

Проблемы изучения, рационального использования и охраны ресурсов Белого моря.
Материалы IX международной конференции
11-14 октября 2004 г., Петрозаводск, Карелия, Россия
Петрозаводск, 2005. С. 196-201.

БИОТРАНСФОРМАЦИЯ И КРУГОВОРОТ ОРГАНОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ В ЭКОСИСТЕМЕ БЕЛОГО МОРЯ: ОЦЕНКА НА ОСНОВЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.В. ЛЕОНОВ

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

Выполнено обобщение накопленных для Белого моря данных по гидрологии, гидрохимии и гидробиологии за период 1990-начало 2000-х гг. Выделены океанографические особенности водоема, определяющие развитие процессов трансформации биогенных веществ и формирование биопродуктивности экосистемы моря. С помощью усовершенствованной имитационной модели трансформации органических элементов для 8 районов Белого моря исследовано внутрigoдовое изменение концентраций органических и минеральных соединений N, P, Si, DOC и O₂, биомасс и продуктивности фито-, зоопланктона и макрофитов. Результаты модельных расчетов сравниваются со среднемноголетними прямыми наблюдениями.

A.V. Leonov. Biotransformation and turnover of organogenic substances in the White Sea ecosystem: assessment on the base of mathematical modeling // The study, sustainable use and conservation of natural resources of the White Sea. Proceedings of the IXth International Conference, October, 11-14, 2004. Petrozavodsk, Karelia, Russia. Petrozavodsk, 2005. P. 196-201.

Methodology of a system analysis and mathematical modeling was used for the generalization of accumulated data on the hydrology, hydrochemistry and hydrobiology of the White Sea to understand better the biohydrochemical conditions in the transformation of organic and biogenic substances in 8 marine areas. The hydroecological model was used in this study. It describes the transformations of organic and mineral substances of N, P and Si, as well as dissolved organic C and O₂ by biological community (heterotrophic bacteria, three groups of phytoplankton, two groups of zooplankton, and macrophytes). Water flows between areas were estimated with the help of hydrodynamic model. Intra-annual dynamics of chemical and biological compartments in different marine areas was computed on the collected long-term data defining seasonal changes of water temperature, light intensity, water transparency as well as flow rates in river mouths and nutrient concentrations in river water entering into the certain area of the sea. The emphasis was made on the verification of the simulation results to the field observations, the analysis of simulation results to reveal the peculiarity in the biomass development, the turnover time of biomass and chemical compartments (organic and mineral ones). Specific attention was given to the evaluation of balances for dissolved and particulate organic substances of N and P, and these balances were composed for each water area and for the whole sea.

Белое море омывает берега северо-запада России и служит моделью морей Арктического бассейна. Это небольшой внутриконтинентальный водоем, его площадь около $91 \cdot 10^3$ км², объем водных ресурсов моря - $5.4 \cdot 10^3$ км³, максимальная и средняя глубины - 340 и 67 м, соответственно (Комплексные исследования Белого моря, 1994). На данном этапе ставились следующие основные задачи изучения экосистемы моря в рамках общей проблемы исследования биогидрохимии морской среды: (1) обобщить на основе методологии системного анализа накопленные данные по гидрологии, гидрохимии и гидробиологии для лучшего понимания условий функционирования экосистемы моря; (2) выявить системные особенности изменения основных гидрохимических и биологических характеристик морской среды; (3) оценить комплексное влияние природных и антропогенных факторов на динамику показателей качества морской среды; (4) объяснить наблюдаемую изменчивость во времени и пространстве химических и биологических показателей состояния морской среды в результате влияния основ-

ных процессов (например, речной сток, водообмен с Баренцевым морем и др.); (5) провести биогидрохимический анализ динамики и потоков органических и биогенных веществ (БВ), формирующихся в экосистеме моря вследствие сложных взаимодействий природных процессов и антропогенного воздействия. Исследование проведено на основе усовершенствованной гидроэкологической модели биотрансформации органических и минеральных соединений N, P, Si, растворенного органического C (DOC) и O₂ (Леонов, Сапожников, 1997).

