

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР  
ЛЕНИНГРАДСКИЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи  
УДК 551.464(268.46)

МАКСИМОВА Мира Петровна

ГИДРОХИМИЯ БЕЛОГО МОРЯ

II.00.08 - Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора географических наук

Москва, 1990

Работа выполнена во Всесоюзном научно-исследовательском институте морского рыбного хозяйства и океанографии (ВНИРО).

Официальные оппоненты:

доктор географических наук З.М.Гудкович (Ордена Ленина Арктический и Антарктический научно-исследовательский институт Госкомгидромета СССР);

доктор географических наук, профессор Ю.И.Ляжин (Ленинградский гидрометеорологический институт);

доктор химических наук, профессор А.Д.Семенов (Азовский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства).

Ведущая организация: Институт океанологии им. П.П.Ширшова АН СССР.

Защита  
15<sup>30</sup> час на  
при Ленинг  
высшего и

Адрес

С дн

Авто

Учен  
специализ  
доктор фи

1990 г. в  
03.19.01  
Министерства

ий пр., 98.

ЛГМИ.

Н.Карлин

- I -

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В настоящее время актуальна комплексная проблема рационального использования, охраны, прогнозирования, а в дальнейшем и управления природными ресурсами морей. Для решения проблемы необходимы серьезные теоретические познания о морях как сложных открытых динамичных системах, закономерностях их формирования, функционирования, изменчивости, под воздействием природных и антропогенных факторов. В соответствии с этой проблемой и насущными потребностями народного хозяйства Госкомитетом по науке и технике принят проект "Моря СССР" на XI (0,74.01.13.01) и XII (03.13) пятилетки и до 2000 года, отнесенный к категории особо важных, цель которого - "провести комплексные гидрометеорологические исследования морей СССР и шельфовой зоны для обеспечения освоения ресурсов и охраны морской среды. Дать характеристику современного состояния гидрометеорологического и гидрохимического режима морей СССР и оценку его изменения под влиянием естественных и антропогенных факторов". Проектом была поставлена генеральная задача обобщения на современном уровне сведений по гидрометеорологии и гидрохимии морей (эмпирических данных и теоретических исследований в области океанографии) как единых географических объектов для наиболее полного удовлетворения научных и практических, современных и перспективных потребностей народного хозяйства. Конечная цель проекта "Моря СССР" - создать свод современных эмпирических и теоретических данных в виде монографий по гидрометеорологии и гидрохимии морей, поставить и обосновать направления дальнейших исследований на морях.

К решению проблемы привлечены ряд министерств и ведомств. Главное ведомство проекта "Моря СССР" - Госкомгидромет СССР, при активном участии Минрыбхоза СССР; головной институт - Государственный океанографический институт. Параллельно ГКНТ был принят проект "Белое море" (0.74.01.12.07) - головной - Зоологический институт АН СССР. В рамках этих проектов, по плановой тематике Всесоюзного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии (тема 01.07), а также Государственного океанографического института, ответственным исполнителем которой является автор, выполнялась работа "Гидрохимия Белого моря".

В соответствии с целями и задачами проекта "Моря СССР" автором решена крупная научная проблема установления и обобщения закономерностей формирования структуры, функционирования и изменчивос-

№ 1 му

ти гидрохимической системы Белого моря, обусловленных комплексным взаимодействием природных и антропогенных факторов. Работа выполнялась с позиций системных исследований, в тесной связи и взаимообусловленности со смежными океанологическими дисциплинами - климатологией, геологией, геохимией, гидрологией, гидробиологией.

Особенно актуально в современный период интенсивного антропогенного воздействия исследование ранимых экосистем северных морей. Актуальность представленной работы определяется также и тем, что суровое Белое море в силу разнообразия природных условий может служить в качестве модели для труднодоступных малоизученных окраинных арктических морей.

Цель, основные задачи и методология исследований. Основная цель настоящей работы - решение крупной комплексной проблемы "Гидрохимия Белого моря", включающей формирование динамичной гидрохимической структуры моря, функционирование и изменчивость гидрохимической системы под воздействием природных и антропогенных факторов.

Методология решения проблемы определяется следующими основными теоретическими положениями:

1. Моря рассматриваются как сложные открытые динамичные био-гидро-геохимические системы, эволюционно сбалансированные в результате комплексного взаимодействия природных процессов на определенном квазистабильном уровне. Для их исследований необходим системный подход, определяющий диалектическое единство изучения всех подсистем моря в их взаимосвязи, причинно-следственной обусловленности, при необходимости выделении главных, контролирующих экосистему.

2. Функционирование экосистемы морей выражается, прежде всего, в процессах обмена веществом и энергией с окружающей средой (литосферой, атмосферой, гидросферой) и совокупностью организмов, их населяющих.

3. Антропогенное воздействие приводит к нарушению природной сбалансированности системы морей, к нарушению природных химических циклов и крупных экосистем, особенно замкнутых и полужамкнутых водоемов, являвшихся интеграторами всех антропогенных изменений на водосборном бассейне. Поэтому с геохимических позиций моря и реки следует рассматривать как единое целое, так как реки являются основными артериями транспортировки природных и антропогенных веществ.

Антропогенное воздействие выражается в основном в интенсифи-

кации потоков вещества.

4. Для биокосных систем, к которым В.И.Вернадский и А.И.Перельман относят океаны и моря, характерны биогенная миграция химических элементов, тесное взаимопроникновение живых организмов и неорганической ("косной") материи. В этих системах развиваются явления механической и физико-химической миграции, но определяющее значение имеет биогенная миграция. Фитомасса и биомасса бактерий в море относительно мала, но роль ее в биологическом круговороте огромна.

5. Биогеохимический цикл углерода и сопутствующих ему жизненно важных биогенных элементов ( $N$ ,  $P$  и др.) наиболее ярко выражает функционирование экосистемы моря, а также отражает ее нарушения, в том числе и антропогенные, поскольку углерод является самым технофильным элементом. Антропогенное воздействие на экосистемы морей проявляется, прежде всего, в разбалансированности процессов синтеза и разложения органической материи. В океане и морях наиболее тесно взаимосвязаны биогеохимические циклы  $C, O, H, N, P, Si$ .

6. Океан и моря - динамичная квазистационарная система, в которой приток вещества равен или почти равен оттоку. Инструментом количественного изучения функционирования экосистемы моря и миграционных процессов химических элементов служит расчет баланса органического вещества и биогенных элементов, включая обмен с окружающей средой и внутриводоемные процессы.

Цель, постановка проблемы и методологические предпосылки определяют конкретные задачи исследований:

1. Изучение гидрохимической структуры моря, являющейся одной из основных характеристик системы, с совокупностью составных частей, и выявление связей между ними, закономерностей и факторов, определяющих ее формирование и пространственно-временную изменчивость.

2. Установление факторов, контролирующих гидрохимическую систему арктического внутриматерикового Белого моря и специфику отдельных его районов, обусловленную природными различиями - морфометрическими, геологическими, гидрологическими, гидробиологическими (Воронка, Горло, Бассейн, Кандалакшский, Онежский, Двинский, Мезенский - заливы).

3. Комплексная многофакторная гидрохимическая типизация водных масс Белого моря.

4. Установление корреляционных связей гидрохимических, гидрологических, гидробиологических характеристик в водных массах различной генетической природы в их причинно-следственной обусловлен-

ности.

5. Изучение химического стока рек Белого моря и особенностей его формирования в зависимости от геолого-почвенных и гидрологических условий различных районов побережья - влияния гидрохимических особенностей речного стока на формирование гидрохимических полей опресняемых зон моря.

6. Расчет баланса химических элементов и их соединений в Белом море - растворенного кислорода, биогенных элементов (азота, фосфора, кремния), органического вещества. Количественная оценка роли различных факторов в формировании и функционировании гидрохимической системы моря.

7. Изучение и оценка химической основы биопродуктивности Белого моря - обеспеченности фитопланктона питательными солями, влияние элементов, лимитирующих продуктивность фитопланктона. Оценка роли фитопланктона в биотическом цикле углерода и жизненноважных отсутствующих элементов ( $N, P, Si$ ) в море.

8. Функциональное изучение гидрохимических подсистем - карбонатной, кислородной, биогенных элементов, органического вещества в их связи и взаимообусловленности как составляющих гидрохимической системы Белого моря.

9. Оценка антропогенного воздействия на природную гидрохимическую систему Белого моря.

Личный вклад автора и новизна полученных результатов в значительной степени определяются приоритетностью научных работ автора в области системных гидрохимических исследований Белого моря.

Впервые автором в 1955-1961 гг. выполнены системные гидрохимические исследования моря, включившие многофакторный комплекс (газовый, карбонатную систему, все основные формы биогенных элементов, органическое вещество), с охватом всей акватории моря, а также впадающих в него рек. Этот период для морей Советского Союза общеприято считать естественным, фоновым. Начало периода интенсивного антропогенного воздействия на экосреду внутриматериковых морей принято хронологически относить к середине 60-х годов. Системные гидрохимические исследования этого периода впервые выполнены также автором в 1982-1987 гг. Личный вклад автора в этих исследованиях включает: постановку проблемы, разработку методологии и задач исследований, организационно-экспедиционную деятельность, участие в аналитической, математико-статистической, графической обработке материалов. Автором лично выполнены: научный анализ, интерпретация и обобщение полученных материалов.

Кроме научного обобщения материалов целевых комплексных исследований, полученных под руководством и при непосредственном участии автора, автором произведен также научный анализ, интерпретация и обобщение материалов многолетнего ряда (1958-1983 гг.) традиционных гидрохимических наблюдений системы Гидрометеослужбы.

Основные научные результаты и новизна исследований. Все представленные основные научные результаты исследований отличаются новизной, получены лично автором.

Впервые для арктических морей на примере Белого моря изучена динамичная гидрохимическая система - структура, закономерности ее формирования, функционирования, изменчивости, обусловленные комплексным взаимодействием природных и антропогенных факторов, на основе системного подхода, определяющего диалектическое единство всех подсистем.

1. Идентифицированы: трехслойная гидрохимическая структура глубоководной части Белого моря (Бассейна и Кандалакшского залива), двухслойная - Двинского залива, практически гомогенные в гидрохимическом отношении перемешанные водные массы Воронки, Горла, Мезенского и Онежского заливов. Произведена многофакторная гидрохимическая типизация водных масс различной генетической природы и установлены в пределах водных масс корреляционные связи элементов системы.

2. Установлена пространственная структура и изменчивость полей гидрохимических характеристик на основе изучения статистических параметров и картирования среднесезонных данных (по сезонам и характерным для водных масс горизонтам, представляющим ядра водных масс), а также для аномальных по природным условиям лет. В работе представлено 66 гидрохимических карт. Пространственная неоднородность гидрохимических полей определяется в основном динамическими процессами и взаимодействием водных масс различной генетической природы, а также неравномерным распределением речного стока, сосредоточенного в Двинском, Мезенском, Онежском заливах. Установлена наиболее высокая дисперсия и вариабельность показателей, отражающих интенсивность биохимических процессов.

3. Исследована временная изменчивость гидрохимической системы Белого моря на основе рядов систематических сезонных наблюдений (1958-1983 гг.). Временная изменчивость гидрохимических показателей как межгодовая, так и сезонная, установлена для всех водных масс Белого моря, включая поверхностные, промежуточные и глубинные. Изучены как общие закономерности, так и специфические особенности меж-

годовой и сезонной изменчивости для различных гидрохимических подсистем, водных масс, районов моря и их обусловленность природными факторами. Определенная связь гидрохимических флуктуаций в Белом море имеется с ледовитостью, термическим режимом, стоком рек. Отмечено усложнение этих связей, по сравнению с другими северными морями, расположением Белого моря на границе двух климатических систем, находящихся в противофазовом взаимодействии.

4. Исследованы закономерности формирования и функционирования гидрохимической системы Белого моря и установлены контролирующие ее факторы. Формирование и функционирование гидрохимической системы арктического Белого моря, в первую очередь, определяются такими природными факторами, как суровость климатического режима, усугубляющаяся внутриматериковым положением и расчлененностью моря; мощный речной сток и интенсивный водообмен с Баренцевым морем; сильные горизонтальные течения, при слабом вертикальном движении вод и резкой их стратификации. Комплекс природных условий Белого моря определяет следующие основные закономерности формирования и функционирования гидрохимической системы: Прежде всего - высокую активность геохимических процессов и весьма слабую активность биохимических процессов, что и определяет относительно низкую биопродуктивность Белого моря, интенсивный массообмен с материком и смежным Баренцевым морем. Обильное поступление с материковым стоком терригенного органического вещества, стойкого к биохимическому окислению, при замедленной его минерализации, несмотря на низкую первичную продуктивность, обусловило повышенное содержание органического вещества в водах моря. Однако вследствие резкой стратификации вод и "концентрирования" органического вещества, приносимого реками в поверхностном слое, наряду с сосредоточением речного стока в восточной половине моря и сильными горизонтальными течениями, с выраженной круговой составляющей, направленной против часовой стрелки, происходит интенсивный вынос органического вещества в Баренцево море. Этим же обусловлен и низкий коэффициент фоссиллизации при замедленной минерализации ОВ. Преобладающее поступление биогенных элементов с речным стоком в органической форме, труднодоступной фитопланктону, при замедленной их регенерации и оборачиваемости в условиях низких температур и короткого вегетативного периода, также не способствует продуктивности фитопланктона.

5. Впервые произведенный автором расчет баланса вещества в Белом море позволил количественно оценить роль различных факторов в формировании гидрохимической системы моря, направленности мигра-

ционных процессов и их активности. Определяющую роль в формировании гидрохимической системы моря, как показали балансовые расчеты, играет массообмен с материком и смежным Баренцевым морем. С материка с речным стоком в Белое море поступает около 40 % годового прихода органического вещества и около 20 % биогенных элементов; около 80 % БЭ вносится из Баренцева моря с компенсационным течением при водообмене. Прочие составляющие приходной части баланса БЭ (из атмосферы, субмаринная разгрузка подземных вод, азотфиксация водорослями) имеют подчиненное значение. В балансе органического вещества Белого моря сопоставимы величины поступления аллохтонного ОВ терригенного генезиса (~40 %), автохтонного ОВ планктонного генезиса (~30 %) и ОВ, приносимого с компенсационным течением из Баренцева моря (~30 %). По отношению к Белому морю Баренцево выступает в роли "потребителя" - выносится от годового прихода около 80 % биогенных элементов и около 55 % органического вещества. Вследствие интенсивного выноса ОВ в Баренцево море в грунты откладывается лишь около 1 % годового прихода ОВ (коэффициент фоссиллизации 1,5 %). Энергетические потери за счет выноса в Баренцево море превышают эквивалентные потери массы вещества, так как в сточном течении преобладают более энергоемкие химические соединения сравнительно с компенсационным.

