, по-видимому, несовершенством методики расчета индексов ФСП. Тем не менее, можно выделить периоды, когда такое отставание было значительным.

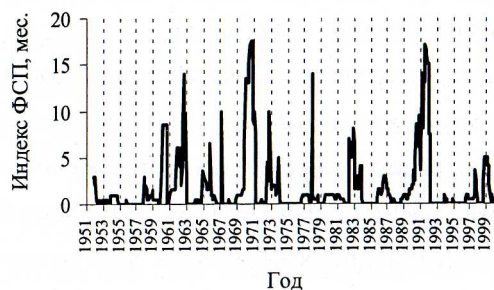


Рис. 7. Изменения индекса ФСП для слоя 150-200 м относительно слоя 50-150 м на разрезе «Кольский меридиан»

Увеличение запаздывания в передаче плотностных

изменений в глубину является «следствием» увеличения площади акватории Баренцева моря, находящейся под ледовым покровом и усиления

суперпозиции «ледовитость-температура воды» в Баренцевом море (см. табл. 1, рис. 6 и 7).

При формировании глубинных баренцевоморских водных масс северо-восточных районов моря значительную роль играют конвективные процессы, происходящие вблизи ледовой кромки и при льдообразовании. Гидрологические характеристики этих водных масс могут сохраняться неизменными достаточно длительное время (Цехоцкая, 1976; Гидрометеорология и гидрохимия..., 1990). В периоды, когда ледовитость Баренцева моря экстремально высока и при этом поток теплых атлантических вод из юго-западной его части начинает нарастать, интенсивность зимнего конвективного перемешивания увеличивается вследствие распространения границы ледовой кромки на юг и усиления теплоотдачи поверхностных слоев. После таких периодов глубинные водные массы могут достаточно длительное время сохранять характерную плотность, сформированную в предыдущие годы. Отставание изменения плотности воды в придонных слоях относительно вышележащих слоев, достигающее 20 мес, проявится после того, как в поверхностные слои будут интенсивно поступать «свежие» воды из Норвежского моря, т.е. на «пике» адвективного процесса.

Описанный выше эффект можно рассматривать в качестве еще одного признака «возмущающего» воздействия усиления адвекции вод атлантического генезиса на среду Баренцева моря. Значение индекса ФСП является показателем различия между «старыми» шельфовыми и «свежими» океаническими водами в этом водоёме.

Изменения насыщения кислородом придонных слоев. Снижение насыщения кислородом придонных слоёв связано с увеличением устойчивости водной толщи (см. табл. 1). Подобная связь хорошо известна и проявляется в различных водных объектах (Зенин, Белоусова, 1988; Сметанин, 1959 и др.).

Однако большая часть изменчивости аэрации водной толщи обуславливается, по-видимому, горизонтальным водообменом. Минимальная аэрация обычно фиксируется в периоды перехода от «арктических» условий к «бореальным», при обострении Полярной фронтальной зоны и интенсивном формировании плотных придонных вод (см. табл. 1).

Влияние горизонтального водообмена на кислородный режим водоемов также общеизвестно, однако не столь однозначно и зависит от горизонтального распределения аэрации вод. В Баренцевом море аэрация «застойных» придонных вод Центрального жёлоба минимальна, наиболее хорошо насыщены кислородом «свежие» атлантические воды в его западной части (Титов, Несветова, 2003). Выше было показано, что на начальной фазе усиления адвекции атлантических вод их поток распространяется преимущественно в поверхностных слоях, а влияние плотных баренцевоморских вод сказывается в придонных слоях. Следовательно, механизм воздействия внешнего водообмена на аэрацию придонных слоев Баренцева моря может состоять в компенсационном противотоке или расширении области влияния придонных вод при усилении потока в поверхностных слоях. Хотя прямых сведений о существовании такого механизма нет, ряд косвенных данных подтверждают такую возможность. Такое явление существует в некоторых морских водоёмах (Чернявский, 1987).

Снижение относительной аэрации придонных слоев может быть результатом отставания насыщения воды кислородом до 100%-ного уровня при быстром ее охлаждении и погружении из поверхностных слоев (гистерезис насыщения) в результате зимне-осенней конвекции (Адров, 1968) или отставания обменных процессов от растворимости кислорода в воде при быстром охлаждении морской среды (Сапожников, 1987). Такие процессы должны протекать более интенсивно при сочетании «арктических» и «бореальных» условий на шельфе Баренцева моря.

Хорошо известно, что снижение содержания кислорода в придонных слоях водоемов часто является следствием интенсивных вегетационных процессов в фотическом слое. Сезонный минимум кислородонасыщения в Баренцевом море чаще всего связывают с биохимическим потреблением кислорода при минерализации органики. Влияние биологических факторов на многолетние изменения содержания кислорода более подробно будет обсуждаться в следующей главе.

Учитывая приведённые факты, можно констатировать, что периодическое снижение аэрации придонных слоев - ещё одно своеобразное «возмущение» в АГК-системе на фазе усиления адвекции атлантических вод на шельф Баренцева моря.

Изменения содержания минерального фосфора в Баренцевом, Норвежском морях и Северо-Восточной Атлантике. Результаты кросс-корреляционного анализа связей межгодовых изменений концентраций минерального фосфора на разрезе «Кольский меридиан» с изменениями параметров, характеризующих АГК-систему Баренцева моря, показали, что лишь некоторые из них имеют значимые статистические связи с изменением фосфатов.

Обратная связь содержания фосфатов с соленостью воды достоверна ($|r| \sim 0.5$) в широком диапазоне положительных и отрицательных лагов. Присутствует обратная связь содержания фосфатов с уровнем моря, температурой воды и некоторыми другими параметрами, однако коэффициенты корреляции невысоки ($|r| < 0.35$) и связи достоверны на значительных, трудно интерпретируемых, временных лагах.