Вся акватория Белого моря была подразделена на 8 районов, учитывая особенности батиметрии моря и конфигурации береговой линии: (1) верхняя часть Кандалакшского залива (площадь $1.95 \cdot 10^3$ км², объем воды 71.2 км³, средняя глубина 36.5 м), (2) Онежский залив ($9.1 \cdot 10^3$ км², 136.5 км³, 15 м), (3) Двинский залив ($9.174 \cdot 10^3$ км², 450 км³, 49 м), (4) Мезенский залив ($5.9 \cdot 10^3$ км², 59 км³, 10 м), (5) район Соловецких о-вов ($7.2 \cdot 10^3$ км², 255.7 км³, 31.36 м), (6) Бассейн ($20.89 \cdot 10^3$ км², объем воды всего района и верхнего 20-и метрового слоя $2.883 \cdot 10^3$

и $0.399 \cdot 10^3 \text{ км}^3$ соответственно, 138 м), (7) Горло ($8.9 \cdot 10^3 \text{ км}^2$, 328.2 км^3 , 38 м) и (8) Воронка ($25.9 \cdot 10^3 \text{ км}^2$, $1.347 \cdot 10^3 \text{ км}^3$, 52 м) (Леонов и др., 2004). Заливы моря действуют подобно маргинальным фильтрам, задерживая существенную долю выносимых в море с притоками взвешенных и растворенных веществ.

Для районов 1-8 были обобщены и систематизированы «под модель» данные из литературы и экспедиционные материалы, характеризующие количественно среднемноголетние изменения для каждого месяца температуры и прозрачности воды, освещенности водной поверхности, фотопериода, водного режима (атмосферных осадков, водного стока рек), концентраций БВ в притоках и в акватории Баренцева моря, граничащей с Белым. Перенос водных масс на границах между районами оценивался с помощью термогидродинамической модели с учетом условий «пониженного переноса», при котором более рельефно выявляются свойства заливов моря, как маргинальных фильтров (Леонов, 2004).

Гидроэкологическая модель воспроизводит характерное для Белого моря внутригодовое изменение концентраций БВ - накопление зимой растворенных органических и минеральных компонентов, их снижение весной в период активизации гидробионтов, возрастание летом органических компонентов при развитии продукционных процессов и начало восстановления запасов БВ к концу года. Результаты моделирования показывают в целом соответствие имеющимся представлениям о пространственно-временной изменчивости концентраций БВ в Белом море (Леонов, 2004) и существенно дополняют имеющиеся в литературе сведения. Отличия во внутригодовой динамике концентраций БВ в разных районах моря связаны с особенностями изменения показателей состояния среды и с разным режимом поступления БВ в морскую среду из внешних источников, включая речной сток.

Адекватность результатов моделирования изучаемому объекту проверялась сравнением с наблюдениями в отдельных районах моря в разные сезоны 1998-2003 гг., включая выполненные в Международном Проекте (Кособокова, 2004). В таблице показаны диапазоны изменчивости и средние измеренные значения температуры воды, а также концентраций органических и БВ в Бассейне, Кандалакшском заливе, районе Соловецких о-вов, Горле (всего 8 съемок). В скобках приведены для сроков наблюдений рассчитанные на модели концентрации органических и БВ, которые в большинстве случаев одного порядка с наблюдаемыми концентрациями, хотя в определенные даты есть некоторые отличия в значениях сравниваемых параметров.

Для выявления соответствия между измеренными и расчетными концентрациями компонентов для каждой съемки подсчитывалось число случаев, когда расчетные значения «попадали» в диапазон наблюдений, а также были выше или ниже соответ-