Направленность миграции газовых составляющих - растворенного кислорода и углекислоты определяется не только физическими процессами, но и тесно связана с биотическим циклом углерода и в значительной степени обусловлена степенью сбалансированности процессов фотосинтеза и деструкции органического вещества в море. В Белом море в годовом аспекте превалирование расхода кислорода в процессе деструкции над процессами фотосинтеза, обусловленное низкой первичной продуктивностью и обильным поступлением аллохтонного ОВ, обусловило и превалирование процессов инвазии кислорода из атмосферы. Круглогодичная эвазия углекислоты в атмосферу определяется круглогодичным превышением парциального давления углекислоты в поверхностных водах Белого моря над атмосферным, что обусловлено речным стоком с высоким содержанием углекислоты и выделением  $\text{CO}_2$  в процессе минерализации ОВ, не компенсируемым потреблением в процессе фотосинтеза.

6. Произведено функциональное изучение гидрохимических подсистем - карбонатной, кислородной, биогенных элементов, органического вещества в их связи и взаимообусловленности как составляющих гидрохимической системы Белого моря. Установлены основные специфици-

ческие закономерности организации этих подсистем, соотношение и взаимосвязи отдельных элементов в подсистемах, а также статистические характеристики комплекса их гидрохимических показателей.

7. Впервые произведены комплексные гидрохимические исследования губ Белого моря. Губы имеют большое значение в рыбохозяйственном отношении как места нереста, нагула и зимовки ценных промысловых рыб, а также для марикультуры. Установлены основные закономерности формирования гидрохимической системы разнотипных губ (от фьордовых до мелководных), являющихся самостоятельными экосистемами, отличными от прилегающих смежных морских акваторий. На губы приходится максимальное воздействие речного стока и антропогенной нагрузки. Типизация губ произведена на основе комплекса морфометрических, гидрологических, гидрохимических показателей. Гидрохимическая специфика опресняемых губ наиболее ярко проявляется в интенсификации массообмена, а также в высокой динамичности и пространственно-временной вариабельности. Системный подход в сравнительном аспекте позволил выявить ранговую роль различных факторов в формировании гидрохимических условий разнотипных губ, их биопродуктивности.

8. Установлено, что эффективность воздействия техногенеза имеет положительную связь с миграционной активностью элемента и увлажненностью зоны и отрицательную — с зарегулированностью стока водохранилищами и безвозвратным водозабором. Белое море в этом отношении в силу природных условий и характера антропогенного воздействия весьма уязвимо. Антропогенное воздействие на Белое море проявляется, прежде всего, в увеличении содержания органического вещества, особенно в поверхностных водах (порядка 50 %), что обусловлено профилированием промышленности этого региона (лесозаготовительной, деревообрабатывающей, целлюлозно-бумажной), поставляющей в основном стойкое ОВ лигнино-гумусового комплекса, трудноподдающегося бактериальному разложению, особенно в условиях арктического моря. Существенно возросло содержание в водах моря связанного азота, в основном за счет органического, а также отмечено увеличение концентрации минеральных соединений азота.

Практическая значимость. В работе решена крупная научная проблема — "Гидрохимия Белого моря" и ее изменения под влиянием природных и антропогенных факторов. Работа является научным вкладом в теорию гидрохимии и геохимии малоизученных арктических морей, моделью для которых может служить Белое море.

Работа предназначена для широкого использования специалистами

различного профиля в области океанологии — геохимиков, гидрологов, гидрохимиков, гидробиологов; для решения практических народнохозяйственных задач в области рационального использования природных ресурсов и охраны среды Белого моря, для целей мониторинга, прогнозирования и моделирования.

Методологические и методические разработки автора используются во ВНИРО и бассейновых институтах Минрыбхоза, а также в ряде других ведомств. Материалы исследований автора используются в тематических разработках Северного отделения Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии (СевПИИРО).

Внедрением работы является ее публикация в виде монографии по проекту ГКНТ "Моря СССР" Гидрометеопиздатом, а также в виде разделов монографии "Биология Белого моря" в издательстве "Наука". Результаты исследований автора использованы в вузовском учебнике О.А. Алекина и Ю.И. Ляхина "Химия океана". — Л.: Гидрометеопиздат, 1984; работы автора включены в список рекомендованной в учебнике литературы.

Апробация. Результаты исследований докладывались на: Всесоюзном совещании по первичной продукции (Минск, 1961); Сессиях Ученого совета Карельского филиала АН СССР "Теоретические основы рационального использования, воспроизводства и повышения рыбных и нерыбных ресурсов Белого моря и внутренних водоемов Карелии" (Петрозаводск, 1961, 1963, 1964); Научной конференции по проблемам внутренних вод Карелии и Прибалтики и их хозяйственного использования (Петрозаводск, 1962); XVII Всесоюзном гидрохимическом совещании (Новочеркасск, 1963); VI Всесоюзной конференции по химии моря (памяти С.В. Бруевича) (Москва, 1972); Всесоюзном симпозиуме по химическим основам биологической продуктивности Мирового океана и морей СССР (Москва, 1976); Первом Всесоюзном съезде океанологов (Москва, 1977); XXIII Всесоюзном гидрохимическом совещании "Вопросы методологии гидрохимических исследований в условиях антропогенного влияния" (Ростов-на-Дону, 1979); XI сессия по проблеме "Биологические ресурсы Белого моря и внутренних водоемов Европейского Севера" (Петрозаводск, 1981); I научном семинаре "Современные проблемы использования ресурсов и охраны морской среды" (Одесса, 1981); IV съезде Всесоюзного гидробиологического общества (Киев, 1981); I координационном совещании "Повышение продуктивности и рациональное использование биоресурсов Белого моря" (Ленинград, 1982); II Международном

симпозиуме "Геохимия природных вод" (Ростов-на-Дону, 1982); II Всесоюзном съезде океанологов (Ялта, 1982); XXVIII Всесоюзном гидрохимическом совещании "Изучение процессов формирования химического состава природных вод в условиях антропогенного воздействия" (Ростов-на-Дону, 1984); Всесоюзной конференции "Природная среда и проблемы изучения, освоения и охраны биологических ресурсов морей СССР и Мирового океана" (Ленинград, 1984); конференциях "Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря" (Архангельск, 1985; Кандалакша, 1987); III Всесоюзном съезде океанологов (Ленинград, 1987); V съезде Всесоюзного гидробиологического общества (Тольятти, 1987); Всесоюзных конференциях по морской биологии (Севастополь, 1988), по рациональному использованию биологических ресурсов окраинных и внутренних морей СССР (Пярну, 1989); заседании Географического общества СССР (Ленинград, 1987); Научно-техническом семинаре Арктического и Антарктического научно-исследовательского института Госкомгидромета (Ленинград, 1989); Ученом совете Гидрохимического института Госкомитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды (Ростов-на-Дону, 1989); Ученом совете Всесоюзного научно-исследовательского ин-та морского рыбного хозяйства и океанографии (Москва, 1989).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 52 научные работы. Подготовлена к печати и сдана в Гидрометеонадат монография по гидрохимии Белого моря; а также в издательство "Наука" (Ленинград) - разделы монографии ЗИН АССР "Биология Белого моря". Большая часть полученных результатов и публикаций принадлежит лично автору. Все соавторские статьи написаны лично диссертантом.

**Структура и содержание работы.** Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем работы 475 стр. машинописи, включающих 250 стр. текста, 46 таблиц, 97 рисунков, 55 стр. приложения и 82 наименований списка литературы.

Во введении сформулированы проблема, ее актуальность, цель и задачи работы, основные защищаемые положения.

## ГЛАВА I. ИЗУЧЕННОСТЬ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА БЕЛОГО МОРЯ. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В главе кратко рассмотрены гидрохимическая изученность и история гидрохимических исследований Белого моря, а также материалы, использованные для подготовки работы, методика гидрохимических исследований и обработки материалов.

Первые сведения по гидрохимии Белого моря относятся к периоду 20-30-х годов /Воронков, Мусина, 1939; Мусина, 1941; Трофимов, Голубчик, 1947; Бруевич, 1948 /. Экспедиционные исследования этих лет носили эпизодический характер, производились в отдельных районах моря и включали небольшое число элементов. С 1936 г. экспедиционные исследования были резко сокращены и возобновлены лишь в послевоенные годы. Первые косвенные показатели ОВ (по перманганатной окисляемости) получены в прибрежной зоне моря Е.Н.Черновской / 1956 /.

Впервые в истории исследований Белого моря в конце 50-х годов Беломорской Биологической станцией АН СССР на судне "Профессор Мясцев" выполнены комплексные экспедиционные исследования с охватом всей акватории и толщи вод Белого моря, включившие, кроме традиционных анализов, синхронные определения всех основных форм биогенных элементов и органический углерод /Максимова, 1959, 1960, 1961; Максимова, Дацко, 1959, 1960, 1961 /. В начале 60-х годов Карельским филиалом АН СССР произведены комплексные исследования химического стока (и условий его формирования) 48 рек, впадающих в Белое море, включая крупные, средние и малые реки /Максимова, 1961, 1962, 1963, 1964, 1967 /.

Систематические сезонные исследования гидрохимического режима всей акватории Белого моря, включавшие определения  $O_2$ , рН, АЭк и минеральные формы биогенных элементов, начаты с конца 50-х годов Северным управлением Гидрометеослужбы.

Первое обобщение материалов гидрохимических исследований Белого моря сделано С.В.Бруевичем в 1952 г. на основе экспедиций ГОИН-ВНИРО за период 1931-1933 гг.

Гидрохимия прибрежной зоны и многочисленных губ Белого моря практически не исследовалась, за исключением немногих данных по небольшому числу параметров губ Нюхча, Соронская /Добза, 1963 / и Чупа /Никуличева, 1966 /.

**Материалы и методика.** Работа выполнена на основе многофакторного системного анализа материалов целевых комплексных экспедиций, выполненных под руководством и при непосредственном участии автора (1956-1962 гг. и 1982-1987 гг.) и банка данных систематических сезонных наблюдений Госкомгидромета в период с 1958 по 1983 гг. Комплекс исследований включал газовый режим, карбонатную систему, биогенные элементы (минеральные и органические формы), органическое вещество, продукционно-деструкционные процессы ОВ, растительные пигменты (всего около 100 тыс. химических определений). Экспе-

диционные исследования производились по стандартной сетке станций, охватывавшей всю акваторию Белого моря. На океанографических станциях выполнялись гидрометеорологические, гидрологические, гидрохимические и гидробиологические наблюдения. Пробы воды на химический анализ отбирались на стандартных горизонтах. Стандартные анализы выполнялись общепринятыми в гидрохимической практике методами. Определения органического углерода производились методом фотохимического окисления с добавлением персульфата калия, на анализаторе органического углерода "PHOTO chem. E 8600 Sybzon". Определения хлорофилла выполнялись спектрофотометрическим методом.

Систематизация и обработка материалов. Особое внимание было обращено на обработку и анализ информационной базы гидрохимических данных. Предварительно произведена оценка репрезентативности информационной базы. Систематизация гидрохимических материалов производилась по семи районам моря, имеющим четко выраженную морфометрическую, геологическую, гидрологическую и гидрохимическую специфику: Воронка, Горло, Бассейн, Канда拉克ский, Онежский, Двинский, Мезенский - заливы. Временное осреднение сделано по сезонам. При обработке материалов широко использовались современные методы статистического анализа, с применением ЭВМ, включающие определение параметров распределения, корреляционный, регрессионный и факторный (метод главных компонент) - анализы. На основании многолетнего ряда среднегодовых характеристик гидрохимических показателей производился расчет многолетних трендов - тенденций изменчивости. Факторный анализ (метод главных компонент) использовался для установления факторов, определяющих изменчивость системы, объяснения закономерностей изучаемых взаимосвязей на основании обработки эмпирических данных. Регрессионный анализ применялся для нахождения эмпирических уравнений связи между отдельными характеристиками.

В работе широко использовались расчеты интегральных функций: фактор окружения среды, показатель удельной поверхности, коэффициенты водообмена, модули - водного, биогенного, органического стока, коэффициент фоссилизации; а также предложенные автором коэффициенты - обмена биогенными элементами моря с окружающей средой и коэффициенты обмена биогенными элементами фитопланктона со средой обитания. Комплекс интегральных функций, рассчитанных автором для Белого моря и других внутриматериковых морей Советского Союза, позволял на основе их сравнительного анализа количественно оценить геохимическую и биохимическую активность морей, в том числе и Белого моря.

## ГЛАВА II. ОБЩАЯ ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА БЕЛОГО МОРЯ

В главе освещается общая теория гидрохимии Белого моря; в ней рассматриваются:

- Климатические, зональные, геологические, гидрологические, гидробиологические факторы, формирующие гидрохимическую систему Белого моря.

- Особенности гидрохимического режима Белого моря в целом и отдельных районов, обусловленные выраженной морфометрической, геологической, гидрологической и гидрохимической спецификой (Воронка, Горло, Бассейн, Канда拉克ский, Онежский, Двинский, Мезенский - заливы). Этим районам свойственны специфические черты гидрохимической структуры и режима.

- Динамичная гидрохимическая структура моря, ее формирование и функционирование: закономерности и факторы, определяющие формирование структуры, пространственно-временную изменчивость, многолетнюю флуктуацию.

- Многофакторная гидрохимическая типизация водных масс Белого моря.

- Корреляционные связи гидрохимических, гидрологических, гидробиологических характеристик в водных массах различной галетической природы в их причинно-следственной обусловленности.

- Баланс вещества в море. Дается оценка химической сбалансированности моря как результат взаимодействия экзогенных и эндогенных (внутриводоемных) процессов.

Основными факторами, управляющими гидрохимической системой Белого моря, являются:

- Суровый климатический и гидрологический режим, усугубляемый внутриматериковым положением и расчлененностью моря, определяющий короткий вегетационный период и замедленный биотический круговорот вещества.

- Увлажненный климат гумидной зоны, с развитой гидрографической сетью и мощным речным стоком, отличающимся низкой минерализацией, но обогащенным органическим веществом терригенного генезиса, стойким к биохимическому окислению.

- Интенсивный водообмен с Баренцевым морем, при резкой стратификации вод, преобладания горизонтальной составляющей течений (с круговым движением против часовой стрелки) и слабовыраженным вертикальным движением, а также наличии порога в Горле, определяет направленный вынос поверхностных вод, обогащенных органическим веществом, в Баренцево море и, таким образом, - потери вещества и энергии,



превышающие поступление с компенсационным течением из Баренцева моря. Важнейшим фактором является адвекция трансформированных баренцевоморских вод в глубинную часть Белого моря, обеспечивающая их аэрацию.

- Резкая стратификация вод Белого моря и механизм погружения трансформированных баренцевоморских вод в Горле определили трехслойную гидрологическую и, соответственно, гидрохимическую структуру глубоководной части моря (Бассейна и Кандалакшского залива), сформированную водными массами разной генетической природы, различающимися по гидрохимическим характеристикам и системе связей между элементами. Гидрологический режим Двинского залива определяет его двухслойную гидрологическую и гидрохимическую структуру. Интенсивное ветровое и приливно-отливное перемешивание в мелководных районах (Онежский и Мезенский заливы, Воронка, Горло) определяет практически гомогенную по вертикали перемешанную водную массу с соответствующими однородными гидрохимическими свойствами. Вся водная толща сильно опресненных Онежского и Мезенского заливов подвергается воздействию речного стока, в отличие от стратифицированных вод глубоководных районов Бассейна и Кандалакшского залива, а также Двинского, где пресноводный сток в основном сосредоточен в тонком поверхностном слое.