Содержание фосфатов в поверхностной структурной зоне океана, помимо биологических процессов, определяется прежде всего их перераспределением по вертикали. Вспомним, что в Баренцевом море с середины 50-х до начала 80-х годов стратификация была в целом ослабленной по сравнению с нормой. Такая же тенденция наблюдалась и в смежных с Баренцевым морем глубоководных районах (Иванов, Кораблев,

2000). Это могло быть причиной прогрессивного (кумулятивного) накопления минерального фосфора в поверхностных слоях СВА, Норвежского и Баренцева морей.

Локальная «зона аккумуляции» биогенных веществ в пределах баренцевоморского шельфа – глубинные воды Центрального желоба (Бруевич, 1948; Гидрохимический атлас..., 2003). Следовательно, уменьшение влияния «свежих» атлантических вод и расширение ареала распространения богатых фосфатами «застойных» баренцевоморских и арктических вод при похолодании 60-80-х годов могли стать «местными» причинами увеличения содержания фосфатов как в придонном слое, так и в толще вод Баренцева моря в целом. Обратная связь температурных условий и содержания фосфатов в Баренцевом (Лаппалайнен, 1960; Несветова, 1987), Норвежском (Злобин, 1973; Пивоваров, 1990), Балтийском (Антонов, 1986), Северном (Кушинг, 1979), Охотском (Мороз, Матвеев, 2001) морях показывалась на примере отдельных лет или коротких временных рядов. Тем не менее синхронная связь изменений содержания фосфатов с температурой воды и другими климатическими характеристиками невысока, что ставит под сомнение «строгую» зависимость величин фосфатной нагрузки от климатических условий в Баренцевом море.

Пространственная связь изменений солёности воды и содержания в ней фосфатов наиболее явно прослеживается в западной части Атлантического океана в районах, находящихся под влиянием крупных рек. Пространственная сопряженность понижения солёности и увеличения концентраций минерального фосфора проявляется не только вблизи побережья, но и на обширной акватории Атлантического океана в соответствии с системой течений (Conkright, Gregg, Levitus, 2000). Синхронные обратные колебания солёности и минерального фосфора в Баренцевом море, по-видимому, могут быть связаны с изменением режимов рингообразования в системе Гольфстрима (Фомичев, 1999). Следовательно, одной из возможных причин увеличения концентраций фосфатов в СВА в

70-80-х годах может быть «трансатлантический» перенос обогащенных минеральным фосфором вод во время «Великих солёностных аномалий».

Отметим также, что долгопериодная вариабельность содержания фосфатов не может не быть связана с изменениями в биоте Баренцева моря. В морских экосистемах в сезонном и пространственном аспекте существует достаточно четкая зависимость между интенсивностью биопродукционных процессов и содержанием минерального фосфора в поверхностных слоях (Raymont, Burton, Dyer, 1980; Conkright, Gregg, Levitus, 2000). Следовательно, можно ожидать аналогичных эффектов и в многолетнем аспекте. Этот вопрос также будет рассмотрен в следующей главе.

Изучим возможность влияния антропогенного фактора, который оказывает решающее воздействие на изменение содержания минерального фосфора в некоторых районах СВА. Увеличение поступления биогенных и загрязняющих веществ в 60-80-е годы в результате хозяйственной деятельности, по мнению ряда специалистов, считается одной из возможных причин негативных изменений в биоте морей Северной Европы (Бобров, 1990; Larsson, Elmgren, Wulff, 1985; Schulz, Kaiser, 1986; Hansson, Rudstam, 1990). Этот поток достиг максимума к середине 80-х годов XX века (Одум, 1986; Эволюция круговорота фосфора..., 1988). С этого времени начались разработка и создание многочисленных схем замкнутых технологий в различных областях хозяйства, что в некоторых регионах привело к значительному сокращению поступления фосфора в водоемы и морские акватории (Progress report..., 1995; Patterns and trends..., 1998).

Квасисинхронные многолетние изменения содержания фосфатов наблюдались на обширном участке Мирового океана (см. рис. 4), который, по-видимому, превышает пределы зоны возможного влияния биогенного загрязнения из прибрежных районов Северной Европы. Следовательно, нельзя отрицать возможность влияния потоков фосфора антропогенного происхождения на изменение его концентраций в Баренцевом море, хотя масштабы такого влияния в настоящее время не определены.

Иерархическая структура многолетних изменений системы «атмосфера-гидросфера-криосфера» Баренцева моря. Построен «интегральный» график многолетних изменений АГК-системы Баренцева моря. Наиболее значительные «возмущения» в среде, связанные с резким усилением адвекции атлантических вод на шельф Баренцева моря, происходили в 60-х годах с максимумом в 1962-1963 и 1968-70 гг., в начале 80-х годов, 1989-1991 гг. и после 1999 г. Во все эти периоды наблюдалось значительное снижение аэрации придонных слоёв Баренцева моря.

Показано, что временная изменчивость качественно новых параметров, характеризующих «возмущенное» состояние АГК-системы (насыщение кислородом, индексы ЛТ, ФСП) имеет характер «пульсаций». Абсолютные величины эксцесса и асимметрии распределения этих параметров значительно выше, чем у распределения температуры воздуха, воды, ледовитости и т.п. По этому признаку межгодовая изменчивость «переходных» процессов более близка к вариабельности процессов, происходящих в живой природе, зачастую также имеющих характер временных «пульсаций» (Бигон, Харпер, Таунсенд, 1989).

ГЛАВА 6. Многолетние изменения экосистемы Баренцева моря

Циклические экологические сукцессии в Баренцевом море. По одному из определений (Одум, 1986), «процесс развития экосистемы, или экологическая сукцессия, заключается в изменении во времени видовой структуры и биоценологических процессов». Термин «сезонная сукцессия» часто употребляется при описании годовых циклов развития планктонных сообществ в различных водоемах (Одум, 1986), в том числе в Баренцевом море (Теоретические подходы..., 1992; Эволюция экосистем..., 1994). Известно, что сукцессии в водных экосистемах по временным масштабам могут превосходить рамки сезонных изменений (Одум, 1986; Balon, 1974; Константинов, 1972; Виноградов, Гительзон, Сорокин, 1971). Существуют данные о том, что многолетние изменения в ихтиофауне Северного (Cushing,

1980), Каспийского (Еловенко, 1997) морей, зоны течений Куроисио-Оясио (Кузнецов, 1989, 1998) являются проявлением экологической сукцессии.