ствующих экстремальных значений указанного диапазона на 0-25, 25-50, 50-75, 75-100 и >100%. Затем для каждой съемки подсчитывалось число случаев соответствия сравниваемых пар концентраций (наблюдения и расчет). Количество сравниваемых характеристик (наблюдений и расчетов) в разных съемках менялось от 5 до 11. Большая часть (54.7-57.1%) расчетных концентраций БВ лежит в диапазонах наблюдений, особенно при близких температурах воды (в момент наблюдений и расчетных среднемноголетних значений на дату съемки): лето 1998 г. (Бассейн), весна 2001 г. (Кандалакшский зал.) и зима 2003 г. (Горло). Также высокий процент (42.9-54.5%) соответствия данных при более холодных условиях в Бассейне (весна 1999 и 2001 гг.) в сравнении со среднемноголетними значениями температуры на дату съемки. Сравнение расчетов и наблюдений во всех съемках дает общее число случаев 60.8%, когда расчетные концентрации БВ соответствовали наблюдениям с учетом возможных минимальных отклонений от диапазона наблюдений в пределах ($\pm 0-25\%$). Это число возрастает до 72.4% при близких температурах воды. В целом расчеты свидетельствуют о приемлемой адекватности модели изучаемому водному объекту, так как наблюдения не использовались для идентификации модельных параметров при реализации модели. Поэтому результаты моделирования можно применять для характеристики условий трансформации БВ в экосистеме Белого моря, а внутригодовое изменение концентраций БВ и O_2 в отдельных районах моря отражает совокупный эффект всей заложенной в модель информации об изменении в течение года характеристик водной среды и поступления БВ из внешних источников.

Интегральным показателем состояния морской среды служит биомасса основных трансформаторов органических и БВ. Расчетные значения биомасс гидробионтов отражают специфику динамики концентраций и поступления БВ в разных акваториях моря. Сезонные особенности развития зоопланктона показывают их активизацию весной и в начале лета с максимумом биомассы в конце июня - начале июля. Максимум биомассы диатомовых водорослей $F1_N$ приходится на апрель-май, других групп фитопланктона ($F2_N$ и $F3_N$) - на летний период. Осенью развитие фитопланктона выражено слабее (Кособокова и др., 2003). Однако расчетная картина непрерывного внутригодового изменения биомассы диатомовых более сложна: в течение года есть несколько их максимумов с отличиями в динамике в разных районах моря (Леонов и др., 2004).

Расчетные удельные скорости роста биомассы $F1_N$ (k_{odF1} , сут⁻¹) меняются во времени в заливах в сходном режиме, но значения отличаются. Весной в заливах величины k_{odF1} наибольшие (0.660; 1.164; 0.845 и 1.843 сут⁻¹ соответственно в Кандалакшском, Онежском, Двинском и Мезенском заливах). У Соловецких о-вов весной значение k_{odF1} составляет

0.752 сут⁻¹, а в водах Воронки, Горла и Бассейна - соответственно 0.304; 0.150 и 0.050 сут⁻¹. В районах со сложной гидродинамикой изменения в течение года k_{odF1} существенно отличаются от картины изменчивости в заливах. Так у Соловецких о-вов в период зима-весна k_{odF1} меняется так же, как в заливах, а летом-осенью - как в открытой части моря. Средние значения k_{odF1} летом в разных районах моря меняются в диапазоне 0.065-0.129 сут⁻¹. В осеннюю активизацию диатомовых значения k_{odF1} в заливах 0.053-0.116 сут⁻¹ - ниже в 1.4-8.7 раза, чем весной. Моделирование подтверждает в целом вывод, что развитие диатомовых осенью выражено слабее (Кособокова и др., 2003).

Скорость роста биомассы зависит от параметров среды обитания (температура, освещенность и др.), а в Белом море существенно влияние гидродинамики. Для диатомовых водорослей влияние гидродинамики было оценено сравнением среднемесячных значений k_{odF1} и показателей водообмена на границах районов (q_w , км³/мес). В заливах связь k_{odF1} - q_w имеет низкий коэффициент корреляции ($r=0.1-0.434$). Обратная зависимость характеризует связи k_{odF1} с переносом между Бассейном и Двинским зал. ($r=-0.476$), а также переноса (и выноса) биомассы из района Соловков в Бассейн ($r=-0.704...-0.719$). Значения k_{odF1} в районе Соловков в большей мере связаны с водообменом с Онежским заливом ($r=0.467-0.532$). Для Бассейна моря наиболее важна прямая связь k_{odF1} с водообменом с Кандалакшским зал. ($r=0.675-0.694$), с Горлом ($r=0.415-0.464$), и обратная связь - с водообменом с районом Соловков ($r=-0.487 - -0.494$). Для Горла связь между указанными параметрами имеет коэффициенты корреляции $r=0.247-0.529$. Поступление вод из Бассейна и вынос в район Воронка наиболее важны для развития диатомовых в Горле моря. Значения k_{odF1} диатомовых в водах Воронки определяются в основном водообменом с Мезеньским зал. ($r=0.702-0.795$) и с Горлом ($r=0.618$), а обратная связь характеризует влияние водообмена с Баренцевым морем ($r=-0.550$). Обнаруженные связи характеризуют основные направления переноса биомасс $F1_N$ через границы районов.