Взаимодействие вышеперечисленных факторов определяет важнейшие черты формирования и функционирования гидрохимической системы Белого моря. Это, прежде всего, интенсивный массообмен с материком и смежным Баренцевым морем, при замедленной минерализации органического вещества и регенерации биогенных элементов, что обусловило, несмотря на низкую первичную продуктивность, повышенное содержание органического вещества в водах моря и преобладание органических форм биогенных элементов, труднодоступных фитопланктону, над минеральными, что наряду с низкой обрачиваемостью БЭ, может ограничивать продуктивность фитопланктона. Превалирование процессов деградации органического вещества над процессом фотосинтеза в годовом аспекте даже в поверхностном слое определяло инвазию кислорода из атмосферы; наряду с этим поступление большого количества углекислоты в поверхностный слой с речным стоком определило круглогодичную эвизию углекислоты в атмосферу.

Важнейшей чертой является аэрация глубинных вод Белого моря за счет адвекции трансформированных баренцевоморских вод, обогащенных кислородом в Горле при перемешивании, что обусловило высокие концентрации растворенного кислорода и наличие окислительных условий как в воде, так и в грунтах. Высокому содержанию и сохранению

хорошей насыщенности глубинных вод кислородом способствует ингибирование окислительных процессов низкими температурами. Таким образом, интенсивный массообмен Белого моря на границах сред характеризуется, главным образом, интенсивным выносом органического вещества в Баренцево море, компенсируемым поступлением ОВ с материковым стоком; круглогодичной эвизией углекислоты в атмосферу и преобладающей в годовом аспекте инвазией кислорода из атмосферы.

Специфика гидрохимии отдельных районов расчлененного Белого моря обусловлена морфометрическими, геологическими, гидрологическими особенностями этих районов - глубиной, речным стоком, динамикой вод, течениями, интенсивностью водообмена, гидрологической структурой. Для глубоководной стратифицированной части Белого моря (Бассейна и Кандалакшского залива), как показали эмпирические данные /Тимонов, 1947; Надежин, 1959; Залогин, Гнатовский, 1974; Пантюлин, 1974, 1989; Беклемишев и др., 1975, 1980 /, характерна трехслойная гидрологическая структура, включающая поверхностную водную массу, сформированную под сильным воздействием речного стока; и сформированные за счет адвективного распространения трансформированных в Горле баренцевоморских вод - промежуточную и глубинную водные массы, отличающиеся временем формирования и погружения. Обобщение 40-летнего ряда систематических сезонных наблюдений по всей акватории Белого моря С.И.Тухевым / 1990 / с применением, наряду с T, S -анализом, одного из методов многомерной классификации (гиперсферическая таксономия), также показало трехслойную гидрологическую структуру глубоководной части Белого моря. В поверхностном слое термохалинные поля формируются в результате горизонтальной и вертикальной адвекции тепла и солей, а также процессов вертикального турбулентного перемешивания, а в промежуточном и придонном слоях - в основном за счет горизонтального перераспределения масс воды баренцевоморского происхождения, трансформированных в Горле /Кравец, Полузанов, 1990 / . К.В.Беклемишев и др. / 1975, 1980 / установили в Белом море трехъярусную структуру биологических сообществ, соответствующую трем водным массам, выявленным гидрологами.

Автором произведена комплексная многофакторная типизация водных масс Белого моря и установлена трехслойная гидрохимическая структура глубоководной части моря, соответствующая трехслойной гидрологической структуре и ею обусловленная. Для водных масс различной генетической природы установлены определенные статистичес-

кие параметры гидрохимических показателей и определены их соотношения (как биогенных элементов, так и различных форм их соединений), а также определенные качественные характеристики органического вещества и особенности его деструкции — обусловленные условиями их формирования. Водным массам разного генезиса свойственны и определенные связи гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических показателей, отличающиеся по характеру, жесткости, причинно-следственной обусловленности. В индикационных таблицах водных масс представлены статистические параметры гидрохимических характеристик (средние и экстремальные значения, дисперсия, коэффициенты вариации). Ядра водных масс, отличаются большей стабильностью гидрохимических характеристик, в слоях, близких к пограничным, их варибельность увеличивается. В целом наибольшая дисперсия и варибельность гидрохимических показателей свойственна поверхностным водам, наименьшая — глубинным, относительно невысока она и для хорошо перемешанных вод мелководных районов. В работе представлено описание водных масс, условий и особенностей их формирования.

Мощный материковый сток, составляющий 4,5 % объема водной массы моря, распределен неравномерно (сосредоточен в Двинском, Мезенском, Онежском заливах) и при общей малой минерализации и высоком содержании терригенного гумуса весьма различается по химическому составу, в зависимости от условий формирования (геолого-почвенных и заболоченности водосбора). Средние и малые реки Фенно-Скандинавского кристаллического щита особенно слабоминерализованы (10–60 мг/л), но в зависимости от заболоченности водосборного бассейна содержат от 8 до 100 мг/л органического вещества. Интразональные крупные реки восточной части, водосборный бассейн которых сложен мощной толщей четвертичных отложений, имеют более высокую минерализацию (до 400 мг/л). Комплексная гидрохимическая классификация рек, впадающих в Белое море, показала, что доминирующим индикатором классификации рек региона, имеющим четко выраженную связь с основными гидрохимическими характеристиками ( $\text{OB}$ ,  $\text{E3}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{pH}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), является цветность, варьирующая в широких пределах (от  $25^0$  до  $800^0$  платиново-кобальтовой шкалы). Рассчитаны уравнения регрессии, позволяющие по цветности оценивать вышеперечисленные показатели. Воды речного стока значительно богаче морских органическим веществом, биогенными элементами,  $\text{CO}_2$  (до 15 мг/л, в среднем около 5 мг/л), и, соответственно, опресняемые зоны выделяются полями повышенных концентраций биогенных элементов (в основном в органической форме),  $\text{pCO}_2$ , но пониженными — щелочности,  $\text{pH}$ , растворенного

кислорода. Максимальное влияние речного стока на химизм морских вод наблюдается в весенний паводок (май–июнь), когда в море сбрасывается около половины годового водного и химического стока. Минимально влияние речного стока в меженьный период, особенно зимний.

Поверхностная водная масса формируется под сильным воздействием речного стока слабоминерализованных вод гумидной зоны, с высоким содержанием органического вещества и органических форм соединений биогенных элементов. Зоны, подверженные влиянию речного стока, выявляются полями пониженных величин  $\text{Aek}$ ,  $\text{pH}$ ,  $\text{O}_2$  и, наоборот, повышенными — органического вещества и биогенных элементов (в основном органических форм), особенно в паводковый период.

Промежуточные и глубинные воды глубоководной части моря, генетически связанные с адвекцией трансформированных в Горле баренцевоморских вод, имеют гидрохимические характеристики, обусловленные условиями формирования этих вод, то есть сходные с таковыми трансформированных поверхностных баренцевоморских вод в период их погружения в Горле. Глубинные воды формируются наиболее холодными и солеными, обладающими высокой плотностью водами холодного периода, на них наслаиваются относительно менее плотные воды, с относительно меньшей соленостью и более высокой температурой — промежуточные воды. Воды баренцевоморского генезиса — промежуточные и глубинные, соответственно, характеризуются более высокой соленостью и щелочностью и более низкой концентрацией органического вещества, хлорофилла, более высоким содержанием минеральных форм соединений биогенных элементов; наиболее выражены эти черты в глубинных водах.

В Двинском заливе установлена двухслойная гидрологическая и гидрохимическая структура, представленная тонким поверхностным слоем, опресняемым водами Северной Двины, и нижележащими водами, генетически связанными с водами Бассейна. Поля опресненных вод с соответствующими гидрохимическими характеристиками, выраженные в вершине залива, простираются вдоль Зимнего берега.

Онежский залив занят перемешанными, однородными по вертикали водами, генетически связанными с поверхностными водами Бассейна, опресняемыми стоком рек Онежского залива, и, соответственно, получившими свои гидрохимические характеристики в результате смешения этих вод.

Корреляционная связь гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик. Методом матричной корреляции установлено, что характер и степень жесткости корреляционных связей гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик

тик в Белом море определяются, прежде всего, генетической природой водных масс. Сила корреляционных связей между гидрологическими, гидрохимическими и гидробиологическими параметрами возрастает по мере возрастания генетической "зрелости" водных масс, от менее выраженной в поверхностной водной массе, с усилением - в промежуточной, и наиболее выражена в глубинной. В ПМ только 26 % рассматриваемых связей значимы (6 % из них достаточно сильные); в ПрМ - 42 % связей выражены значимыми коэффициентами корреляции (в 15 % - связь сильная); в ГМ - 46 % связей значимы (в 36 % - связь сильная). В поверхностной водной массе выраженная связь ряда факторов с соленостью определяется их генетической связью либо с проникающими в Белое море баренцевоморскими водами, либо с распространением и влиянием вод материкового стока. Корреляционный анализ показал, что в тонком поверхностном слое содержание ОВ определяется сопоставимыми факторами - материковым стоком и первичной продуктивностью (причем с ПМ связь более слабая), а первичная продуктивность, прежде всего, связана с фактором вертикальной устойчивости вод. Интенсивность бактериальной деструкции ОВ связана, в первую очередь, с первичной продуктивностью, а не с общей концентрацией органического вещества, поскольку наиболее легко биохимическому окислению подвергается ОВ планктонного генезиса, а не стойкое терригенное, которого много в составе ОВ поверхностных вод. В промежуточной водной массе - положительная связь содержания минеральных форм биогенных элементов с соленостью, отрицательная - с температурой; и наоборот, отрицательная - с соленостью и положительная - с температурой показателей, отражающих жизнедеятельность фитопланктона (хлорофилла, содержания ОВ, насыщенности  $O_2$ ), обусловлены тем, что верхний менее соленый и более теплый слой ПрМ генетически связан с поверхностными летними баренцевоморскими водами, а нижний слой ПрМ - с более солеными и холодными - весенними. В глубинной водной массе характер корреляционных связей свидетельствует о том, что пониженными - концентрацией органического вещества, содержанием и насыщенностью вод кислородом отличаются генетически наиболее "старые", соленые и холодные воды придонных горизонтов, в этих же водах наиболее замедлена бактериальная деструкция ОВ. Выраженная положительная связь концентрации ОВ с хлорофиллом, а также бактериальной деструкции ОВ с его концентрацией (отсутствующая в поверхностной М) свидетельствует о его планктонном генезисе.

Пространственная неоднородность полей гидрохимических характеристик, определяющаяся в основном динамическими процессами (в

первую очередь, сильно выраженными горизонтальными течениями и адвекцией) и взаимодействием водных масс разной генетической природы, в значительной степени подобна неоднородностям полей гидрологических характеристик и также подразделяется на: крупномасштабные устойчивые во времени и среднemasштабные неустойчивые во времени. Характеру изменчивости температуры воды и солености во многом подобна изменчивость различных гидрохимических показателей - содержания растворенного кислорода, связанного азота, фосфатов, кремниевой кислоты, общей щелочности, органического вещества. Получены устойчивые зависимости между полями климатических норм указанных элементов. Так, связь температуры воды и  $O_2$  для всех масштабов изменчивости отрицательная; связь температуры и pH - для крупных масштабов достаточно высокая с отрицательным знаком, подобный же характер связи отмечен для полей температуры и  $A_{2k}$ . Значимая корреляция выявлена между полями температуры воды и растворенной кремниевой кислоты. Взаимосвязь полей существенно меняется для различных элементов и районов моря.

Квазистабильные крупномасштабные циклонические и антициклонические круговороты оконтуриваются характерными изоплетами гидрохимических показателей в поверхностных водах: в циклонических зонах подъема вод - характеристиками, свойственными подповерхностным горизонтам, в зонах опускания вод - заглублиению характеристик, свойственных поверхностным водам.

Фронтальные и пограничные зоны вод различной генетической природы характеризуются высокими градиентами и повышенной вариабельностью элементов химической системы. Пониженная вариабельность гидрохимических показателей отличает ядра водных масс и перемешанные воды малководных районов. Наименьшая вариабельность химических элементов свойственна "генетически зрелой" глубинной водной массе.

Для Белого моря в целом максимальная вариабельность свойственна характеристикам, отражающим интенсивность биохимических процессов (первичная продуктивность, биохимическое потребление кислорода, растительные пигменты), обусловленных многофакторной зависимостью от экосреды; достаточно высокая вариабельность отмечена для минеральных форм соединений биогенных элементов, связанных с процессами жизнедеятельности фитопланктона и бактериальными процессами; более низкая - для растворенного органического вещества, отличающегося большей "кислотностью" по сравнению с входящим в состав живых организмов; низкая - для растворенного кислорода и общей щелочности; минимальная - для pH.

Временная изменчивость гидрохимической системы, характеризующаяся межгодовыми и внутригодовыми (сезонными) флуктуациями, установлена для всей толщи вод Белого моря, включая поверхностную, промежуточную и глубинную водные массы, а также для нестратифицированных вод мелководных районов. Амплитуда межгодовых флуктуаций превышает внутригодовую изменчивость. Многолетние межгодовые флуктуации гидрохимических характеристик определяются климатическими, влияющими как непосредственно на Белое море (термический режим, ледовитость, интенсивность динамики вод, внутриводоемные процессы), так и на гидрохимические характеристики исходных вод, формирующих водные массы Белого моря (баренцевоморские воды и воды материкового стока); а также на флуктуации объема речного стока и интенсивность водообмена с Баренцевым морем. Установлены специфические особенности межгодовой и сезонной динамики для различных элементов гидрохимической системы, водных масс и районов моря. Наименьшими флуктуациями отличаются элементы карбонатной системы, относительно невелики - растворенного кислорода. Значительна межгодовая и сезонная изменчивость характеристик, отражающих интенсивность биохимических процессов и биогенных элементов, на которые особенно сильно влияет сезонный и межгодовой ход климатических факторов. Определенная связь многолетних флуктуаций гидрохимических характеристик в Белом море имеется с ледовитостью, температурным режимом, водным стоком рек. Отсутствие жесткой связи гидрохимических флуктуаций с каким-либо отдельно взятым фактором обусловлено сложным взаимодействием комплекса климатических и гидрофизических процессов. Кроме того, режим Белого моря отличается меньшей устойчивостью и четкостью связей по сравнению с другими северными морями вследствие его расположения на границе двух климатических зон - Восточно-Атлантической и Европееко-Азиатской, находящихся в противофазном взаимодействии. Для Белого моря поэтому характерна противофазность межгодовых колебаний стока рек, формирующегося по режиму Европееко-Азиатской системы, относительно к термическому режиму моря, формирующегося по закономерностям Атлантической системы. Эта особенность усугубляется трехслойной структурой моря. Поверхностная водная масса формируется под влиянием атмосферных процессов, развивающихся по режиму Атлантической системы, и речного стока - формирующегося в условиях противофазной Европееко-Азиатской системы. Глубинные воды Белого моря генетически связаны с баренцевоморскими, формирующимися по режиму Атлантической системы.