На рис. 8 показана межгодовая изменчивость отнесенной на год нереста численности поколений трески в возрасте 3 лет. В табл. 2 приведены наиболее значимые связи изменений урожайности трески с изменениями параметров среды. Увеличение численности поколений трески происходит при изменениях АГК-системы, характерных для фазы максимальной интенсивности поступления атлантических вод на шельф Баренцева моря. В целом это не противоречит сведениям из многочисленных литературных источников (Ижевский, 1961, 1964; Сетерсдал, Лоенг, 1984; Треска Баренцева моря, 1996).

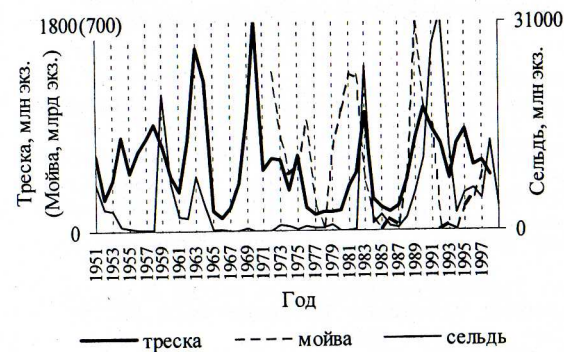


Рис. 8. Изменения численности трески в возрасте 3 лет, сельди в возрасте 3 лет, мойвы в возрасте 1 года, отнесенные на год нереста (Anon, 2000)

Влияние факторов среды, являющихся индикаторами «бореальных» условий, на урожайность поколений сельди (см. рис. 8) так же велико, как и на урожайность поколений трески. Значительно ниже связь урожайности сельди с ледовыми условиями как фактором, специфически значимым для экосистемы Баренцева, но не Норвежского моря, которое является районом обитания половозрелой части популяции атлантическо-скандинавской сельди.

Условия среды, при которых появляются богатые поколения мойвы (см. рис. 8), в основном противоположны тем, которые благоприятствуют выживаемости трески и особенно сельди. Оптимальные условия в первые 3-7 мес жизни нового поколения мойвы создаются на начальных фазах

усиления адвекции атлантических вод. Об этом свидетельствует тесная прямая связь урожайности поколений мойвы с индексом ЛТ и скоростью увеличения ледовитости моря, обратная синхронная связь с аэрацией придонных слоёв. Таким образом, большинство факторов, оказывающих положительное влияние на развитие мойвы в первый год её жизни, имеют локальный, специфический для Баренцева моря генезис.

Таблица 2. Связи численности поколений трески с абиотическими параметрами

Параметр*	Численности трески в возрасте 3 лет			*сокращённые названия; **в месяцах от апреля, относящегося к году нереста; ***изменение аномальной ледовитости в течение 27 мес.; ****изменение аномальной насыщенности кислородом в течение 31 мес.
	г	n	lag**	
Уменьшение ледовитости***	-0,73	43	7	
Индекс ЛТ	0,68	42	-13	
Увеличение насыщения кислородом****	0,62	37	9	
Индекс ФСП 50-150/150-200 м	0,61	44	7	
Концентрация фосфатов	-0,53	37	11	
Насыщение кислородом	-0,52	40	-11	
Насыщение кислородом	0,49	40	29	
Температура воды	0,45	45	12	

Рассмотрим периодические изменения интенсивности поступления атлантических вод на шельф Баренцева моря в качестве внешнего (аллогенного) фактора, определяющего функционирование экосистемы в многолетнем аспекте.

Мойва является арктобореальным видом (Расс, 1990). На ранних стадиях развития она входит в состав «весеннего» планктонного сообщества в южной части Баренцева моря, а в зрелом возрасте преимущественно потребляет продукцию такого сообщества, совершая нагульные миграции вслед за продвижением на северо-восток (вслед за кромкой льда) «весенних» биологических процессов (Рекомендации по рациональной..., 1991; Иктиофауна и условия..., 1986), Интенсивная «вспышка» цветения вблизи ледовой кромки должна наблюдаться при одновременном сосуществовании

«арктических» (высокая ледовитость) и «бореальных» (усиление адвекции тепла) условий и в Баренцевом море, так как зона контакта ледовой кромки, атлантических вод и теплых воздушных масс в эти периоды должна быть максимальной по площади. В прикромочной зоне основная доля весенней первичной продукции не переходит на более высокие пелагические трофические уровни, а оседает на дно (Rey, Skjoldal, Slagstad, 1987; Spring Phytoplankton..., 1987). Снижение аэрации придонных слоев в переходный от «арктических» к «бореальным» условиям период является следствием «перепроизводства» и седиментации большого количества органического вещества. Следовательно, на начальных фазах усиления адвекции атлантических вод происходит увеличение первичной продукции на ранних стадиях сезонной сукцессии в районах распространения арктобореальных видов.

Активный вынос личинок и мальков трески и сельди на акваторию Баренцева моря происходит в июне-августе (Треска Баренцева моря, 1996), т.е. эти северобореальные виды (Расс, 1990) в период раннего онтогенеза на баренцевоморском шельфе входят в состав более зрелого планктонного сообщества. В целом ареал распространения трески старших возрастных групп находится юго-западной ареала распространения мойвы, а половозрелая сельдь обитает в северной части Норвежского моря (Треска Баренцева моря, 1996; Иктиофауна и условия..., 1986). В южной части Баренцева моря контактирующие между собой трансформированные и «свежие» атлантические воды могут различаться по «возрасту» более чем на год. В районах взаимодействия таких водных масс формируется своеобразная контактная зона между сообществами, находящимися на различных стадиях развития. Летом и осенью (начиная примерно с июля) в юго-западной части Баренцева моря за счёт горизонтального и вертикального транспорта биогенов постоянными течениями может создаваться до 50 % «новой» первичной продукции, потребляемой на последующих трофических уровнях (Титов, 1995). Таким образом, при

интенсивной адвекции атлантических вод относительно большая доля первичной продукции приходится на летне-осенний период, большее значение в планктоне приобретают виды, приносимые с юга, складываются более благоприятные условия для выживаемости и развития северобореальных видов (треска и сельдь), обитающих в юго-восточной части Баренцева и Норвежском морях.