Для биомасс гидробионтов и химических компонентов были оценены изменения в течение года мгновенного времени их оборота τ сут (отношение суммарной скорости изменения концентраций веществ на их концентрацию). Зимой процессы замедлены и значения τ для параметров наибольшие. При активизации гидробионтов весной за 2-5 суток развитие всех процессов ускоряется, и значения τ для химических и биологических компонентов резко снижаются. Летом условия развития гидробионтов оптимальны и величины τ минимальны. К концу года круговорот веществ в водной экосистеме замедляется, и устанавливаются значения τ , отвечающие комплексу физических, химических и биологических условий в море.

Влияние суточных колебаний освещенности на оборот биомассы фитопланктона в большей мере проявляется в летний сезон, а у зоопланктона - оно выражено во все сезоны, однако летом амплитуда колебаний τ у него выше, чем зимой. У $F1_N$ самая низкая годовая амплитуда изменчивости τ (в среднем 2.64-14.98 сут), у $F2_N$ она 12.99-316.6, у $F3_N$ - 8.34-287.5, у $Z1_N$ - 3.65-34.33, у $Z2_N$ - 3.95-41.28, у MK_N - 5.77-608.7, у $B1_N$ - 3.28-42.55 сут.

Для границ между районами моря оценено влияние показателя водообмена q_w на время оборота биомассы диатомовых водорослей τ_{FIN} . В заливах значения τ_{FIN} связаны обратными зависимостями с показателями водообмена q_w с соседними районами. К таковым можно отнести в Кандалакшском заливе связи τ_{FIN} и q_w с Бассейном ($r=-0.520$), в Онежском заливе τ_{FIN} и q_w с районом Соловков ($r=-0.520...-0.710$), в Мезеньском заливе τ_{FIN} и q_w с Воронкой ($r=-0.640...-0.730$). В районе Соловков значения τ_{FIN} обратно связаны с q_w с Онежским заливом ($r=-0.710...-0.760$), но связь τ_{FIN} - q_w с Бассейном прямая ($r=0.892-0.897$). В Бассейне значение τ_{FIN} обратно связано с q_w с Горлом ($r=-0.520...-0.580$), а связь τ_{FIN} - q_w с Соловками - прямая ($r=0.766-0.775$). Значения τ_{FIN} для Горла и Воронки определяются соответственно водообменом с Бассейном ($r=-0.810...-0.860$) и с Мезеньским заливом ($r=-0.650...-0.760$).

Значения τ растворенных органических компонентов (τ_{DOC} , τ_{DON} , τ_{DOP}) свидетельствуют об очень медленном их круговороте зимой. В заливах значения τ_{DOC} меняются в среднем в диапазоне 431.6-966.2 сут, τ_{DON} - 377.2-791.9 сут, τ_{DOP} - 328.5-798.8 сут. Зимой медленнее круговорот DOC в Двинском заливе, а DON и DOP - в Онежском заливе; быстрее оборот DOC в Мезеньском заливе, а DON и DOP - в Кандалакшском заливе. В открытых районах 5-8 оборот органических компонентов зимой замедленный: средние значения τ_{DOC} здесь в пределах 648.6-2607.3 сут, τ_{DON} - 204.8-592.0, τ_{DOP} - 175.3-531.7 сут. В заливах переход от зимы к весне, а затем к лету происходит плавно и в характерные периоды, и значения τ_{DOC} весной в среднем составляют 134.2-209.4 сут, τ_{DON} - 51.7-158.1, τ_{DOP} - 112.4-315.9 сут. Весной оборот DOC, DON и DOP быстрее соответственно в Двинском, Онежском и Кандалакшском заливах, и напротив он медленнее соответственно в Онежском, Кандалакшском и Мезеньском заливах.