В работе приведены графики сезонной и многолетней изменчивос-

ти гидрохимических характеристик по районам моря и их связи с гидрофизическими факторами и речным стоком.

Тренды показывают тенденцию многолетней изменчивости. Наиболее показательны тренды изменчивости растворенного кислорода за период 1958-1983 гг. Анализируемый 25-летний ряд полностью укладывается в 30-летний период однонаправленного хода климатических и гидрологических процессов, по всем рядам которых отмечена тенденция к похолоданию моря, увеличению ледовитости, уменьшения водообмена (происходящих на фоне общего векового потепления региона). Этот ход климатических и гидрологических процессов обусловил выявленную трендами тенденцию возрастания концентрации кислорода в поверхностных водах всех районов Белого моря, обусловленную увеличением растворимости кислорода и уменьшением его расхода на окислительные процессы. Менее выражена эта тенденция в придонных водах, вследствие снижения водообмена с Баренцевым морем. Наличие на фоне 30-летнего периода с выраженной тенденцией похолодания климатических колебаний с периодичностью 2-3, 4-5 и 12-15 лет обусловило варьирование кислородсодержания в объеме вод Белого моря в пределах от 43,2 до 48,5 млн. т.

Баланс. Моря - сложные открытые динамические системы, функционирование которых выражается, прежде всего, в процессах обмена веществом и энергией с окружающей средой и совокупностью организмов, их населяющих. Интегральными показателями функционирования экосистемы моря являются баланс вещества в море, включающий экзо- и эндоводоемные процессы (обмен на границе сред - литосферы, гидросферы, атмосферы; а также совокупной поверхности организмов, населяющих водоем, со средой обитания) и интегральные коэффициенты обмена смежных с стем и организмов со средой, характеризующие геохимическую и биохимическую активность морей. Автором для оценки геохимической и биохимической активности морей предложен и рассчитан комплекс интегральных коэффициентов, включающий общеизвестные (фактор окружения среды, показатель удельной поверхности, модули водного, солевого, биогенного, органического стока, коэффициент водообмена), а также предложенные автором - коэффициенты обмена биогенных элементов и органического вещества со смежными системами и коэффициенты обмена фитопланктона биогенными элементами со средой обитания. Особенно важен, как показатель функционирования экосистемы моря и антропогенного воздействия на нее, углеродный цикл и цикл сопутствующих жизненноважных элементов (азота, фосфора); а также связанный с ним баланс кислорода.

Автором впервые для Белого моря рассчитан баланс органического вещества и биогенных элементов ( $N, P, Si$ ), а также комплекс интегральных коэффициентов (геохимических, биохимических). На основе этих показателей сделана оценка химической сбалансированности моря, как результата взаимодействия экзо- и эндогенных процессов, направленности и интенсивности миграционных процессов, геохимической и биохимической активности моря. Определяющую роль в формировании и функционировании гидрохимической системы моря играет массообмен с материком и смежным Баренцевым морем ( $\alpha_w = 0,5$ ). С материка с речным стоком поступает около 40 % годового прихода органического вещества и около 20 % биогенных элементов (18 % связанного азота, 11 % фосфора, 22 % кремния). Азот и фосфор поступают с материка в основном в форме органических соединений (90 % -  $N$  и 40 % -  $P$ ). Основной составляющей приходной части баланса биогенных элементов является поступление из Баренцева моря при водообмене - около 80 % (81 % связанного азота, 89 % фосфора, 78 % кремния). Но валовой обмен биогенными элементами Белого моря с Баренцевым с водами стокового и компенсационного течений сопоставим; в Баренцево море выносятся также около 80 % годового прихода БЭ, однако в стоковом течении больше доля органических соединений БЭ. Прочие составляющие приходной части баланса биогенных элементов имеют подчиненное значение и в общей сумме годового прихода биогенных элементов составляют не более 1 % (субмаринная разгрузка подземных вод, поступление из атмосферы, азотфиксация водорослями). В Белое море в сумме по учтенным статьям баланса поступает за год около 1,28 млн. т связанного азота, 1,71 млн. т растворенного кремния, 0,075 млн. т фосфора, что по отношению к их содержанию в море достигает порядка 75 % связанного азота, 50 % фосфора, 65 % растворенного кремния.

В балансе органического вещества Белого моря сопоставимы величины поступления аллохтонного ОВ терригенного генезиса (около 40 %), автохтонного ОВ планктонного генезиса (30 %) и ОВ, приносимого с компенсационным течением из Баренцева моря (30 %). Общий годовой приход органического вещества составляет 6,58 млн. т в органическом углеводе и достигает около 40 % его содержания в море. По отношению к Белому морю Баренцево выступает в роли "потребителя" - выносятся со стоковым течением около 55 % годового прихода органического вещества (3,60 млн. т  $C_{орг}$ ). Причем энергетические потери за счет выноса в Баренцево море превышают эквивалентные потери массы вещества, так как в стоковом течении преобладают более энерго-

емкие химические соединения, сравнительно с компенсационным. В энергетическом выражении Белое море за счет выноса органического вещества в Баренцево теряет ежегодно около  $30 \cdot 10^{12}$  ккал, в том числе некомпенсируемые потери достигают  $13 \cdot 10^{12}$  ккал. Вследствие "концентрирования" аллохтонного и автохтонного органического вещества в тонком поверхностном слое, резкой стратификации вод и интенсивных горизонтальных течений, с доминирующим выносом в Баренцево море при водообмене, несмотря на замедленную минерализацию в условиях низких температур и большой доле стойкого к биохимическому окислению терригенного гумуса (минерализации подвергается около 44 % годового прихода ОВ, для сопоставления в Балтике - 85 %), в грунты откладывается лишь около 1 % годового прихода ОВ (коэффициент фоссилизации низок - 1,5 %). Промыслом изымается около 0,03 % от годового прихода органического вещества, но по отношению к годичной величине первичной продукции изъятие промыслом составит около 0,10 %.

Направленность миграции газовых составляющих - растворенного кислорода и углекислоты определяется не только физическими процессами, но тесно связана с биотическим циклом углерода и в значительной степени обусловлена степенью сбалансированности процессов фотосинтеза и деструкции органического вещества в море. В Белое море в годовом аспекте превалирование расхода кислорода в процессе деструкции ОВ над процессами фотосинтеза, обусловленное низкой первичной продуктивностью и обильным поступлением аллохтонного ОВ, обусловило и превалирование процессов инвазии кислорода из атмосферы. Ежегодно на окислительные процессы в Белом море расходуется порядка 7,8 млн. т растворенного кислорода (18 % от общего содержания в море), а в процессе фотосинтеза выделяется только около 4,7 млн. т (11 % от содержания в море). Круглогодичная инвазия углекислоты в атмосферу определяется круглогодичным превышением парциального давления углекислоты в поверхностных водах Белого моря над атмосферными, что обусловлено речным стоком с высоким содержанием углекислоты и выделением  $CO_2$  в процессе минерализации ОВ, не компенсируемое потреблением в процессе фотосинтеза.

Следует отметить своеобразную, очевидно, эволюционную, сбалансированность в Белом море общего содержания органического вещества и растворенного кислорода, которое эквивалентно расчетному количеству кислорода, потенциально потребному для полного окисления органического вещества, содержащегося в Белом море.

Анализ в сравнительном аспекте комплекса интегральных показателей характеризует Белое море как наиболее активное в геохимичес-

ком отношении среди других внутриматериковых морей. Об интенсивности геохимических процессов свидетельствуют высокие величины коэффициентов экспорта биогенных элементов с водосборного бассейна ( $K_{Э} - 400$ ,  $K_{ЭSi} - 650$ ,  $K_{ЭP} - 15$ ,  $K_{ЭFe} - 12$ ,  $K_{ЭC_{орг}} - 4000$  кг/км<sup>2</sup>/год) и удельного поступления БЭ в море (305 мг N/м<sup>3</sup>, 410 мг Si/м<sup>3</sup>, 18 мг P/м<sup>3</sup>); а также коэффициентов водообмена ( $\alpha_w - 0,54$ ) и обмена биогенными элементами с окружающей средой ( $\alpha_N - 0,77$ ,  $\alpha_{Si} - 0,66$ ,  $\alpha_P - 0,52$ ). В то же время Белое море, в сравнении с другими внутриматериковыми морями, отличается низкой биохимической активностью, о чем свидетельствуют низкие коэффициенты обмена биогенными элементами фитопланктона со средой обитания ( $\alpha_N - 0,20$ ,  $\alpha_P - 0,33$ ,  $\alpha_{Si} - 0,52$ ), низкий коэффициент оборачиваемости биогенных элементов и замедленный биотический круговорот углерода.

\* \* \*

В последующих III-VI главах рассматриваются гидрохимические подсистемы Белого моря - карбонатная, кислородная, биогенных элементов, органического вещества, в их функциональной связи, как составляющие единой гидрохимической системы моря. Установлены основные специфические закономерности организации этих подсистем, взаимосвязи отдельных элементов в подсистемах, связь с взаимодействующими подсистемами моря и системами; а также даны статистические характеристики гидрохимических показателей рассматриваемых подсистем и иллюстрирующие их карты и графики.

### ГЛАВА III. КИСЛОРОДНЫЙ РЕЖИМ И БАЛАНС КИСЛОРОДА В МОРЕ

Кислородный режим тесно взаимосвязан с другими системами моря, главным образом, посредством окислительно-восстановительных процессов, занимающих чрезвычайно важное место как в живой, так и неживой природе, и способствующими его перераспределению между системами. К важным факторам относятся физические и физико-химические процессы - перераспределение O<sub>2</sub> между слоями и водными массами за счет адвекции, конвекционного и турбулентного перемешивания, динамического подъема и опускания вод, приливно-отливных течений, диффузии; обмен кислородом между морем и атмосферой. Основным механизмом формирования кислородного режима глубоководной части вод Белого моря является адвекция баренцевоморских вод, предварительно аэрируемых при прохождении Горла в результате сильного перемешивания. Важными факторами формирования кислородного режима поверхностных вод и мелководных районов моря являются речной сток и биохимичес-

кие процессы, а также интенсивное перемешивание и обмен с атмосферой.

Корреляционный анализ показал, что характер связей растворенного кислорода с другими элементами системы (физическими, химическими, гидробиологическими) специфичен для разных водных масс Белого моря и определяется их генетической природой. В поверхностной ВМ установлена определяющая роль в концентрации кислорода физических факторов среды; и второстепенная - биохимических процессов; но насыщенность вод кислородом определяется биохимическими процессами - фотосинтезом. В водных массах, генетически связанных с трансформированными поверхностными водами Баренцева моря, и различающихся по времени (сезону) формирования и погружения их в Горле, характер корреляционных связей свидетельствует об относительно установленном кислородном балансе, сформировавшемся к моменту погружения. Более высокое содержание и насыщенность кислородом промежуточных вод обусловлена их формированием в период вегетации фитопланктона; а более низкие величины концентрации кислорода и его насыщенности в глубинных водах - их формированием в холодное время года.

Одной из основных особенностей кислородного режима хорошо аэрируемого Белого моря, в том числе и глубинных вод за счет адвекции трансформированных баренцевоморских, является сравнительно небольшой диапазон изменений концентраций, как по акватории - в различных районах, так и по вертикали, при общем достаточно высоком уровне насыщенности кислородом. Различия среднесезонного (1958-1983 гг.) кислородосодержания вод отдельных районов моря, оцениваемые на основе средневзвешенных величин, крайне незначительны (в пределах 7,25-7,40 мг/л) и существенно меньше, чем амплитуда временной (межгодовой и сезонной) и пространственной изменчивости в пределах каждого из этих районов. При общих незначительных различиях среднесезонных величин максимальным кислородосодержанием отличаются хорошо перемешиваемые, холодные воды Горла (средневзвешенная - 7,40±0,02 мг O<sub>2</sub>/л); минимальным - воды мелководных - Воронки (7,25±0,02) и Мезенского залива (7,30±0,04 мг O<sub>2</sub>/л); промежуточное положение занимают воды глубоководной части моря - Бассейна и Кандакшского залива (соответственно, 7,32±0,01 и 7,37±0,015 мг O<sub>2</sub>/л). В стратифицированной глубоководной части моря более высоким содержанием растворенного кислорода отличается промежуточная водная масса, несколько ниже содержание кислорода в поверхностной ВМ, и наиболее низкое - в глубинной ВМ (особенно в придонных водах), что обусловлено их генетической природой (см. гл. II). Но различия эти край-

не велики. Сравнительно небольшая пространственно-временная изменчивость концентрации растворенного кислорода в водах Белого моря в значительной степени обусловлена хорошей насыщенностью их кислородом, как правило, превышающей 90 %. Только в глубинной водной массе насыщенность кислородом несколько ниже, но обычно не менее 80 %, и лишь в экстремальных ситуациях снижалась до 70 %.

Тренды многолетней изменчивости концентрации кислорода в водах Белого моря по районам рассматривались во II главе. Для многолетней флуктуации насыщенности вод Белого моря кислородом характерна противофаза с теплозапасом вод моря. Среднепериодные характеристики растворенного в водах Белого моря кислорода четко показывают увеличение кислородосодержания в "холодный" период во всех районах моря. Рассматриваемый ряд систематических наблюдений по кислороду за период 1953-1983 гг. включает "теплые" и "холодные". При оценке общего среднемноголетнего кислородсодержания в Белом море 46,1 млн.т, амплитуда изменчивости составит 5,3 млн.т (43,2-48,5 млн.т); для "собственно" Белого моря средняя величина 43,2 млн.т, с амплитудой 5,8 млн.т (40,0-45,8 млн.т).

Сезонная изменчивость концентрации растворенного в водах Белого моря кислорода сравнительно невелика; некоторые различия сезонного хода по районам моря обусловлены природными условиями. Максимум концентрации  $O_2$  во всех водных массах районов моря - в весенний период, несколько понижены концентрации кислорода только в зонах непосредственного влияния паводковых вод. Минимальные же концентрации кислорода не столь синхронны во времени для разных районов моря. Минимальное содержание  $O_2$  - в летний период в прогреваемых хорошо перемешиваемых водах мелководных заливов, в поверхностной водной массе глубоководной части моря и особенно Двинского залива (менее 7 мл/л) обусловлено снижением растворимости и расходом на окислительные процессы. В осенний период по мере охлаждения вод и уменьшения расхода на окислительные процессы, содержание  $O_2$  возрастает. Но в промежуточных и глубинных водах глубоководной части моря, а также в водах Воронки и Горла относительно низкие концентрации кислорода (но не менее, соответственно, 7,25-6,7-7,0 мл/л) наблюдаются осенью, что, по-видимому, связано с особенностями адвекции баренцевоморских вод.