Обобщая сказанное выше, можно сделать вывод о том, что в экосистеме Баренцева моря существуют циклическая смена последовательных «вспышек» численности видов в ихтиопланктоне и циклическая «сукцессия» молодежи различных видов рыб. Условно говоря, в пределах каждого многолетнего периода перехода от «арктических» условий к «бореальным» условиям экосистема претерпевает переход от «молодости» к «зрелости», т.е. происходит циклическая экологическая сукцессия. При этом в соответствии с закономерностями экологической сукцессии (Одум, 1986) появление урожайных поколений мойвы (короткоциклический вид, г-стратег) предшествует появлению урожайных поколений трески и сельди (более долгоживущие виды, К-стратегии).

Признаки изменения трофического статуса Баренцева моря.

Одним из хорошо изученных аспектов динамики водных экосистем является эвтрофикация – процесс естественного или искусственного увеличения трофности водоема. Основной причиной эвтрофикации является обогащение воды биогенными элементами (Minder, 1938), прежде всего фосфором (Lund, 1972). Изменение трофического статуса водоемов, имеющее антропогенный или природный генезис, по сути, является аллогенной экологической сукцессией, контролируемой доступностью питательных веществ (Одум, 1986).

Характерные признаки изменения водных экосистем в результате эвтрофикации наблюдаются в прибрежных районах, внутренних и окраинных морях, таких как Балтийское и Японское (The effect of nutrient..., 1977; Временная изменчивость гидрохимических..., 2002). Вопрос о

необходимости гидрохимического и гидробиологического контроля ранних эффектов эвтрофирования прибрежных районов морей был поставлен еще в 70-х годах.

Эффект эвтрофикации водоемов может быть различным в зависимости от динамики поступления в водную экосистему различных форм соединений азота, фосфора и кремния, а также от их соотношения. Однако считается, что в глобальных масштабах одним из основных регулирующих фотосинтез факторов является напряженный режим фосфора в экосистеме (Шопф, 1980). Содержание в воде минеральных соединений фосфора контролирует долговременные изменения первичной продукции в океане в больших пространственных масштабах (Tugrell, 1999).

Многолетние структурные изменения в ихтиоценозе Баренцева моря, проявляющиеся в изменении общей биомассы тех или иных видов рыб, в первом приближении определяются «кумулятивным» эффектом изменения урожайности поколений рыб отдельных видов (рис. 9).

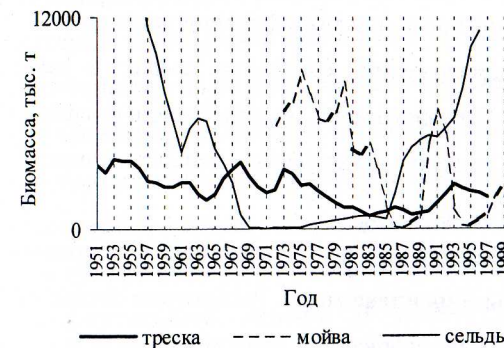


Рис. 9. Изменения биомассы трески, сельди, мойвы (Anon, 2000)

С 60-х по начало 80-х годов в Баренцевом море и сопредельных районах СВА наблюдалось увеличение содержания фосфатов в водной толще (см. рис. 2, 4). На этот временной отрезок приходится снижение общей биомассы популяции сельди и ее депрессивное состояние. Примерно в эти же сроки, но меньшими темпами происходило снижение биомассы трески. Данные по общей биомассе мойвы в Баренцевом море не позволяют с уверенностью судить о ее изменениях в течение всего исследуемого периода, однако в 70-90-х годах происходило уменьшение

биомассы популяции мойвы. Существует статистически значимая обратная связь изменений содержания фосфатов с уловами трески и сельди и прямая связь - с уловами мойвы.

Подтверждается обратная связь между содержанием минерального фосфора и биомассой мезозoopланктона в Баренцевом море летом, ранее обнаруженная Г.И.Несветовой и А.Н.Чепурновым (1988) на коротких рядах. В Баренцевом море в 70-80-е годы наблюдалось увеличение численности эвфаузиид и креветки (Пономаренко, Ярагина, 1990; Дробышева, 1994; Рост аркто-норвежской трески, 1996).

Приведённые выше факты, в общих чертах, соответствуют литературным данным о влиянии изменения биогенной нагрузки на планктонное сообщество, а также соотношение долгоживущих и короткоциклических видов в ихтиофауне водоёмов (Эвтрофирование мезотрофного..., 1980; Антропогенное эвтрофирование..., 1982; Изменение структуры..., 1982). Это свидетельствует о том, что отмечавшиеся в 70-80-е годы XX века изменения в экосистеме Баренцева моря имели схожий характер с изменениями, происходящими при эвтрофикации водоемов.

Для подтверждения предположений, сделанных выше, в работе показано, что изменения в биоте Северного моря при увеличении фосфорной нагрузки, в целом, соответствовало изменениям, наблюдавшимся в Баренцевом море.