Летом значения τ_{DOC} в водах заливов в среднем колеблются в пределах 49.85-79.65 сут, τ_{DON} - 4.60-14.28, τ_{DOP} - 0.58-1.01 сут. Ускорен оборот в Двинском заливе, медленнее оборот DOC и DOP в Онежском заливе, а DON - в Кандалакшском заливе. В районах 5-8 на стыке зимы и весны значения τ меняются очень быстро: за ~5 сут устанавливается темп круговорота органических компонентов, типичный для лета - начала осени. Значения τ_{DOC} , τ_{DON} и τ_{DOP} для этого периода меняются в пределах 31.53-64.14, 2.10-3.36 и 0.31-0.73 сут. Быстрее, чем в зали-

вах, оборот DOC летом в Воронке, а DON и DOP - в Бассейне. В районе Соловков оборот органических веществ летом медленнее, чем в Бассейне, Горле и Воронке. Здесь быстрее, чем в заливах, темп оборота DON, а оборот DOP - такой же, как в заливах.

Осенью активность биоты снижается и оборот БВ замедляется. В заливах средние значения τ_{DOC} , τ_{DON} и τ_{DOP} возрастают соответственно до 185.7-467.0, 57-71-111.7 и 38.03-65.96 сут. Оборот этих компонентов интенсивнее осенью в Мезеньском заливе, медленнее оборот DOC и DON в Онежском заливе, а DOP - в Двинском заливе. В районах 5-7 значения τ_{DOC} , τ_{DON} и τ_{DOP} осенью меняются как и в заливах, и составляют соответственно 158.0-430.9, 51.68-79.32 и 37.80-48.76 сут. Условия осенью отличаются в районе Воронка: здесь оборот DOC, DON и DOP продолжается быстрыми темпами (соответственно за 7.17, 14.87 и 14.94 сут) и интенсивнее, чем в заливах (соответственно в 25.9-65.6, 3.9-7.5 и 2.5-4.4 раза).

Расчеты показывают, что поступление органических веществ из внешних источников и условия образования за счет процессов первичного продуцирования в районах моря существенно различаются. Поэтому режим их трансформации и круговорота должен в каждой акватории изучаться по индивидуальному плану.

Зимой значения τ_{NH_4} , τ_{NO_2} , τ_{NO_3} , τ_{DIP} и τ_{DISi} меняются в районах моря соответственно в диапазонах 7.63-11.12, 6.39-7.66, 7.81-185.8, 106.9-448.0 и 24.03-310.8 сут. Зимой быстрее оборот минеральных фракций БВ в Бассейне, замедлен оборот NH_4 и NO_2 в районе Соловков, NO_3 и $DISi$ - в Онежском заливе, DIP - в Горле. От зимы к весне темп круговорота минеральных форм возрастает, а с наступлением весны за ~5-7 сут в экосистеме моря устанавливаются скорости оборота минеральных веществ, характерные для лета. Летом значения τ_{NH_4} , τ_{NO_2} , τ_{NO_3} , τ_{DIP} и τ_{DISi} колеблются в пределах 0.31-3.85, 0.14-3.01, 0.01-8.14, 0.01-0.1, 3.98-8.44 сут соответственно. Летом в Бассейне быстрее оборот DIP и $DISi$, в Двинском заливе - NH_4 , в Воронке - NO_2 . Замедлен летом оборот NH_4 , NO_2 и NO_3 в Горле, DIP и $DISi$ - в Мезеньском заливе. Осенью темп оборота минеральных фракций ослабевает, и средние значения τ_{NH_4} , τ_{NO_2} , τ_{NO_3} , τ_{DIP} и τ_{DISi} меняются соответственно в пределах 0.99-10.35, 3.17-7.53, 2.59-40.07, 14.56-42.39 и 55.65-122.4 сут. Осенью в Воронке ускорен оборот NH_4 , NO_2 , NO_3 и DIP , а в Бассейне - $DISi$. В Мезеньском заливе медленнее оборот NH_4 , в Онежском заливе - NO_2 и NO_3 , а в Двинском заливе - DIP и $DISi$. Таким образом, значения τ для биологических и химических компонентов существенно меняются во времени и отличаются в разных районах моря.