Сезонная изменчивость насыщенности вод кислородом достаточно велика только в тонком фотическом слое. В промежуточных и глубинных водах сезонный ход несущественен, но достаточно значима межгодовая изменчивость, обусловленная флуктуацией адвекции баренцево-

морских вод. Наибольший интерес представляет сезонная и межгодовая динамика насыщенности кислородом вод фотического слоя, поскольку отражает фотосинтетическую активность фитопланктона и позволяет судить о межгодовой изменчивости первичной продуктивности моря (малоизученной). Насыщенность поверхностного слоя кислородом на протяжении вегетационного периода снижается от весны - к лету - и к осени. Поверхностный слой активного фотосинтеза, пересыщенный кислородом, достигает наибольшей толщины в весенний период, уменьшаясь летом, и практически исчезает осенью. Слой эффективного фотосинтеза, пересыщенный кислородом, как правило, ограничен 15-метровым горизонтом, однако в глубоководной части моря в весенний период может достигать 25-30 м. В вегетационный период толщина эвфотической зоны, пересыщенной кислородом, и степень насыщенности отличаются значительной межгодовой изменчивостью, обусловленной климатической изменчивостью. По среднемноголетним данным 1958-1983 гг. в весенний период поверхностный слой всей акватории моря (кроме вершин сильно опресняемых заливов) пересыщен кислородом, в основном в пределах 102-110 % (в благоприятные годы может достигать 120-130 %). В летний период пересыщены кислородом поверхностные воды всей акватории моря, кроме мелководных заливов - Мезенского и Онежского. Осенью поверхностные воды повсеместно недосыщены кислородом, поскольку фотосинтетическая деятельность фитопланктона идет на спад, а бактериальная деструкция еще достаточно интенсивна. Следует отметить, что в мелководных северных районах (Воронка, Горло) в весенне-летний период, а в мелководных заливах (Онежский, Мезенский) - только весной вся толща хорошо перемешиваемых вод пересыщена кислородом.

Анализ экологических условий периода 1958-1983 гг. и насыщенности кислородом фотического слоя показал, что линейной связи с каким-либо отдельным фактором нет, но наиболее четкая положительная связь установлена со среднегодовой температурой поверхностных вод (хотя отдельные годы из этой закономерности выпадают). По наблюдениям гидробиологов поздняя и холодная весна не способствуют высокой продуктивности фитопланктона. Отмечены элементы противофазы в межгодовой изменчивости насыщенности поверхностного слоя кислородом и речным стоком. Логически речной сток как поставщик биогенных элементов является положительным фактором, но поскольку для Белого моря закономерна противофаза термического режима над акваторией моря и речным стоком (см.гл. II), очевидно, контролирует первичную продуктивность температурный фактор. Оптимальным для вегетации фи-

топланктона является нетипичное для Белого моря сочетание таких факторов среды, как благоприятный термический режим и высокий речной сток (см. гл. II).

По нашим расчетам, при оценке продуктивности фитопланктона "собственно" Белого моря порядка 1,5-2 млн. т  $O_{org}$  в год, за счет процессов фотосинтеза должно выделяться 4,00-5,35 млн. т кислорода, весь кислород поступает в тонкий поверхностный слой в среднем около 15 м. На процессы окисления органической материи расходуется за год порядка 7,78 млн. т кислорода. При общем содержании в объеме "собственно" Белого моря порядка 43,2 млн. т растворенного кислорода, поступление за счет фотосинтеза составит около 11 % этой величины, а расход на окислительные процессы - около 18 %. На настоящем этапе исследований только приблизительно можно оценить адвекцию кислорода с трансформированными баренцевоморскими водами - порядка 21-22 млн. т в год, что в 4-5 раз превышает поступление кислорода за счет фотосинтеза. Недосыщенность поверхностных вод кислородом подавляющую часть года определяет превалирование в годовом аспекте инвазии кислорода из атмосферы. Учитывая среднегодовую величину насыщения кислородом вод Белого моря 95%, среднегодовой дефицит кислорода в море составляет около 2,3 млн. т, а для вод "собственно" Белого моря (среднее насыщение 92 %) - около 3,8 млн. т.

#### ГЛАВА IV. КАРБОНАТНАЯ СИСТЕМА

В химии океана (моря) наиболее полно системные представления нашли отражение в карбонатной системе. Карбонатная система является одной из самых сложных равновесных систем в море, непосредственно связанной с круговоротом углерода, с биологическими процессами, которые наряду с физическими и физико-химическими факторами, определяют ее пространственно-временную изменчивость. Обычно общее содержание компонентов карбонатной системы в океанических водах пропорционально солености, но в опресняемых морях эта закономерность несколько нарушается опреснением речным стоком, а также льдообразованием и таянием льда. В Белом море щелочность поверхностных вод имеет жесткую отрицательную корреляцию с величинами объемов речного стока и положительную - с соленостью. Получены устойчивые зависимости между полями климатических норм указанных характеристик (солености и щелочности).

Свободная углекислота растворена в морских водах в очень малых концентрациях (0,2-2,5 мг/л), обычно не более 1 мг/л. В воде

рек, впадающих в Белое море, концентрация  $CO_2$  даже в летний период в среднем близка 4,5 мг/л (в некоторых реках может повышаться до 15 мг/л), а зимой возрастает в 1,5-3 раза. Значение  $CO_2$  в экосистеме моря как источника углерода при фотосинтезе очень велико. Факторами, определяющими содержание растворенной углекислоты в море, являются: разнонаправленный обмен с атмосферой, речной сток, процессы фотосинтеза и окисления органической материи. Функционально связана с концентрацией  $CO_2$  и продуктов ее диссоциации в воде концентрация водородных ионов (рН).

Сезонная изменчивость элементов карбонатной системы в поверхностных водах обусловлена климатическим ходом, связанными с ним биохимическими процессами и сезонной изменчивостью речного стока. Характерны - зимний максимум и весенне-летний минимум щелочности и  $pCO_2$ , а также обратный им сезонный ход величины рН. Межгодовая динамика этих характеристик обуславливается межгодовой климатической изменчивостью. В промежуточных и глубинных водах сезонная и межгодовая изменчивость элементов карбонатной системы определяется, главным образом, адвекцией баренцевоморских вод.

Уровень общей щелочности и рН по материалам 1958-1983 гг. в водах различных районов и водных масс Белого моря в основном определяется степенью влияния материкового стока, отличающегося низкой минерализацией и высокими концентрациями свободной углекислоты, а также адвекцией баренцевоморских вод, характеризующихся повышенной соленостью и щелочностью. Максимальные величины щелочности и рН, по своим океаническим свойствам, свойственны водам Воронки (среднегодовое средневзвешенное  $Alk = 2,28 \pm 0,005$  мг-экв/л, рН -  $8,09 \pm 0,002$ ); значительно уступают им воды глубоководной части моря - Бассейна (средневзвешенное  $2,07 \pm 0,002$  мг-экв/л) и Кандалякшского залива ( $2,04 \pm 0,005$ ), понижены щелочность и рН в мелководных опресняемых речным стоком заливах - Мезенском, Онежском, Двинском (как правило, среднегодовое  $Alk$  - менее 2 мг-экв/л, и изменяются в пределах 1,96-1,99; рН 8,04-8,05). Для Белого моря в целом характерно увеличение щелочности с глубиной по мере возрастания солености (средневзвешенные в поверхностной водной массе - 1,91 мг-экв/л; в промежуточной - 2,01; в глубинном - 2,08).

Величины рН по вертикали изменяются сравнительно мало, при общей тенденции понижения величины рН с глубиной, но для глубоководной части моря максимум рН свойственен промежуточной водной массе (многолетние средневзвешенные рН 8,07-8,09), генетически связанной с трансформированными поверхностными баренцевоморскими водами, фор-



мирующимися в теплое время года; минимум pH - глубинной водной массе, формирующейся в холодное время года. Пространственная и сезонная изменчивость показателей щелочности и pH отражена на картах. Поля самых низких величин pH и  $АЕК$ , и высоких  $pCO_2$  приурочены к вершинам заливов, опресняемых стоком крупных рек, и наиболее выражены в период весеннего паводка ( $pH < 8$ ,  $АЕК$  снижается до 1-1,5 мг-экв/л, локально  $< 1$ ); но и в поверхностных водах всей акватории моря в весенний период по среднемноголетним данным щелочность менее 2 мг-экв/л (средние по районам в пределах 1,78-1,93 мг-экв/л). Весеннему периоду эффективного фотосинтеза свойственен максимум pH в поверхностных водах. С наступлением лета pH снижается, а щелочность повсеместно увеличивается. Таблицы статистических характеристик и карты карбонатной системы приводятся в диссертации и приложениях.

В экстремальные по климатическим условиям годы наблюдаются существенные отличия в характеристиках карбонатной системы от среднемноголетней картины, особенно в поверхностных водах. В экстремальные по речному стоку годы четко выявляются следующие закономерности: с увеличением водного стока рек уменьшаются величины pH и щелочности по всей акватории, с уменьшением стока наблюдается обратная зависимость. Однако в аномальные для Белого моря годы - сочетания наиболее сурового температурного режима и маловодного речного стока отмечены минимальные величины pH и максимальные - щелочности, и обратная картина - в аномальные годы сочетания многоводного стока рек с мягкими климатическими условиями над акваторией Белого моря. Очевидно -  $АЕК$  в эти аномальные годы контролируется фактором речного стока, а pH - прежде всего, термическим режимом над акваторией моря и степенью его благоприятности для интенсивного фотосинтеза. Отмеченные аномалии карбонатной системы обусловлены расположением Белого моря на границе противобластных климатических систем (см. гл. II).

Специфичность отличается режим  $pCO_2$  Белого моря, обусловленный стратификацией вод, трехслойной гидрологической структурой глубоководной части моря и спецификой формирующих его водных масс. Для Белого моря характерны относительно высокие величины парциального давления углекислоты поверхностной водной массы, обусловленные мощным материковым стоком с высоким содержанием углекислоты, круглый год превышающие атмосферное  $pCO_2$ , что и определяет круглогодичную эвазию  $CO_2$  из моря в атмосферу. Даже летом в поверхностных водах  $pCO_2$  варьирует в пределах  $360-620 \cdot 10^{-6}$  атм., повышаясь в зоне выноса северодвинских вод до  $2000 \cdot 10^{-6}$  атм. Для Белого моря характе-

рен промежуточный минимум  $pCO_2$ , обусловленный природой промежуточной водной массы, генетически связанной с поверхностными баренцево-морскими водами, формирующимися в теплое время года, особенно в ядре ПрВМ, в котором средние значения  $pCO_2$  около  $350 \cdot 10^{-6}$  атм, а местами  $pCO_2$  понижается до  $320 \cdot 10^{-6}$  атм. Ниже слоя промежуточного минимума - в глубинной водной массе, сформированной трансформированными зимними баренцево-морскими водами, погружающимися в Горле в холодное время года,  $pCO_2$  повышается (обычно в пределах  $380-450 \cdot 10^{-6}$  атм при среднем значении, близком  $400 \cdot 10^{-6}$  атм).

В поверхностных водах Белого моря наблюдается повышение величин  $pCO_2$  от центральной части Бассейна к зонам интенсивного выноса речных вод. Однако и в открытой части Бассейна в летний период  $pCO_2$  варьировало в пределах  $375-538 \cdot 10^{-6}$  атм, превышая атмосферное. Минимальные значения  $pCO_2$  в начале лета (июнь) в период вспышки фитопланктона ( $360-412 \cdot 10^{-6}$  атм), при средней величине для разных лет от  $375$  до  $430 \cdot 10^{-6}$  атм. Уже в июле, по мере интенсификации окислительных процессов ОВ,  $pCO_2$  поверхностных вод повышается. В зимний период значительного повышения  $pCO_2$  в поверхностных водах не происходит, вследствие ингибирования окислительных процессов низкими температурами и компенсационного перераспределения  $CO_2$  в результате конвекционного перемешивания с верхним слоем промежуточного минимума  $pCO_2$ . При этом абсолютный минимум  $pCO_2$  сохраняется в ядре промежуточной водной массы, не нарушаемом осенне-зимней конвекцией.

Парциальное давление углекислоты является показательным индикатором водных масс различной генетической природы, имеющим преимущество перед T, S - кривыми.

Белое море среди северных морей в летний период отличается наиболее высоким парциальным давлением углекислоты поверхностных вод. Средние величины  $pCO_2$  в поверхностных водах северных морей в летний период составляют, в атм.  $\cdot 10^{-6}$ : Гренландское - 220, Карское - 240, Баренцево - 250, Балтийское - 350, Северное - 370, Белое - 460. Таким образом, в открытых окраинных морях в летний период преобладает инвазия  $CO_2$  из атмосферы; Балтийское и Северное моря летом близки к равновесию  $pCO_2$  с атмосферными; и только в Белом море преобладает круглогодичная эвазия углекислоты в атмосферу.

#### ГЛАВА V. БИОГЕННЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

К главным элементам биогенного цикла в водах океанов и морей, как отмечалось, относятся С, О, Н, N, P, Si. Общие закономерности внутриокеанических циклов связывают, прежде всего, фосфор, азот и

кремнекислоту, растворенные в морских водах в ограниченных количествах, соотношение их минеральных форм, не нарушенное интенсивными биохимическими и геохимическими процессами, имеет более или менее постоянный характер, оставляя в среднем  $Si:N:P = 20:7,2:1$ . По соотношению  $Si:N:P$  и форм их соединений можно судить об активности геохимических и биохимических процессов в море и их направленности.

В Белом море, подвергаясь сильному геохимическому воздействию материкового стока, соотношение минеральных форм биогенных элементов сильно одвинуто и составляет в среднем  $Si:N:P = 21:2,7:1$ , но при этом имеет зональные и сезонные различия. Наибольший сдвиг соотношения  $Si:N:P$  и его пространственно-временная изменчивость характерны для поверхностных вод моря, на которые активно воздействуют геохимические и биохимические процессы ( $25:2,4:1$ ), особенно в Двинском заливе ( $35:2,0:1$ ). В водах баренцевоморского генезиса — промежуточной ( $20:2,5:1$ ) и глубоководной ( $20:2,8:1$ ) соотношение  $Si:N:P$  более стабильно.

Для морского фитопланктона принята средняя величина соотношения  $C:Si:N:P = 42:20:7,2:1$ , в этой же пропорции ассимилируются биогенные элементы из среды (доля кремния может значительно меняться в зависимости от диатомовых — до  $42:28:7,2:1$ ). В Белом море роль фитопланктона в биотическом круговороте биогенных элементов достаточно велика. При синтезе органического вещества фитопланктоном порядка 3-4 млн. т в год ассимиляция и включение в состав органических соединений подвергается 1,5-2,0 млн. т углерода, 0,25-0,33 млн. т азота, 0,036-0,048 млн. т фосфора и около 1,3 млн. т кремния, что составит по отношению к содержанию этих элементов в море — соответственно, 15-30 % азота, 25-30 % фосфора, около 50 % кремния. Эти показатели более велики по отношению к годовичному поступлению БЭ в море (20-25 % азота, 50-60 % фосфора, около 80 % кремния).

Биопродуктивность морей определяется (в комплексе с физическими факторами) биогенными элементами: их содержанием в море и поступлением, соотношением биогенных элементов и формой их соединений, скоростями регенерации и оборачиваемости. В водах арктического Белого моря биогенные элементы в значительной степени находятся в форме органических соединений — около 90 % связанного азота и 40 % фосфора, что обусловлено их преобладанием в приходной части баланса, в совокупности с замедленными процессами минерализации в условиях низких температур, особенно азотсодержащей части ОБ, более прочно связанной в клеточной структуре по сравнению с фосфором.