Изменения продуктивности и «типового» режима функционирования экосистемы Баренцева моря. Рассмотрим экосистему Баренцева моря с позиций классификации морских экосистем по продуктивности и структуре трофических цепей (Heinrich, 1962; Ryther, 1969). На большей части моря (атлантические, прибрежные, баренцевоморские воды) среднеголетняя величина валовой первичной продукции, вычисленная по сезонной динамике фосфатов, оценивается в 82-174 гС/м² в год (Титов, 1995), по данным спутниковых и экспедиционных наблюдений за содержанием хлорофилла – в 36-180 гС/м² в год (рассчитано

по данным, приведённым в работе «Компоненты цикла углерода...», 2000). Сезонный процесс формирования первичной продукции в течение вегетационного периода более стабилен в районах распространения атлантических и прибрежных вод, величины первичной продукции могут снижаться в 5 раз от весны к осени в центральных и восточных районах (Компоненты цикла углерода..., 2000). В Баренцевом море содержание минерального фосфора в зимний период на глубинах более 100 м составляет 0,6-1,2 мМ (Гидрохимический Атлас..., 2003).

Мы не знаем, в каких пределах происходило изменение первичной продукции в исследуемый период, однако содержание фосфатов в 1959-2001 гг. на разрезе «Кольский меридиан» отклонялось от нормы на 0,2-0,3 мМ. Существенные изменения фонового содержания фосфатов происходили на всей акватории моря. Соответственно, как годовые величины первичной продукции, так и доминирующий в экосистеме Баренцева моря тип продукционного цикла и трофических взаимоотношений могли трансформироваться в достаточно широких пределах. В 60-е годы и после середины 80-х годов содержание фосфатов в Баренцевом море было пониженным, в ихтиофауне доминировали треска и сельдь, вероятно, относительно высока была биомасса мезозoopланктона (калянус). По этим признакам, согласно предложенной классификации (Ryther, 1969), в указанный период баренцевоморское сообщество относилось к мезотрофному типу, характерному для умеренных районов континентального шельфа. В 70-х - начале 80-х годов содержание минерального фосфора в Баренцевом море было повышенным, в планктонном сообществе возросла роль мезозoopланктона, по величине биомассы и значимости для промысла на первое место вышли короткоциклические планктофаги (мойва). Принимая во внимание эти факты, можно полагать, что в эти годы баренцевоморская экосистема была более близка к типу, характерному для антарктических морей и районов апвеллингов.

Тем не менее, не является очевидным тот факт, что изменение годовых величин первичной продукции для всей акватории Баренцева моря в исследованный период соответствовало величинам, характерным для указанных выше типов морских экосистем. Если проводить прямую аналогию между содержанием фосфатов и первичной продукцией, то окажется, что большее количество органического вещества должно было синтезироваться в 70-е-начале 80-х годов. С другой стороны, по многим причинам (продолжительный вегетационный период, большая акватория, свободная ото льда, адвективный транспорт питательных веществ) первичная продукция должна увеличиваться в периоды потепления климата (Несветова, Чепурнов, 1988; Бойцов, Несветова, 1993; Rey, Skjoldal, Slagstad, 1987).

Разрешение вопроса о многолетних изменениях первичной продукции в экосистеме Баренцева моря можно попытаться найти при использовании понятий, принятых в анализе сезонной динамики первичной продукции. Тогда, при рассмотрении динамики формирования первичной продукции не в сезонном, а в межгодовом временном масштабе окажется, что первичная продукция, создаваемая за счет «постоянного» фонда биогенных веществ в Баренцевом море, является полностью «регенеративной», так как постоянно рециркулирует в географически ограниченной области. В многолетнем аспекте время «оборачиваемости» фосфора составляет от одного года до нескольких лет, так как его депонирование и транспорт в биомассе осуществляются преимущественно короткоциклическими видами, мигрирующими в пределах акватории Баренцева моря, такими, как мойва. Таким образом, экосистема более «замкнута на себя».

В многолетнем аспекте действительно «новая» первичная продукция в масштабах экосистемы Баренцева моря создается только за счет транспорта биогенных веществ из-за пределов шельфа. Следовательно, основной прирост биомассы в экосистеме будет происходить только за счет продукции «адвективного» происхождения. Экологическая функция долгоживущих

видов, таких, как треска и сельдь, состоит в «разгрузке» баренцевоморской экосистемы от «дополнительных» ресурсов и биомассы, созданной на начальном этапе усиления адвекции. Депонирование больших количеств питательных веществ на многие годы в органических тканях рыб этих видов и его «экспорт» за пределы баренцевоморского шельфа в более южные районы (Норвежское море) во время их миграций – ответная реакция экосистемы на увеличение «адвективной» продукции.

Совершенствование методических подходов к прогнозированию пополнения популяций промысловых рыб Баренцева моря. Одной из важных практических и теоретических проблем, связанных с изучением естественных изменений морских экосистем, является прогнозирование величины пополнения популяций промысловых рыб. Мы применили некоторые полученные результаты для совершенствования методических подходов к прогнозированию численности поколений трески, сельди и мойвы, популяции которых являются важным объектом промышленного рыболовства. Отличительной особенностью методики является использование гидрохимических параметров, а также индексов, характеризующих «возмущённое» состояние окружающей среды. Поэтому предложенная методика описывает ту часть дисперсии многолетней изменчивости численности пополнения промысловых рыб, которая определяется условиями окружающей среды.

На рис. 10 приведены результаты прогнозирования численности поколений трески с использованием предикторов, представленных в табл. 2.

В настоящее время можно сделать оценку оправдываемости прогнозов, сделанных на независимом материале в период 1999-2001 гг. Прогноз считался оправдавшимся, если модуль разности между фактической и предсказанной величиной была меньше или равна допустимой погрешности, равной $0,8\sigma$ или σ в зависимости от заблаговременности прогноза. По результатам 3 лет проверки оправдались 6 из 6 прогнозов численности

поколений трески, 3 из 5 прогнозов численности поколений мойвы, 6 из 6 прогнозов численности поколений сельди.