По результатам расчетов и оцененным внутренним и внешним потокам веществ для районов 1-8 и моря в целом были составлены годовые балансы растворенных и взвешенных фракций N (DON, ND) и P (DOP, PD). Общее поступление DON в экоси-

стему моря составляет $11585.7 \cdot 10^3$ т N. Главными источниками DON служат распад ND ($4761.9 \cdot 10^3$ т N или 41.1%), выделения диатомовых ($3364.8 \cdot 10^3$ т N или 29%) и бактерий ($1366.8 \cdot 10^3$ т N или 14.8%). Вклад внешних источников в баланс DON составляет $515.7 \cdot 10^3$ т N (или 4.5%). Общие потери DON составляют $11752.0 \cdot 10^3$ т N, в основном на потребление бактериями ($9385.0 \cdot 10^3$ т N или 79.9%) и макрофитами ($2266.7 \cdot 10^3$ т N или 19.3%). Потери DON в морской системе на $156.3 \cdot 10^3$ т N выше, чем его поступление, что дает малую невязку (1.4%) его баланса для моря в целом.

Поступление ND в районы 1-8 и в море в целом составляет соответственно $(502.9-7526.8) \cdot 10^3$ и $25405.0 \cdot 10^3$ т N. Поступление ND из внешних источников в разные районы составляет 0.74-8.08%. Основное количество ND создается диатомовыми (16.3-37.2%), зоопланктоном (17.2-35.7%) и бактериями (19.9-33.6%). В целом для моря вклад диатомовых, зоопланктона и бактерий в создание ND составляет 27, 31.5 и 28.5% соответственно. Общие потери ND в районах 1-8 и в море в целом оценены в $(516.6-7642.3) \cdot 10^3$ и $24633.6 \cdot 10^3$ т N соответственно. В районах 1-8 при седиментации ND, разложении до DON, потреблении бактериями и зоопланктоном расходуется соответственно 8-24.1, 6.3-33, 31.6-63.7 и 10.8-24.7% ND. В море в целом потребление ND бактериями и зоопланктоном оценено в $13481.7 \cdot 10^3$ т N (54.7%) и $4564.0 \cdot 10^3$ т N (18.5%), а потери ND при распаде до DON и седиментации составляют $4761.9 \cdot 10^3$ т N (19.3%) и $1824.1 \cdot 10^3$ т N (7.4%). Общее поступление ND в экосистему моря выше на $771.4 \cdot 10^3$ т N его потерь, а дисбаланс ND составляет 3%.

Общее поступление DOP в районы 1-8 и в море в целом составляет соответственно $(103.7-1841.0) \cdot 10^3$ и $5539.3 \cdot 10^3$ т P, поступление из внешних источников невелико (0.2-1.6%). За счет внутренних процессов - распада PD до DOP и выделения организмов, образуется соответственно 31.7-47.1 и 30.3-65.3% DOP. В целом в море при распаде PD образуется в форме DOP $2016.8 \cdot 10^3$ т P (36.4%), выделение микроорганизмами DOP составляют $3459.8 \cdot 10^3$ т P (62.5%). Общие потери DOP в районах 1-8 оценены в $(103.6-1816.1) \cdot 10^3$ т P, а для всего моря - $5390.5 \cdot 10^3$ т P. Основные траты DOP происходят за счет потребления организмов. Во всех районах и в море в целом количество образованного DOP выше его потерь соответственно на $(0.1-25.0) \cdot 10^3$ и $148.8 \cdot 10^3$ т P. Невязка баланса DOP для районов 1-8 составляет 0.1-5.2%, а для моря в целом 2.7%.