Вследствие этого воды Белого моря относительно богаты органическим азотом и обеднены минеральным. В среднем для моря соотношение  $N_{орг} : P_{орг} = 30:1$ , в то время как минеральных —  $N:P = 3:1$ , а валового —  $N:P = 11:1$ . Органический азот труднодоступен фитопланктону, а минеральный азот в Белом море по закону Либиха находится в минимуме и, в первую очередь, может лимитировать первичную продуктивность. Оборачиваемость азота в Белом море также низка, что не способствует продуктивности фитопланктона. В Белом море минеральный азот находится в основном в наиболее окисленной форме — нитратов (в природный период около 80 % от суммы минерального азота), в период интенсивного антропогенного воздействия несколько возросла доля аммонийного и нитритного азота.

Формируется состав биогенных элементов в основном за счет поступления с материка и из смежного Баренцева моря. С речным стоком за год вносится около 229 тыс. т связанного азота, 370 тыс. т растворенного кремния и 8,5 тыс. т фосфора (в основном в виде органических соединений); из Баренцева моря — около 1015 тыс. т азота, 1320 тыс. т кремния, 66 тыс. т фосфора. Прочие составляющие поступления биогенных элементов, такие как субмаринная разгрузка подземных вод, с атмосферными осадками, азотфиксация водорослями, имеют подчиненное значение (по приближенной оценке на их долю приходится в тыс. т: 37,2 — N; 22,2 — Si; 0,31 — P). В водах подземного стока биогенные элементы представлены в основном минеральными формами. В Белом море за год поступает около 3,28 млн. т связанного азота, 1,71 млн. т растворенного кремния и 0,075 млн. т фосфора. Удельный годовой приход биогенных элементов составит 305 мг N/м<sup>3</sup> связанного азота, 18 мг P/м<sup>3</sup> фосфора, 410 мг Si/м<sup>3</sup> растворенного кремния. В результате внутриводоемных процессов валовое соотношение биогенных элементов в беломорских водах ( $Si:N:P = 18:11:1$ ) отлично от формирующих его вод — речного стока и трансформированных баренцевоморских, а также от соотношения  $Si:N:P$  в суммарном поступлении БЭ, включая прочие источники (23:17:1).

Пространственное распределение биогенных элементов в Белом море проявляет четкую связь, главным образом, с динамикой вод. Горизонтальная циркуляция является основным механизмом перераспределения БЭ по акватории моря. Воды речного стока богаче поверхностных морских вод биогенными элементами (особенно кремнием и азотом), соответственно, и зоны, подверженные их воздействию, характеризуются полями повышенных концентраций БЭ, особенно кремния и азота. Доминантная закономерность в распределении минеральных форм соединений

биогенных элементов по вертикали. — возрастание концентрации с глубиной, с максимумом в глубинных водах, генетически связанных с зимними баренцевоморскими водами. Поэтому и наиболее высокими величинами средневзвешенных в толще вод концентраций минеральных форм соединений биогенных элементов (фосфатов, нитратов, кремния) отличаются глубоководные районы — Бассейн и Кандалакшский залив (среднемноголетние — порядка  $20 \text{ мг P/м}^3$ ,  $55-60 \text{ мг N/м}^3$ ,  $400 \text{ мг Si/м}^3$ ). Самые низкие средневзвешенные концентрации БЭ в мелководных северных районах — Воронке и Горле (соответственно,  $15 \text{ мг P/м}^3$ ,  $35-40 \text{ мг N/м}^3$ ,  $250-300 \text{ мг Si/м}^3$ ). Возросшее содержание нитритного азота, являющегося показателем антропогенного воздействия, отмечено в мелководных районах, наиболее значительно в Мезенском заливе и в Горле (средневзвешенная — соответственно,  $4,06$  и  $3,23 \text{ мг N/м}^3$ ); существенно повышено в заливах Двинском, Онежском ( $< 3 > 2,5 \text{ мг /м}^3$ ), и минимально в глубоководных районах моря — Бассейне и Кандалакшском заливе ( $< 2 \text{ мг N/м}^3$ ).

Природные концентрации органического азота в водах Белого моря варьировали в пределах  $0,28-0,80 \text{ мг N/л}$  при наиболее часто встречающихся величинах  $0,30-0,40 \text{ мг N/л}$  и среднем значении  $0,36 \text{ мг N/л}$ . Фоновые концентрации органического фосфора в водах Белого моря варьировали в пределах  $0,001-0,031 \text{ мг P/л}$ , при средней для моря величине около  $0,01 \text{ мг P/л}$ . Пространственное распределение органического азота и фосфора по акватории Белого моря подобно распределению органического углерода (см. гл. VI). Распределение в водной толще, так же как и органического углерода, определяется генетической природой водных масс — повышенными концентрациями органического азота и фосфора отличается поверхностная водная масса, пониженными — водные массы баренцевоморского происхождения — промежуточная и, особенно, глубинная. В современный период интенсивного антропогенного воздействия отмечено увеличение содержания органического азота, особенно в мелководных заливах.

Концентрации минеральных соединений биогенных элементов в поверхностных водах особенно подвержены пространственно-временной изменчивости, под воздействием геохимических, биохимических и динамических процессов. Коэффициенты вариации и дисперсии их величин сопоставимы с изменчивостью характеристик биохимических процессов, которыми в значительной степени и определяются. Распределение и пространственно-временная изменчивость биогенных элементов в Белом море иллюстрируется в работе картами и графиками.

## ГЛАВА VI. ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО

Центральное место в работе занимает изучение органического вещества, поскольку интегральным показателем функционирования экосистемы является углеродный цикл, и антропогенное нарушение экосистемы сказывается, прежде всего, в нарушении углеродного цикла — разбалансированности продукционно-деструкционных процессов, так как углерод является наиболее технофильным элементом. Для Белого моря в современный период интенсивного антропогенного воздействия проблема углеродного цикла приобретает особую остроту, вследствие того, что профилирующая промышленность региона — лесозаготовительная, деревообрабатывающая, целлюлозно-бумажная, поставяет стойкое к окислению органическое вещество лигнино-гумусового комплекса, что в условиях сурового климата с затрудненной способностью к самоочищению представляет угрозу экосистеме и требует серьезного изучения. Углеродный цикл функционально связан с карбонатной системой, кислородным режимом, биогенными элементами. Автором исследовано органическое вещество в водах Белого моря, его содержание, пространственно-временная изменчивость, элементный состав, формирование состава ОВ, дана оценка первичного продуцирования, бактериальной деструкции органического вещества, сбалансированности продукционно-деструкционных процессов, баланса ОВ; связь с другими подсистемами — в первую очередь, с биогенными элементами. Организация системы органического вещества в Белом море достаточно специфична.

Энергетическую основу всех последующих звеньев трофической цепи в море создают фотосинтезирующие организмы — в Белом море  $28,9\%$  годового прихода ОВ (главным образом, фитопланктон —  $26,6\%$ , макрофиты —  $2,3\%$ ), а также органическое вещество, вносимое реками —  $40,7\%$ . Воды речного стока значительно богаче морских органическим веществом. Годовой речной сток составляет  $4,5\%$  от объема водной массы моря, а органический сток рек достигает  $15\%$  от ОВ, содержащегося в море. Обмен органическим веществом с Баренцевым морем имеет отрицательную результирующую и является основной составляющей расходной части баланса ОВ (вносится со стоковым течением  $54,7\%$

Примечание: Органическое вещество исследовалось в "собственно" Белом море (включая Бассейн, Кандалакшский, Онежский, Двинский — заливы). В.В.Тимонов и ряд других исследователей рассматривают Воронку как залив Баренцева моря, Горло — как пролив.

Все цифровые данные органического вещества выражены в органическом углероде ( $C_{орг}$ ).

ОВ; поступает с компенсационным — 30,4 %). Таким образом, специфичность Белого моря, в отличие от прочих внутриматериковых морей Советского Союза, прежде всего, в превалировании в балансе органического вещества терригенного ОВ, стойкого к биохимическому окислению поступающего реками (2,68 млн.т  $C_{орг}$ ); уступает ему автохтонное ОВ, продуцируемое фотосинтезирующими организмами (около 1,76 млн.т) и ОВ, вносимое из Баренцева моря при водообмене (2,00 млн.т). Специфика формирования состава органического вещества Белого моря обусловлена комплексом таких факторов, как: мощный материковый сток гумидной зоны, богатый ОВ; короткий вегетационный период фотосинтезирующих организмов; интенсивный водообмен с Баренцевым морем, при резкой стратификации и известной изоляции поверхностных вод от нижележащих. Средоточие терригенного и автохтонного органического вещества (в сумме около 70 % годового прихода ОВ) в тонком поверхностном слое вследствие стратификации обусловило его высокую концентрацию — в фоновый период в среднем  $3,45 \pm 0,14$  мгС/л, в современный —  $4,68 \pm 0,13$  мгС/л, особенно высокую в опресняемых зонах, вблизи устьев рек (до 15 мгС/л и выше). В расчете на объем поверхностной водной массы за год поступает за счет первичной продукции около 2,3 мгС/л, и около 3,5 мгС/л — за счет речного стока (соответственно, 40 % и 60 % от их суммы).

Около 2,00 млн.т органического вещества, вносимого с трансформированными баренцевоморскими водами, поступает в основном за счет погружения в Горле и адвекции, в промежуточные и глубинные слои Белого моря, его качественные характеристики свидетельствуют о планктонном происхождении. Органическое вещество промежуточных и глубинных вод Белого моря "консервируется" низкими температурами, при этом ОВ промежуточных вод, генетически связанное с поверхностными баренцевоморскими водами теплого времени года, более лабильно; а ОВ глубинных вод, генетически связанное с поверхностными баренцевоморскими водами холодного времени года, несколько более трансформировано. Концентрация органического вещества в промежуточных и глубинных водах Белого моря (соответственно, в фоновый период —  $3,20 \pm 0,09$  мгС/л и  $3,06 \pm 0,11$  мгС/л; в современный —  $3,85 \pm 0,14$  и  $3,32 \pm 0,14$  мгС/л) существенно ниже, чем в поверхностных, несмотря на частичное перемешивание вод при прохождении Горла на границе стокового и компенсационного течений и, в результате этого, несколько повышены концентрации ОВ в промежуточных и глубинных водах Белого моря по сравнению с исходными баренцевоморскими. Содержание органического вещества в водах Белого моря в современный период оценивает-

ся в среднем в  $3,55 \pm 0,09$  мгС/л, общее увеличение содержания ОВ в море можно оценить порядка 20%, в основном, за счет возрастания его концентрации в поверхностных водах. Гистограммы характеристик органического вещества Белого моря в фоновый период и период интенсивного антропогенного воздействия показывают смешение пика с областью концентраций 2,50–3,50 мгС/л на область концентраций 3,50–4,75 мгС/л.

Годовой приход органического вещества в Белое море оценивается в 6,58 млн.т  $C_{орг}$  и по отношению к общему содержанию ОВ в водах моря (около 15,6 млн.т  $C_{орг}$ ) достигает 40 %. При значительном годовом поступлении органического вещества (около 130 т/км<sup>2</sup>), несмотря на замедленную минерализацию (минерализуется около 2,91 млн.т — 44,2 % годового прихода), вследствие интенсивного выноса ОВ в Баренцевом море (около 3,60 млн.т  $C_{орг}$ ), в грунты откладывается лишь 0,07 млн.т  $C_{орг}$  (около 1 %), а коэффициент фоссилизации мал (1,5%). Несущественно в общем балансе изъятие органического вещества промыслом (около 0,03 %). Внутригодовое поступление органического вещества очень неравномерно, около 60 % ОВ обрывается реками в весенний период, около 30 % — в летний и осенний, около 10 % — зимой, достаточно активная вегетация продолжается не более пяти месяцев.

Пространственное распределение, изменчивость и качественные характеристики органического вещества в Белом море определяются, прежде всего, генетической природой водных масс, их взаимодействием и перераспределением в результате гидродинамических процессов; а также биохимическими процессами (первичный синтез ОВ и его бактериальная деструкция), интенсивность и степень сбалансированности которых обусловлены факторами среды; и отражено на картах и профилях разрезов. В поверхностных водах Белого моря распределение органического вещества определяется в основном степенью воздействия речного стока, что и обусловило приуроченность наиболее высоких концентраций  $C_{орг}$  к вершинам заливов, в местах впадения крупных рек — Сев. Двины, Онеги (> 10–15 мгС/л). Концентрация  $C_{орг}$  в стоке этих рек может достигать 20 мгС/л. Шлейф выноса вод с повышенным содержанием органического вещества прослеживается далеко от устьев крупных рек, особенно под правыми берегами заливов — соответственно направлению стоковых течений. Максимальным содержанием ОВ отличаются поверхностные воды Двинского залива. Повышены концентрации  $C_{орг}$  и в прибрежной зоне (особенно заболоченного Поморского побережья), находящейся под воздействием стока густой сети средних и малых рек, воздействие которых носит локальный характер, но весьма заметно.

Снижаются концентрации  $C_{орг}$  в поверхностных водах по мере удаления от берегов в открытое море, при самых низких в центральной части Бассейна и при входе в Кандалакский залив (менее 4-4,5 мгС/л). В современный период интенсивного антропогенного воздействия отмечено не только значительное увеличение концентрации органического вещества в поверхностных водах Белого моря, сравнительно с фоновым периодом, но несколько изменился и характер его распределения в поверхностных водах моря.

Все показатели разнообразия (лимиты, дисперсия, коэффициент вариации) свидетельствуют о том, что максимальная изменчивость концентрации органического углерода свойственна поверхностной водной массе Белого моря, снижается в промежуточной ВМ и минимальна в глубокой ВМ. Анализ изменения показателей разнообразия по вертикали показывает, что минимальные их значения характеризуют ядра водных масс и, наоборот, их возрастание свойственно пограничным зонам между водными массами, зонам смешения. Содержание органического углерода в водных массах Белого моря характеризуется нормальным распределением.

При сопоставлении карт концентрации органического углерода в водах Белого моря с картой  $C_{орг}$  в донных отложениях наблюдается противоположный характер распределения этих величин по экватории и дну моря. Зонам максимальных концентраций  $C_{орг}$  в грунтах, приуроченных к глубоководным впадинам, соответствует обедненная ОВ толща вод над ними, с пониженными средневзвешенными концентрациями органического углерода. Поскольку распределение  $C_{орг}$  в донных осадках Белого моря контролируется, в первую очередь, гранулометрическим составом, максимальное содержание  $C_{орг}$  в поверхностном слое донных отложений наблюдается в центральной глубоководной котловине, в которой благодаря системе течений и динамическому перераспределению происходит накопление в мелкозернистых осадках  $C_{орг}$ .