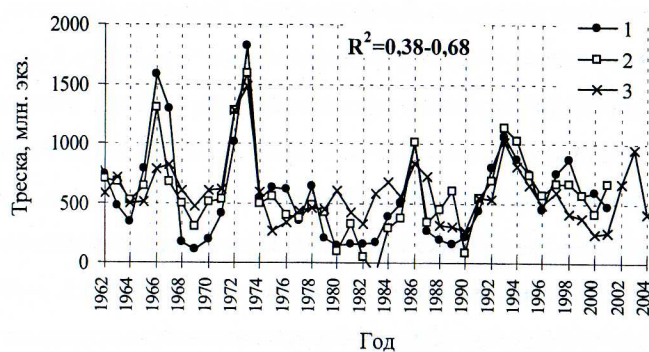


Рис. 10. Численность трески в возрасте 3 лет, рассчитанная методом ВПА (1, Анон., 2001); методом множественной регрессии с заблаговременностью 7 мес (2), 47 мес (3)

Эти результаты показывают принципиальную возможность использования параметров, которые изучались в нашей работе, в целях рыбопромыслового прогнозирования. Данные расчетов показывают, что условиями окружающей среды контролируется не менее 60% изменчивости численности пополнения популяций промысловых рыб, ранние этапы жизни которых проходят на баренцевоморском шельфе.

ГЛАВА 7. Гидрохимический режим и экосистема реликтового оз. Могильное

История исследований, физико-географическая и экологическая характеристика оз. Могильное. Этот уникальный водоём находится в юго-восточной оконечности о-ва Кильдин, расположенного в Баренцевом море вблизи побережья Кольского п-ова. В озере на протяжении длительного времени находятся во взаимодействии пресные (точнее, слабо солоноватые) и морские воды. Его специфический гидрологический режим сохраняется благодаря тому, что озеро отделено от Баренцева моря узкой перемычкой, через которую происходит фильтрация морских вод. Это создало условия для сосуществования и взаимодействия в озере пресноводных и морских

организмов, а также привело к появлению в нем форм жизни, характерных только для этого водоема (Реликтовое озеро..., 1975). Таким образом, здесь сформировалась уникальная замкнутая экосистема, по многим параметрам резко отличающаяся от других водных экосистем.

Озеро изучали Н.М.Книпович (1895) и К.М.Дерюгин (1925). Дважды проводилось его комплексное исследование (Реликтовое озеро..., 1975; Реликтовое озеро..., 2002). Озеро имеет статус государственного памятника природы.

Особенности гидрохимического режима и продукционно-деструкционных процессов в оз. Могильное. Вследствие резкого уменьшения внешнего водообмена и наличия в течение всего года «жесткой» стратификации вод в оз. Могильное сформировался анаэробный слой. Данные о содержании кислорода в оз. Могильное в 90-е годы в целом подтверждают тенденцию постепенного уменьшения толщины кислородной зоны в XX веке, отмеченную ранее (Реликтовое озеро..., 1975). Пересмотрены в сторону увеличения данные о содержании минерального фосфора в водной толще озера. Первичная продукция в аэробном слое, определенная кислородным методом и по данным гидрохимических наблюдений, как минимум в 1,5 раза превышает таковую в сопредельных с озером районах Баренцева моря. Данные о многолетней изменчивости содержания сероводорода в оз. Могильное на постоянных глубинах (табл. 3), подтверждает предположение о «вековой» эволюции оз. Могильное (Реликтовое озеро..., 1975).

Таблица 3. Изменение содержания сероводорода (мл/л, округление до целых) в анаэробной зоне оз. Могильное в XX веке*

Период Глубина, м	1901 г.	1921 г.	1966-1968 гг.	1998-1999 гг.
11	0	0	2	11-46
12	0	4	0-11	32-73
13	0	21	2-10	50-101
14	6	26	2-18	60-107

*Данные за периоды 1901, 1921, 1966-1968 гг. заимствованы из литературы (Дерюгин, 1925; Реликтовое озеро..., 1975).

Замкнутая экосистема реликтового озера Могильное как результат многолетних изменений «изолированного» участка экосистемы Баренцева моря. Солёность в глубинных слоях озера близка к величинам, характерным для Баренцева моря. Тем не менее, экосистема озера более термически изолирована от морской акватории, чем считалось ранее. Биомасса морского и пресноводного планктона в озере значительно выше, чем на близлежащих участках Баренцева моря, что согласуется с оценкой первичной продукции. Планктонное сообщество и ихтиофауна оз. Могильное чрезвычайно обеднены видами по сравнению с открытыми районами Баренцева моря. Размеры и продолжительность жизни кильдинской трески намного меньше, темпы созревания и роста существенно выше по сравнению с «родительской» популяцией (Реликтовое озеро..., 2002).

Обобщая результаты гидрохимических и других исследований, можно сделать вывод о том, что замкнутая экосистема реликтового оз. Могильное сохранила основные «родительские» признаки экосистемы Баренцева моря, но значительно видоизменила свои структурно-функциональные характеристики вследствие резкого уменьшения водообмена с открытыми районами моря, распреснения поверхностного слоя и эвтрофикации. Озеро, таким образом, можно рассматривать в качестве «модельного» водоёма, демонстрирующего «предельное» развитие тенденций, которые проявляются в экосистеме Баренцева моря при уменьшении внешнего водообмена, увеличении биогенной нагрузки, снижении аэрации придонных слоёв.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ подводятся итоги исследования, формулируются результаты и выводы, намечаются перспективы дальнейших исследований.

Сформулируем теоретическую схему функционирования экосистемы Баренцева моря в многолетнем аспекте.

Поступление тёплых атлантических вод на баренцевоморский шельф является «энергетической субсидией», переводящей экосистему Баренцева

моря в высокопродуктивное состояние. Однако высокая биопродуктивность экосистемы связана не столько с поступлением атлантических вод на акваторию Баренцева моря, сколько с квазициклическостью этого процесса, приводящей к периодическим «возмущениям» окружающей среды и «обновлениям» биологического сообщества. Результатом циклической экологической сукцессии являются многолетние изменения урожайности основных промысловых рыб Баренцева моря, не менее 60% изменчивости которой определяются абиотическими факторами.