Поступление PD в районы 1-8 и в море в целом соответственно составляет $(127.0-2057.7) \cdot 10^3$ и $5818.2 \cdot 10^3$ т P. Из внешних источников поступает 0.1-0.9% PD, а основное его количество образуется при отмирании биомасс: диатомовых (17.4-54.4%), зоопланктона (26.8-41.0%), макрофитов (14.2-46.1%). В целом в море создается в форме PD при отмирании диатомовых $2409.2 \cdot 10^3$ т P (41.4%),

Таблица. Сравнение условий по температуре воды, наблюдаемым в разных съемках (данные ВНИРО) и расчетным концентрациям БВ (над чертой – диапазон измеренных величин, под чертой – средние по наблюдениям значения; в скобках – данные расчетов на модели)

Параметр	Акватория Бассейна					Кандалакшский	Район Соловецких	Район Горло
	25-28.VI	28.V-06.VI	21-27.XI	27.V-02.VI	19-25.IV	27.V-02.VI 2001	19-25.IV	19-25.IV
	1998 Лето	1999 Весна	1999 Осень	2001 Весна	2003 Зима	Весна	2003 Зима	2003 Зима
T, °C	<u>4.1 - 8.1</u> 6.32 (8.0)	<u>1.3 - 3.2</u> 2.08 (4.8)	<u>0.5 - 1.4</u> 0.95 (0.67)	<u>0.61 - 3.01</u> 1.67 (4.4)	<u>-1.43 - 0.34</u> -0.58 (0.55)	<u>1.57 - 5.21</u> 3.07 (4.4)	<u>-0.95 - -0.72</u> -0.84 (0.2)	<u>-1.52 - -0.81</u> -1.27 (-1.0)
O ₂ , мг / л	<u>9.82 - 12.26</u> 11.18 (11.87)	<u>8.88 - 13.01</u> 11.78 (12.83)	<u>11.62 - 11.81</u> 11.67 (14.16)	<u>10.68 - 12.03</u> 11.34 (13.06)	<u>12.24 - 12.62</u> 12.45 (14.49)	<u>10.31 - 11.58</u> 10.78 (11.67)	<u>12.24 - 12.43</u> 12.33 (14.53)	<u>12.18 - 12.51</u> 12.33 (14.58)
PO ₄ , мкг P/ л	<u>0.31 - 14.26</u> 6.27 (0.02)	<u>0.31 - 13.95</u> 5.55 (2.8)	<u>14.9 - 16.7</u> 15.7 (2.5)	<u>1.86 - 6.82</u> 3.44 (4.8)	<u>22.0 - 26.4</u> 23.6 (16.5)	<u>2.17 - 8.37</u> 5.63 (4.2)	<u>33.1 - 33.8</u> 33.5 (21.3)	<u>18.3 - 26.4</u> 20.7 (10.8)
NO ₂ , мкг N/л	<u>0 - 1.26</u> 0.34 (0.03)	<u>0.14 - 1.12</u> 0.55 (0)	<u>0 - 0.98</u> 0.49 (0.03)	<u>0 - 4.06</u> 1.12 (0)	<u>0.63 - 1.26</u> 0.82 (0.02)	<u>0 - 4.62</u> 1.46 (0.01)	<u>0.63 - 0.74</u> 0.69 (1.5)	<u>0.01 - 0.74</u> 0.39 (3.2)
NO ₃ , мкг N/л	<u>0 - 35.7</u> 4.66 (0)	<u>1.26 - 77.6</u> 23.04 (0)	<u>72.9 - 80.4</u> 76.1 (0.05)	<u>0 - 4.06</u> 1.48 (0)	<u>80.9 - 106.4</u> 95.1 (0.02)	<u>0 - 51.8</u> 14.2 (0)	<u>105 - 109</u> 107 (71.1)	<u>65.2 - 103.6</u> 84.3 (34.8)
NH ₄ , мкг N/л	<u>14.3 - 40.3</u> 27.1 (8.1)	<u>7.84 - 12.6</u> 9.73 (0.4)	<u>20.8 - 45.5</u> 29.4 (0.1)	<u>7.0 - 13.2</u> 9.1 (0.4)	<u>3.8 - 5.5</u> 4.6 (0.04)	<u>8.96 - 12.5</u> 11.1 (0.45)	-	<u>2.7-5.2</u> 3.7 (4.4)
SiO ₃ , мкг Si/л	<u>45 - 642</u> 180 (927)	<u>106 - 280</u> 187 (720)	<u>280 - 333</u> 312 (243)	<u>0 - 160</u> 58 (645)	<u>286 - 518</u> 428 (269)	<u>27 - 1523</u> 568 (575)	<u>577 - 669</u> 623 (219)	<u>314 - 462</u> 380 (436)
P _{tot} , мкг P/л	<u>12.7 - 92.7</u> 33.8 (58.0)	<u>14.9 - 41.5</u> 28.9 (47.9)	<u>35.6 - 66.4</u> 37.8 (27.3)	-	<u>26.4 - 54.9</u> 39.9 (44.8)	-	-	<u>25.4 - 45.3</u> 33.8 (32.2)
N _{tot} , мкг N/л	<u>178 - 392</u> 257 (501)	<u>311 - 1002</u> 720 (625)	<u>378 - 535</u> 444 (257)	-	<u>236 - 569</u> 349 (666)	-	-	<u>180 - 501</u> 289 (419)
P _{org} , мкг P/л	<u>10.2 - 89.0</u> 27.5 (30.2)	<u>14.3 - 36.9</u> 24.1 (33.9)	<u>20.5 - 39.7</u> 26.1 (58.6)	-	<u>0 - 32.9</u> 16.3 (27.0)	-	-	<u>2.5 - 26.4</u> 13.1 (21.2)
N _{org} , мкг N/л	<u>134 - 359</u> 224 (268)	<u>295 - 987</u> 692 (473)	<u>275 - 438</u> 338 (198)	-	<u>141 - 465</u> 249 (461)	-	-	<u>75 - 389</u> 188 (380)
DOC, мг C/л	<u>2.31 - 5.88</u> 4.20 (6.85)	<u>3.32 - 8.07</u> 5.17 (7.03)	<u>2.16 - 4.63</u> 3.33 (5.16)	<u>2.72 - 4.05</u> 3.56 (7.04)	<u>1.43 - 4.79</u> 3.52 (6.89)	<u>3.21 - 8.66</u> 4.64 (9.54)	-	<u>2.19 - 5.68</u> 3.56 (6.26)