В экосистеме моря большое значение имеет качественный состав органического вещества. В энергетике моря лабильное органическое вещество планктонного генезиса играет более важную роль, поскольку более полно включается в круговорот вещества и энергии, чем стойкое аллохтонное ОВ терригенного генезиса, приносимое реками. Кроме того, ОВ Сев.Двины, давшей 65 % органического стока, и Мезени, вносимое в восточную часть моря, в значительной степени выносятся со стоковым течением в Баренцево море, а часть ОВ подвергается седиментации в эстуарии. Беломорские реки в основном несут растворенное ОВ (более 96 %), но в зоне смешения с морскими вода-

ми около 10 % растворенного ОВ по данным Артемьева и др. / 1984 / подвергается флокуляции. От устьев крупных рек - Сев.Двины, Онеги распространяются шлейфы повышенного содержания  $C_{орг}$  в осадках (до 1,5-2,0 %), приближающиеся к максимальным для моря значениям. Но растворенные гуминовые вещества терригенного генезиса разносятся течениями далеко в море. Показателями наличия гуминовых веществ в море являются шкала цветности Фореля-Уле и коэффициенты ослабления света в фиолетовой части спектра, в Белом море они варьируют в пределах 0,102-0,642, уменьшаясь с юго-востока на северо-запад, и по мере удаления от берегов в открытое море (для сравнения в Баренцевом море 0,106-0,149). Показатели цветности шкалы Фореля-Уле, максимальные в Двинском заливе, возрастают по мере приближения к устью Сев.Двины до XXI и минимальны - в Кандалакском заливе и в открытой части Бассейна (XI-XIII). Показателем степени лабильности органического вещества служит величина отношения биохимического потребления кислорода (БК) к перманганатной окисляемости (ПО) - высокая величина (приближающаяся к 1) характеризует "свежее" лабильное ОВ планктонного генезиса, низкая - стойкое ОВ терригенного генезиса. В Белом море в зоне непосредственного воздействия речного стока БК/ПО 0,15-0,25; в поверхностных водах открытого моря - 0,50-0,75. Высокая величина отношения БК/ПО в промежуточной и глубоководной водной массе баренцевоморского генезиса свидетельствует о планктонном происхождении органического вещества.

Органическое вещество в водах Белого моря значительно отличается по химическому составу от органического вещества вод впадающих в него рек. Органическое вещество морской воды богаче азотом, чем речное. Для морских вод характерно повышенное отношение белков к углеводам - 1:2,2 (для речных вод - 1:5,8). В Белом море значительная широта отношения C:N:P - составляющая в среднем 365:45:1, свидетельствует о влиянии материкового стока на формирование вод моря. Изменение элементного состава взвешенного органического вещества при его деструкции выражается в том, что распад азота - и особенно фосфорсодержащих соединений, опережает распад ОВ в целом. Поэтому о генетической природе органического вещества и степени его трансформации можно судить по соотношению элементного состава. В речных водах, богатых болотным гумусом, C:N > 10, в фитопланктоне - C:N ≈ 6, в зоопланктоне - C:N ≈ 25-30. Для водных масс Белого моря на массовом материале установлены типичные соотношения элементного состава органического вещества, обусловленные их генетической природой. Для глубоководной стратифицированной части Бе-

лого моря в поверхностной водной массе средняя величина отношения  $C:N:P = 200:20:1$  показывает сильное влияние терригенного гумуса; в водных массах баренцевоморского течения в промежуточной ( $C:N:P = 350:40:1$ ) и глубинной ( $C:N:P = 480:60:1$ ) уменьшение величины отношения  $C:N$  свидетельствует о превалировании ОВ планктонного генезиса. Содержание органического азота в водах Белого моря в природный период варьирует в пределах  $0,28-0,80$  мг  $N/l$ , органического фосфора -  $0,001-0,031$  мг  $P/l$  и подчиняется тем же закономерностям, что и органический углерод. В современный период в водах Белого моря, наряду с возрастанием содержания органического углерода, отмечено и существенное увеличение содержания органического азота, особенно в прибрежных водах и в водах сильно опресняемых заливов.

Бактериальная деструкция органического вещества, характеризующаяся величинами биохимического потребления кислорода (БК), в Белом море определяется генетической природой водных масс, свойственной им совокупностью факторов - концентрацией ОВ, степенью его лабильности, температурой, популяцией бактерий. Наиболее высокой потенциальной способностью к бактериальной деструкции (БК<sub>5</sub> при  $T = 20^\circ$ ) отличается нетрансформированное лабильное органическое вещество планктонного происхождения промежуточной водной массы. Поверхностные воды, обогащенные терригенным гумусом, стойким к биохимическому окислению, уступают в величинах потенциального биохимического потребления кислорода промежуточным водам, несмотря на более низкую концентрацию ОВ в последних. Скорости бактериальной деструкции ОВ *in situ* в Белом море в основном отражают изменение температуры по вертикали, и понижаются с глубиной; некоторую корректуру в эту общую закономерность вносит степень лабильности ОВ и скопления бактерий (по данным Теплинской и др., 1985) в слое пикноклина, способствующие повышению скорости деструкции. Наиболее высокими скоростями деструкции органического вещества *in situ* отмечаются прогретые летом до  $10-15^\circ$  поверхностные воды, в которых за пять суток окисляется в среднем около 7% ОВ ( $1-1,5\%$  в сутки); несколько уступают им более холодные промежуточные воды, но отличающиеся лабильным ОВ; минимальная скорость бактериальной деструкции - в холодных глубинных водах, с пониженным содержанием ОВ. Скорости деструкции органического вещества характеризуются константами ( $K_{БК}$ ). В поверхностных водах открытой части Бассейна средняя величина  $K_{БК} = 0,12$ , для подповерхностных вод  $K_{БК} = 0,10$ . В Двинском заливе, несмотря на более высокое содержание ОВ, из-за большой доли терригенного гумуса  $K_{БК} = 0,08$ .  $K_{БК}$  рассчитывалось на основе средних ве-

личий эмпирических кратных БК<sub>2-4</sub> и БК<sub>3-6</sub>.

В летний период в поверхностных водах открытой части моря первичный синтез органического вещества в 2 раза превышает деструкцию ОВ, в Двинском заливе - в 4 раза. И только в мелководных слабоопресняемых губах в летний период продукционно-деструкционные процессы в толще вод сбалансированы (см.гл. УШ).

#### ГЛАВА УП. ПЕРВИЧНАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ И ФАКТОРЫ СРЕДЫ В БЕЛОМ МОРЕ (МОДЕЛЬ ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ). РАСТИТЕЛЬНЫЕ ПИГМЕНТЫ

В главе на основе факторного анализа (метод главных компонент) исследуется влияние абиотических факторов среды на уровень первичной продуктивности Белого моря - первичного синтеза органической материи. В качестве переменных характеристик среды взяты гидрохимические и гидрологические параметры.

В современный период Белое море по первичной продуктивности можно отнести к переходной стадии от олиготрофного типа к мезотрофному. Первичная продукция оценивается в  $1,5-2,0$  млн. т органического углерода в год. Уровень продуктивности фитопланктона определяется физическими, химическими, биотическими факторами среды, такими как освещенность, температура, соленость, устойчивость вод, наличие ряда химических элементов и пр.

Изучение морских природных экосистем в процессе их функционирования связано с систематизацией большого объема переменных, являющихся характеристиками среды, и показателями функционирования гидробионтов. Для реализации задачи системных связей функционирования фитопланктона со средой построена и реализована статистическая модель, основанная на использовании метода главных компонент, одного из направлений факторного анализа, применяемого при решении экологических проблем. На основе факторного анализа описаны различные стороны многомерных отношений между фитопланктоном и средой, показана относительная важность различных факторов в первичном синтезе органического вещества в Белом море. Компонентный анализ показал зависимость продуктивности фитопланктона в изучаемой экосистеме в начале лета, прежде всего, от гидрофизических факторов среды - вертикальной устойчивости вод фотического слоя, солености, в меньшей степени - температуры воды (от последних, главным образом, опосредствованно, как факторов, способствующих формированию устойчивости вод). Условия минерального питания на процесс первичного синтеза ОВ существенно не влияли, отмечена некоторая зависимость лишь для минеральных соединений азота (в первую очередь, нитратного, затем

- аммонийного и нитритного). Во вторую половину лета, по мере истощения зимнего запаса питательных солей в фотическом слое и разобщения его за счет стратификации от нижележащих вод, контролируют продуктивность фитопланктона питательные соли, в первую очередь, минеральные соединения азота.

Выделено четыре главных компонента, суммарный вклад которых в изменчивости экосистемы составил 81,5 %. Первая главная компонента, на которую приходится 40 % общей дисперсии, всей многомерной выборки, показывает зависимость первичной продуктивности от вертикальной устойчивости вод фотического слоя. Вклад II главной компоненты в изменчивости экосистемы, составивший 16,5 %, имеет положительную нагрузку преимущественно по минеральным соединениям азота (нитратам). На III главную компоненту приходится 14,0 % дисперсии системы, в положительном направлении она нагружена характеристиками заглужения поверхностного слоя вертикальной устойчивости. IV главную компоненту (11,0 % дисперсии) - можно назвать компонентой взаимозаменяемых форм азота - нитритного и аммонийного.

Растительные пигменты. Основная роль в фотосинтезе принадлежит хлорофиллу "а", хлорофиллы "в" и "с" имеют подчиненное значение; значимость хлорофилла "с" повышается в холодные периоды (весна, осень), что связано с преобладанием диатомового комплекса. Отмечено увеличение процентного содержания феофитина от весны к осени. Поля распределения хлорофилла "а" в поверхностных водах Белого моря проявляют четкую корреляцию с зонами, подверженными влиянию речного стока (вершины Двинского, Онежского и Кандалакского заливов) - отрицательная связь с соленостью  $\sigma = -0,85$ . Наиболее высокие концентрации хлорофилла в Двинском заливе. Низкими концентрациями хлорофилла отличаются поверхностные воды, подверженные непосредственному влиянию баренцевоморских вод (Горло). Распределение хлорофилла в глубоководной части моря связано с гидрологической структурой и обусловлено генетической природой вод. Средневзвешенная концентрация хлорофилла "а" поверхностной водной массы, фактически соответствующей фотическому слою, около  $1 \text{ мг/м}^3$ . Низкие концентрации хлорофилла в водных массах баренцевоморского генезиса. Распределение хлорофилла "а" в Белом море коррелирует с продуктивностью фитопланктона ( $\sigma = 0,49$ ) и концентрациями органического вещества ( $\sigma = 0,67$ ). Отмечена межгодовая тенденция уменьшения средних для вегетационного периода концентраций хлорофилла "а" в поверхностных водах при снижении температуры вод. Ранняя весна и теплое лето способствуют также увеличению биомассы фитопланктона.

## ГЛАВА УШ. ОСОБЕННОСТИ ГИДРОХИМИИ ГУБ БЕЛОГО МОРЯ

Губы и эстуарии севера являются экосистемами, представляющими самостоятельный научный интерес. Для губ, опресняемых речным стоком, свойственна специфичность гидрологического, гидрохимического режима, фаунистических комплексов, биопродукционных процессов и экосистемы в целом, отличных от прилегающих смежных морских акваторий. Специфика губ заключается также в максимальном антропогенном воздействии как посредством речного стока, так и в результате приуроченности к ним населенных пунктов, портов и производственных комплексов, что усугубляется слабой способностью к самоочищению из-за преобладания низких температур. Гидрохимическая специфика опресняемых губ наиболее ярко проявляется в: интенсификации массообмена в пограничных зонах - с материком, водами открытого моря, и на границах сред (с грунтами и атмосферой); усиленном приливно-отливными течениями, а в мелководных губах и ветровым перемешиванием до дна; а также - в высокой динамичности и степени пространственно-временной вариабельности гидрохимических характеристик, обусловленной перечисленными факторами и биологическими процессами.

Системный подход в исследованиях губ и научный анализ в сравнительном аспекте позволили выявить ранговую роль различных факторов в формировании гидрохимии и биопродуктивности разнотипных губ. Особое значение в изучении экосистем губ в силу их специфики приобретает органическое вещество - формирование состава, трансформация, уровень сбалансированности продукционно-деструкционных процессов. Формирование состава органического вещества в губах происходит в основном в результате взаимодействия первичного автохтонного ОВ, продуцируемого фитопланктоном (в меньшей степени - макрофитами) и аллохтонного терригенного ОВ, поступающего с речными водами. Средний показатель органического стока рек Белого моря - около  $10 \text{ т/км}^2/\text{год}$ . Первичная продуктивность оценивается для разнотипных губ порядка  $10-45 \text{ гС/м}^2/\text{год}$ , при вероятной межгодовой изменчивости -  $55 \pm 80 \%$  от средней величины. В открытой стратифицированной части глубоководных губ фьордового типа в летний период продуктивность фитопланктона может ограничиваться питательными солями и, в первую очередь, минеральными соединениями азота, вследствие их истощения в фотическом слое. В мелководных губах, хорошо перемешиваемых до дна и, особенно с большим речным стоком, продуктивность фитопланктона ограничивается фактором освещенности вследствие мут-

ности вод. Для глубоководных губ фьордового типа со слабым речным стоком (Великая Салма) характерна трехслойная гидрологическая и соответствующая гидрохимическая структура, с гидрохимическими показателями, подобными прилегающей глубоководной части моря. В неглубоких губах с мощным речным стоком (типа Сорокской) выделяется тонкий опресненный поверхностный слой с типичными для него гидрохимическими характеристиками. Мелководные губы (типа Сумской) отличаются гомогенной структурой вследствие сильного перемешивания до дна и однородными по вертикали гидрохимическими показателями, свойственными опресняемым зонам.

В годовом балансе органического вещества мелководных, подверженных сильному воздействию речного стока, губ преобладает аллохтонное ОВ терригенного генезиса над автохтонным (в десятки и сотни раз); в губах с малым речным стоком - в несколько раз. В глубоководных губах фьордового типа с небольшим речным стоком терригенное ОВ в балансе органического вещества незначительно превалирует над автохтонным, а в некоторых - возможно, и уступает ему. При интенсивном водообмене губ со смежной акваторией моря вынос органического вещества превышает поступление с компенсационным течением. Превалирующая роль в водах губ терригенного ОВ над автохтонным подтверждается отрицательной корреляционной связью распределения органического углерода с соленостью ( $Z = -0,83 \pm 0,07$ ;  $r = 0,96$ ) и лишь слабой связью с первичной продуктивностью ( $Z = 0,28 \pm 0,19$ ), значимой только при  $P = 0,70$ ).

Концентрация органического углерода изменяется в широких пределах, как в разнотипных губах, так по акватории и глубинам (от 8,5 до 10 мгС/л), при наиболее высоком содержании в мелководных (среднезвешенная  $> 5-6$  мгС/л), и пониженном - в глубоководных губах ( $< 4,5$  мгС/л); характерно возрастание  $C_{орг}$  по мере приближения к вершинам губ и устьям рек, и понижение - с глубиной. В стратифицированных губах при доминантной закономерности уменьшения концентрации  $C_{орг}$  с глубиной четко выражено увеличение в слое пикноклина, иногда превышающее концентрацию поверхностных вод.

В водах губ в летний период бактериальной деструкции подвергается за сутки от 0,05 до 0,25 мгС/л (наиболее типичные величины 0,07-0,10 мгС/л). В летний период продукционно-деструкционные процессы ОВ относительно сбалансированы лишь в самых мелководных губах; в толще вод глубоководных губ деструкция органического вещества значительно превалирует над первичным синтезом органической материи и летом (в глубинной части в 10-20 раз, в прибрежной - в

2,5-10 раз). В балансе органического вещества губ в годовом аспекте преобладает деструкция ОВ над фотосинтезом ОВ. Превалирование деструкции органического вещества над его синтезом в балансе органического вещества губ компенсируется поступлением аллохтонного ОВ с материка.