В межгодовом временном масштабе начальный этап усиления адвекции атлантических вод можно рассматривать как этап перехода от «арктического» к «бореальному» состоянию системы «атмосфера-гидросфера-криосфера» (АГК-системы) Баренцева моря. Происходит активная трансформация атлантических вод в «застойные» глубинные воды, расширяется область влияния последних, обостряется климатический Полярный фронт. При формировании «застойных» явлений в Баренцевом море увеличивается продуктивность сообщества на ранних «весенних» стадиях сезонной сукцессии, преимущественно в северных и восточных районах моря, а также вблизи ледовой кромки. Происходит активная седиментация органического вещества. Вследствие перечисленных выше физических и биологических процессов происходит снижение аэрации придонных слоёв, наиболее заметное в «застойных» глубинных водах Центрального желоба. На этом этапе, как правило, формируются урожайные поколения арктобореального вида и г-стратега – мойвы.

При дальнейшем усилении поступления «свежих» атлантических вод в Баренцево море происходит вентиляция его водной толщи, аэрация придонных слоёв увеличивается. На этом этапе в районах взаимодействия атлантических и баренцевоморских вод формируется своеобразная контактная зона между сообществами, находящимися на различных стадиях развития, в юго-западной части моря в летний период увеличивается поступление питательных веществ за счёт их переноса атлантическим

потоком, увеличивается продукция сообщества на поздних стадиях сезонной сукцессии. Такие условия благоприятны для формирования урожайных поколений северобореальных видов и К-стратегов, таких, как треска и сельдь. Популяции этих относительно долгоживущих рыб, совершающих миграции за пределы баренцевоморского шельфа, адаптированы к потреблению «адвективной» продукции и осуществляют долговременное «депонирование» и экспорт «избыточных» для экосистемы ресурсов за пределы шельфа. В отличие от них, короткоциклические виды (мойва) осуществляют более быструю оборачиваемость ресурсов при их ослабленном поступлении в экосистему извне.

Интердекадные структурные изменения в экосистеме Баренцева моря, проявляющиеся в колебаниях общей биомассы и уловов рыб тех или иных видов, смене доминирующих видов в планктонном сообществе, обусловлены изменениями содержания минеральных питательных веществ, в частности, фосфора. Изменения содержания минерального фосфора происходят примерно в одинаковой степени на всей акватории Баренцева моря. С начала 60-х до начала 80-х годов XX века происходило увеличение запаса минерального фосфора, до начала 90-х годов содержание фосфатов снижалось, а затем стабилизировалось на уровне, близком к среднемуголетнему. Схожий характер многолетних изменений содержания минерального фосфора в деятельном слое наблюдался на акватории Северо-Восточной Атлантики и Норвежском море.

Исследования показали, что увеличение концентраций фосфатов в 70-х – начале 80-х годах может быть связано с уменьшением стратифицированности водной толщи и усилением вертикального перемешивания вследствие климатических изменений. Другая возможная причина – «трансатлантический» перенос обогащенных фосфатами водных масс по типу распространения «Великих соленостных аномалий». Достаточно вероятно влияния потоков фосфора антропогенного

происхождения, однако масштабы и относительный вклад такого воздействия в настоящее время определить сложно.

Долгопериодные изменения в планктонном сообществе и ихтиофауне существенно модифицируются различиями в продолжительности жизни гидробионтов, трофодинамическими взаимоотношениями, промысловым воздействием. Тем не менее, в соответствии с общими тенденциями, проявляющимися при эвтрофикации водоемов, увеличение концентраций фосфатов в Баренцевом море и сопредельных районах Атлантики по времени совпало со снижением биомассы и уловов относительно долгоживущих рыб (треска и сельдь) и увеличением этих показателей для короткоциклического планктофага – мойвы, характерными изменениями в планктонном сообществе. В-целом, в экосистеме Баренцева моря существует тенденция к «упрощению» структуры трофических цепей при росте запаса минеральных питательных веществ в среде.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ (в скобках указан объем работы в печатных листах, выполненный автором диссертации).

1. Содержание кислорода в водах Баренцева моря (справочный материал)/Сост. Несветова Г.И., Титов О.В. – Мурманск, ПИНРО. – 1992. – 149 с. (8.8)
2. Распределение кислорода и фосфатов на стандартных разрезах Баренцева моря (справочный материал)/Сост.: Несветова Г.И., Титов О.В. - Мурманск, 1993. -90 с. (6.1)
3. Содержание фосфатов в водах Баренцева моря (справочный материал)/ Сост. Несветова Г.И., Титов О.В. – Мурманск, ПИНРО. – 1993. – 78 с. (4.3)
4. Содержание кислорода и биогенных элементов в северо-восточной части Норвежского и юго-западной части Баренцева морей (справочный материал по результатам ихтиопланктонных съемок за период 1959-1993 гг.)/Сост.: Несветова Г.И., Титов О.В. -Мурманск, 1994. - 37 с. (1.8)
5. Первичная продуктивность Баренцева моря (справочный материал)/Сост. Титов О.В. - Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1994. - 73 с. (4.8)

6. Титов О.В. Трансформация фосфатов и первичная продукция в Баренцевом море // Материалы отчетной сессии ПИНРО по итогам НИР в 1993 г. - Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1994. – С.122-130. (0.8)
7. Характеристика океанографических условий и планктона в центральной широтной зоне Баренцева моря (справочный материал)/ Сост.: Терещенко В.В., Несветова Г.И., Нестерова В.Н., Титов О.В. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 1994. – 74 с. (0.2)
8. McMahon T., Raine R., Titov O., Boychuk S. Some oceanographic Features of Northeastern Atlantic Waters West of Ireland/ ICES Journal of Marine Science, 52. –1995 – p.221-232. (0.6)
9. Титов О.В. Сезонная динамика первичной продукции в водных массах Баренцева моря // Проблемы рыбохозяйственной науки в творчестве молодых: Сб. докл. конф.-конкурса молодых ученых и спец. ПИНРО. Мурманск, 1995. С. 156-168. (1.3)
10. Титов О.В. Трансформация фосфатов и первичная продукция в Баренцевом море. Автореф. дис. ... канд. географ. наук.- СПб, 1995.-19 с. (1.0)
11. Титов О.В. Трансформация фосфатов и первичная продукция в Баренцевом море: Дис.... канд. геогр. наук. – Мурманск, 1995. – 189 с. (12.6)
12. Титов О.В. “Новая” первичная продукция в Баренцевом море: сезонная динамика и условия формирования. // Тез. докл. Междунар. конференции BASIS. С-Петербург, сентябрь 1998 г.- М.: Изд-во ВНИРО. - 1997.- С.127. (0.1)
13. Титов О.В. Гидрохимические наблюдения ПИНРО в Баренцевом море: некоторые итоги 40-летних исследований. Материалы Международной конференция “Экспедиционные исследования Мирового океана и информационные океанографические ресурсы (ОИР-98)” г. Обнинск, 26-30 октября 1998 г. - Обнинск, 1998.- С.102-104. (0.2)
14. Titov O.V. Hydrochemical indication of the longterm variations in the Barents Sea ecosystem: periodical disturbances, their causes and impact// ICES CM. 1998 /V:3.-19 pp. (1.3)
15. Титов О.В. Гидрохимическая индикация многолетних изменений баренцевоморской экосистемы. // Тез. докл. Междунар. конференции “Морской перигляциал и оледенение баренцево-карского шельфа в