зоопланктона $2171.2 \cdot 10^3$ т Р (37.3%) и макрофитов $948.5 \cdot 10^3$ т Р (16.3%). Потери РД в районах 1-8 и в море в целом составляют $(131.0-1905.6) \cdot 10^3$ т Р и $5633.5 \cdot 10^3$ т Р: на седиментацию расходуется 6.9-30.9%, на распад до DOP – 30.7-51%, на потребление бактериями и зоопланктоном – 0.8-19.6 и 28.2-49.7% соответственно. Общие потери РД в море на седиментацию составляют $652.1 \cdot 10^3$ т Р (11.5%), на распад до DOP - $2016.8 \cdot 10^3$ т Р (35.7%), на потребление бактериями – $525.9 \cdot 10^3$ т Р (9.3%) и зоопланктоном - $2420.6 \cdot 10^3$ т Р (42.8%). Общее поступление РД в экосистему моря выше его потерь на $164.7 \cdot 10^3$ т Р (дисбаланс РД – 2.8%).

Исследование выполнено в рамках международного проекта INCO-COPERNICUS (грант ICACT-2000-10053), а также проекта РФФИ (грант 03-05-64505).

Литература

- Комплексные исследования Белого моря. 1994. Ред. В.В. Сапожников. М.: ВНИРО. 123 с.
- Кособокова К.Н., Пантюлин А.Н., Рахор А. и др. Комплексные океанографические исследования в Белом море в Апреле 2003 // Океанология, 2004. Т. 44. № 2.
- Леонов А.В., Сапожников В.В. 1997. Биогидрохимическая модель трансформации органических веществ и ее использование для расчета первичной продукции в экосистеме Охотского моря // Сб. Комплексные исследования Охотского моря. М.: ВНИРО. С. 143-166.
- Леонов А.В., Филатов Н.Н., Здорвеннов Р.Э., Здорвеннова Г.Э. 2004. Особенности функционирования экосистемы Белого моря: исследование на основе математической модели трансформации органических веществ // Вод. ресурсы. Т. 31. №5.