В заключительном разделе обобщены основные теоретические аспекты, изложенные в работе, даны краткие выводы по главам; а также определены проблематика и первоочередные задачи дальнейших исследований Белого моря.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее существенные научные результаты, полученные автором: впервые для Белого моря на основе системного подхода произведено обобщение целевого комплекса первичных гидрохимических материалов, а также гидробиологических характеристик, с привлечением смежных научных дисциплин.

Результатом исследований является решение крупной научной проблемы - установления и обобщения закономерностей формирования гидрохимической системы Белого моря, ее динамичной структуры, функционирования и изменчивости, обусловленных комплексным взаимодействием природных и антропогенных факторов.

Произведена оценка химической сбалансированности моря - источников поступления и расхода вещества (растворенных газов, биогенных элементов, органического вещества) - как за счет экзогенных процессов, так и эндогенных (внутриводоемных); направленности и интенсивности миграционных процессов. Установлены факторы, контролируемые гидрохимическую систему моря - в первую очередь, интенсивный водо- и массообмен с материком и смежным Баренцевым морем; интенсивность геохимических процессов, при слабой активности биохимических.

Изучена динамичная гидрохимическая структура семи разнотипных районов моря, ее пространственно-временная изменчивость в причинно-следственной обусловленности комплексным взаимодействием природных факторов. Произведена многофакторная гидрохимическая типизация водных масс, включившая характеристики растворенного кислорода, карбонатной системы, биогенных элементов, органического вещества, а также гидробиологических процессов (на уровне первичной продукции и бактериальной деструкции ОВ) и растительные пигменты. Установлена трехслойная гидрохимическая структура глубоководной части моря, сформированная водными массами различной генетической природы; двухслойная - Двинского залива, гомогенная - мелководных районов. Иссле-



дованы корреляционные связи гидрохимических, гидрологических и гидробиологических характеристик, специфичные для водных масс различной генетической природы; а также пространственная связь и обусловленность полей гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик.

Произведено функциональное изучение подсистем — карбонатной, кислородной, биогенных элементов, органического вещества, в их связи и взаимообусловленности, как составляющих гидрохимической системы моря. Установлены основные специфические закономерности организации этих подсистем, взаимосвязи отдельных элементов в них, а также связи с взаимодействующими подсистемами моря и смежными системами. Обоснована ключевая роль в системе Белого моря органического вещества. Обильное поступление с материковым стоком терригенного ОВ, стойкого к биохимическому окислению, при замедленной его минерализации, несмотря на низкую первичную продуктивность, обусловило повышенное содержание органического вещества в водах моря; а средоточие аллохтонного и автохтонного ОВ в поверхностном слое, при резкой стратификации вод и выраженных горизонтальных течениях, обусловило интенсивный вынос ОВ в Баренцево море, малое отложение в грунты и низкий коэффициент фоссиллизации. Высокие энергетические потери Белого моря с выносом ОВ в Баренцево, наряду с преобладанием органической формы биогенных элементов, труднодоступной фитопланктону, и замедленной их минерализацией, отрицательно сказываются на биопродуктивности моря.

Исследовано содержание органического вещества и его элементный состав, пространственно-временная изменчивость, специфика формирования состава ОВ в море гумидной зоны с обильным речным стоком, дана оценка скоростей бактериальной деструкции ОВ и сбалансированности продукционно-деструкционных процессов. Превалирование процессов деструкции ОВ и обильный речной сток, богатый  $\text{CO}_2$ , обусловили высокое  $\text{pCO}_2$  поверхностных вод и круглогодичную эвазию  $\text{CO}_2$  в атмосферу; при преобладании в годовом аспекте инвазии кислорода из атмосферы.

Построена и реализована математическая модель (метод главных компонент) первичная продуктивность-экосреда, определявшая факторы, контролирующие продуктивность фитопланктона. Дана оценка степени обеспеченности фитопланктона питательными солями, отмечено лимитирование первичной продуктивности, прежде всего, минеральными соединениями азота вследствие преобладания органических форм и замедленной их регенерации в условиях низких температур. Дана коли-

чественная оценка роли фитопланктона в биотическом круговороте биогенных элементов.

Рассматриваются интенсивность, механизмы и результаты антропогенного воздействия на гидрохимию Белого моря. Установлено существенное увеличение концентрации органического вещества в результате интенсивного антропогенного воздействия, сравнительно с природным периодом, особенно в поверхностной водной массе; а также валового азота, в основном — за счет органического.

Конкретно краткие результаты исследований приводятся в разделе автореферата "Основные научные результаты и новизна исследований".

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

1. Органический углерод и окисляемость в водах Белого моря // Изв. Карельского и Кольского филиалов АН СССР, 1959. — № I. — С. 71-74.
2. О содержании некоторых форм азота, фосфора и кремния в водах Белого моря // Гидрохимические материалы, 1959. — Т. 29. — С. 118-130 (соавт. В.Г. Дацко).
3. О содержании растворенного органического вещества в водах Белого моря // Гидрохимические материалы, 1960. — Т. 30. — С. 115-121 (соавт. В.Г. Дацко).
4. Значение первичной продукции в балансе органического вещества в Белом море // Тр. совещ. по первичной продуктивности. — Минск, Изд.: Высшей школы и научных учреждений, 1961. — С. 83-86.
5. Ориентировочный баланс органического вещества в водах Белого моря // Тр. Карельского филиала АН СССР, 1961. — Вып. 31. — С. 126-131 (соавт. В.Г. Дацко).
6. Материалы по гидрохимической характеристике рек Карельского побережья Белого моря. // В кн.: Проблемы использования промышленных ресурсов Белого моря и внутренних водоемов Карелии. — Вып. I. — М.-Л.: Наука, 1963. — С. 40-49.
7. Формирование химического состава воды рек, впадающих в Белое море // В кн.: Материалы ХУП гидрохимического совещания. — Новочеркасск, 1963. — С. 63-65.
8. Ориентировочные величины ионного, органического и биогенного стока рек в Белое море // В кн.: Материалы Ученого совета по проблеме "Теоретические основы рационального использования, воспроизводства и повышения рыбных и нерыбных ресурсов Белого моря". — Петрозаводск, 1964. — С. 12-13.
9. Ионный и органический сток и соотношение главных ионов в реках Карельского побережья Белого моря // В кн.: Гидробиологиче-

ские исследования на Карельском побережье Белого моря. - Л.: Наука, 1967. - С. 9-14.

10. Сток биогенных элементов с речными водами Карельского побережья в Белое море // В кн.: Гидробиологические исследования на Карельском побережье Белого моря. - Л.: Наука, 1967. - С. 15-20.

11. К вопросу о растворимости кислорода в морской воде // Океанология, 1968, т. УШ. - Вып. 5. - С. 912-919 (соавт. А.М.Черныкова).

12. Методы определения содержания кислорода и его растворимости в морской воде // Обзорная информация ЦНИИТЭИРХ "Промышленная ихтиология и океанология", сер. I. - Вып.3.-М., 1970. - С. 18-35 (соавт. Э.И.Конник и А.М.Черныкова).

13. Особенности баланса органического вещества в водах северных и южных внутриматериковых морей Советского Союза // Труды ВНИРО, 1973, т. 80). - Вып. 3. - С. 7-17.

14. Минеральное питание и проблемы обеспеченности фитопланктона питательными солями // Обзорная информация ЦНИИТЭИРХ "Промышленная океанология", сер. 9. - Вып. I. - М., 1977. - 39 с.

15. Критерии оценки обеспеченности фитопланктона питательными солями // Тр. ВНИРО, 1977. - Т. II9. - Вып. 2. - С. 6-15.

16. Содержание биогенных элементов и баланс азота, фосфора, кремния в Белом море // Океанология, 1978. - Т.УШ. - Вып. I. - С. 58-63.

17. Методика расчета антропогенной составляющей биогенного стока рек // В кн.: Вопросы методологии гидрохимических исследований в условиях антропогенного влияния, ч. I. - Л.: Гидрометеоздат, 1979. - С. 32-33.

18. Критерии антропогенного эвтрофирования речного стока и расчет антропогенной составляющей биогенного стока рек // Водные ресурсы, 1979. - № I. - С. 35-40.

19. Особенности баланса биогенных элементов внутриматериковых морей СССР // Водные ресурсы, 1979. - № I. - С. 23-34 (соавт. А.М.Бронфман, Д.Е.Катулин, В.А.Химица, А.К.Юрковский).

20. Органическое вещество, биогенные элементы и их баланс во внутриматериковых морях. - М.: ОНТИ ВНИРО, 1979. - 31 с.

21. Химическая основа биопродуктивности внутриматериковых морей в период интенсивного антропогенного воздействия // В кн.: IV съезд Всесоюзного гидробиологического общества. - Киев: Наукова думка, 1981. - С. 84-86.

22. Изменение химической сбалансированности экологической среды внутриматериковых морей под влиянием антропогенного воздействия // Тез. I науч.семинара "Современные проблемы использования

ресурсов и охраны морской среды". - Одесса, 1981.

23. Свободная углекислота в водах Белого моря // В кн.: Повышение продуктивности и рациональное использование биоресурсов Белого моря. - Л., 1982. - С. 13-14 (соавт. В.Л.Зубаревич).

24. Комплексное исследование взаимосвязей гидрохимических характеристик и классификация рек, впадающих в Белое море // В кн.: Повышение продуктивности и рациональное использование биоресурсов Белого моря. - Л., 1982. - С. 16-17.

25. Эффективность техногенного геохимического воздействия на моря с зарегулированным и незарегулированным стоком // В кн.: Второй Всесоюзный съезд океанологов, вып. 3. - Физика и химия океана. - Севастополь, 1982. - С. 44-46.

26. Парциальные давления углекислоты в Белом море и ее обмен с атмосферой,  $pCO_2$  - индикатор водных масс // В кн.: Второй Всесоюзный съезд океанологов, вып. 3. - Физика и химия океана. - Севастополь, 1982. - С. 53-54 (соавт. В.Л.Зубаревич).

27. Критерии диагностирования изменения ионного состава речных вод под влиянием антропогенного воздействия // Тез. докл. 2-го Межд. симп. по геохимии природных вод. - Ростов-на-Дону, 1982. - С. 144-145.

28. Исследования баланса биогенных элементов внутриматериковых морей как условий формирования химической основы биопродуктивности // Деп. ВИНТИ, № 461, рх-Д 83, 1983. - 140 с.

29. Сравнительная гидрохимическая характеристика рек Терского, Кандалякского, Карельского, Поморского, Ляницкого побережий Белого моря // В кн.: Итоги и перспективы изучения биологических ресурсов Белого моря. - Л.: Наука, 1983. - С. 18-30.

30. Продукция и деструкция органического вещества в Белом море // В кн.: Природная среда и биологические ресурсы морей и океанов. - Л., 1984. - С. 121.

31. Изменение характеристик органического вещества в Белом море за 26-летний период (1956-1982 гг.) // В кн.: Природная среда и биологические ресурсы морей и океанов. - Л., 1984. - С. 121-122.

32. Критерии оценки антропогенных изменений и расчет антропогенной составляющей ионного стока рек // Водные ресурсы, № 3. - 1985. - С. 71-75.

33. Хлорофилл "а" в водах Белого моря // Океанология, 1985, т. 25. - Вып. 5. - С. 813-818 (соавт. А.И.Бондаренко).

34. Гидрологический и гидрохимический режим Белого моря, по результатам исследований 1981-1985 гг. // В кн.: Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого мо-

ря. - Архангельск, 1985. - С. II-17 (соавт. А.Г.Кравец, В.Х.Герман, И.В.Мискевич).

35. Растительные пигменты в водах Белого моря // В кн.: Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. - Архангельск, 1985. - С. 135-137 (соавт. Е.М. Леонова, В.А.Гоголицини).

36. Органический углерод в Белом море в современный период // В кн.: Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. - Архангельск, 1985. - С. 58-59 (соавт. С.С.Владимирский).

37. Деструкция органического вещества в водах Белого моря // В кн.: Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. - Архангельск, 1985. - С. 59-61.

38. Соединения азота в Белом море в современный период // В кн.: Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. - Архангельск, 1985. - С. 61-63 (соавт. И.В.Свиридова).

39. Гидрохимическая типизация водных масс Белого моря // В кн.: Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. - Архангельск, 1985. - С. 54-55.

40. Корреляционные связи гидрологических, гидрохимических и гидробиологических характеристик в водных массах Белого моря // В кн.: Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. - Архангельск, 1985. - С. 56-57.

41. Применение метода главных компонент в экосистемных исследованиях Белого моря // Водные ресурсы, 1986, № 3. - С. 106-112.

42. Органическое вещество в северных морях (формирование, продукционно-деструкционные процессы, баланс) // В кн.: У съезд Всесоюзного гидробиологического общества, ч. I. - Куйбышев, 1986. - С. 19-21.

43. Воздействие техногенного геохимического давления на внутриматериковые моря // Водные ресурсы, 1986, № 5. - С. 159-164.

44. Изменения режима органического вещества Белого моря под влиянием антропогенного воздействия // В кн.: Изучение процессов формирования химического состава природных вод в условиях антропогенного воздействия, ч. I. - Л.: Гидрометеиздат, 1987. - С. 102-103.

45. Изменения гидрохимического режима Белого моря под влиянием природных и антропогенных факторов // В кн.: Третий съезд советских океанологов / Физика и химия океана. Гидрохимия и проблемы загрязнения океанов и морей. Л.: Гидрометеиздат, 1987. - С. 139-140.

46. Круговорот углерода и сопутствующих элементов в Белом мо-

ре // В кн.: Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. Кн. I. - Кандалакша, 1987. - С. 96-99.

47. Проблемы, основные направления, методология и результаты гидрохимических исследований Белого моря // В кн.: Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. Кн. I. - Кандалакша, 1987. - С. 47-54.

48. Органический углерод в водах Белого моря в летний период 1984 г. // Океанология, 1988. - Т. 28, № 5. - С. 753-758 (соавт. С.С.Владимирский).

49. Первичная продуктивность, деструкция органического вещества и факторы, их определяющие, в губах Белого моря // В кн.: Материалы Всесоюзной конференции по морской биологии. - Севастополь, 1988. - С. (соавт. Г.И.Несветова, В.А.Чугайнова).

50. Гидрохимические условия в водах губ Кандалакшского и Онежского заливов Белого моря // Тр. ПИНРО, 1989, т. . - С. (соавт. Г.И.Несветова, В.А.Чугайнова).

51. Многолетние флуктуации растворенного кислорода в Белом море как основа прогноза первичной продуктивности // В кн.: Материалы Всесоюзной конференции по рациональному использованию биологических ресурсов окраинных и внутренних морей СССР. - Пярну, 1989. - С. 75-76.

52. Органический углерод и особенности формирования органического вещества в губах Белого моря // Океанология, 1990, т. 30, № I. - С. 64-63 (соавт. С.С.Владимирский).

*Максимов*