плейстоцене” г. Мурманск, 19-21 ноября 1998 г. - Апатиты, 1998.- С.102-104. (0.2)

16. Титов О.В. Многолетние циклические изменения трофического статуса баренцевоморской экосистемы и прогнозирование пополнения популяций промысловых рыб. // Тез. докл. 10 Всероссийской конференции по промысловой океанологии (14-18 сентября 1999 г., Калининград) .- М.: Изд-во ВНИРО, 1999.- С.95. (0.1)
17. Титов О.В. Исследование долгопериодной изменчивости плотностных характеристик в Баренцевом море. //Тез. докл. 9 регион. конф. “Комплексное изучение бассейна Атлантического океана” /Калининградский ун-т - Калининград, 1999. - с. 29-30. (0.1)
18. Титов О.В. Многолетние изменения гидрохимических характеристик на разрезе «Кольский меридиан» как показатель изменений в экосистеме Баренцева моря //Океанология.- 2001.- Т. 41, №4.- С.518-526. (0.6)
19. Titov O.V. Long-term cyclic succession of the Barents Sea ecosystem and prognostication of recruitment of commercial fish population // ICES CM 1999/O:01.- 17 pp. (1.1)
20. Titov O.V. The influence of water exchange in the Barents sea on the interannual variability of density characteristics. ICES CM 1999/L:07, 21 p. (1.4).
21. Titov O.V. Physical and chemical indicators of changes in the Barents sea ecosystem in the second half of the 20th century. Second International Symposium on Environmental Research in the Arctic and Fifth Ny-Alesund Scientific Seminar. Program and abstracts. 23-25 February 2000, NIPR, Tokyo, Japan, pp. 55-56. (0.2)
22. Титов О.В. Сравнительный анализ многолетних изменений в морских экосистемах Северо-Европейского бассейн // Вопросы рыболовства.-2000.- Т.1. №2-3, - С. 140-141. (0.2)
23. Титов О.В. Многолетние изменения содержания минерального фосфора в морях Северо-Восточной Атлантики. // Материалы отчетной сессии Ученого Совета ПИНРО по итогам 1998-99 гг.- Мурманск.:Изд-во ПИНРО. - 2000.- с. 131-142. (1.4)
24. Денисенко С.Г., Титов О.В. Распределение зообентоса и первичная продукция планктона в Баренцевом море.// Седиментологические процессы и эволюция морских экосистем в условиях морского перигляциала.: Сб.науч.тр. - Апатиты, 2001, Т.2.- С. 50-64. (0.5)

25. Титов О.В. Использование гидрохимической информации для прогнозирования численности пополнения популяций промысловых рыб Баренцева моря. //Тез. докл. 8-ой Всерос. конф. по проблемам рыбопромыслового прогнозирования. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2001. – 104-105 с. (0.1)

26. Interannual variability in the physical environment, zooplankton, capelin (*Mallotus villosus*) and North-East Arctic cod (*Gadus morhua*) in the Barents Sea. Symposium «Hydrobiological Variability in the ICES Area, 1990-1999» Edinburg, Scotland, 8-10 august 2001 Environment, plankton, capelin and cod in the Barents Sea in 1990's Programme and abstracts Ozhigin V.K., Drobysheva S.S., Karsakov A.L. Ushakov N.G., Yaragina N.A., Tereshchenko V.V., Titov O.V., Nesterova N.V. - P. 43. (-)

27. Гидрохимические и микробиологические особенности оз. Могильного/Сапожников В.В., Аржанова Н.В., Титов О.В., Торгунова Н.И., Русанов И.И.//Водные ресурсы. - 2001. - Т. 28, № 1. - С. 58-66. (0.3)

28. Titov O.V. If the natural eutrophication of the Barents sea is possible? ICES CM 2001/S:11- 19 p. (1.3)

29. Титов О.В. Анализ связи многолетних изменений аэрации придонных слоев Баренцева моря и урожайности поколений трески и мойвы// Вопросы рыболовства. Приложение 1. 2001.- С. 263-266. (0.3)

30. Титов О.В. Системный подход к анализу естественных многолетних изменений экосистемы Баренцева моря. - Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2001.- 119 с. (11.6)

31. Реликтовое озеро Могильное (исследования 1997-2000 гг.)/Коллектив авторов.-Мурманск:Изд-во ПИНРО, 2002.-164 стр. (3.6)

32. Титов О.В. Многолетние изменения содержания минеральных форм фосфора в Баренцевом, Норвежском морях и Северо-Восточной Атлантике// Океанология. - 2002.- Т.42, №6.- С. 848-854. (0.5)

33. Титов О.В., Несветова Г.И. Гидрохимический Атлас Баренцева моря. 2003 г. Пространственно-временная изменчивость содержания кислорода и минерального фосфора в Баренцевом море.-Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003. - 146 с. (9.5)