



На правах рукописи

ЧИЧЕРИНА (Стыгар) Оксана Викторовна

**БИОГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ  
СОЕДИНЕНИЙ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
В ЭКОСИСТЕМЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ:  
исследование по результатам  
математического моделирования**

25.00.28 - океанология

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидат географических наук

Москва, 2005

Работа выполнена в Институте океанологии им. П.П.Ширшова Российской академии наук (ИО РАН)

Научный руководитель: доктор химических наук

А.В.Леонов  
(Институт Океанологии РАН)

Официальные оппоненты: доктор географических наук

В.В.Сапожников  
(Всероссийский НИИ Рыбного Хозяйства и Океанографии)

доктор физико-математических наук

А.К.Амбросимов  
(Институт Океанологии РАН)

Ведущая организация: Институт географии Российской академии наук

Защита состоится 24 мая 2005 г. в 14 час. на заседании Диссертационного Ученого Совета К.002.239.01 при Институте океанологии им. П.П.Ширшова РАН (117997, г. Москва, Нахимовский пр. 36)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН.

Автореферат разослан 14 сентября 2005 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного Ученого Совета К.002.239.01  
Кандидат географических наук

(С.Г.Панфилова)

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Каспийское море - уникальный водный объект, на долю которого приходится 80% общего вылова рыбы во внутренних водоемах России и ~90% мировых запасов осетровых. Поэтому исследование процессов, формирующих состояние водных ресурсов Каспия (включая тенденции его загрязнения), гидрохимические основы и условия формирования биопродуктивности моря имеет научный и практический интерес.

Замкнутое внутриматериковое положение Каспия определяет значительную зависимость состояния его экосистемы от природных (сток рек, осадки, испарение, тепловой режим) и антропогенных факторов (количество и качество речного стока, хозяйственная деятельность на акватории и водосборной территории водоема). Следствие влияния указанных факторов - высокий динамизм гидролого-гидрохимического режима моря, его уровня, интенсивности развития продукционно-деструкционных процессов, загрязнения вод, донных осадков и гидробионтов, которые в целом определяют современное экологическое состояние водоема.

Полевые исследования состояния экосистемы Каспийского моря проводятся уже >50 лет. Однако, многие процессы и механизмы, определяющие ее трансформацию и изменения, к сожалению, до сих пор изучены слабо. Поэтому актуальны такие методы изучения состояния водоемов, которые позволяют выявить закономерности изменения морской экосистемы, количественно оценить внешние и внутримассовые процессы, определяющие ее продукционные возможности, а также способность морской среды в осуществлении процессов трансформации и круговорота биогенных веществ (БВ), и в целом к самоочищению водной среды. Такими являются методы системного анализа и математического моделирования.

**Цель работы:** методами системного анализа и математического моделирования исследовать закономерности трансформации и круговорота соединений биогенных элементов (P, N, Si) в экосистеме Каспийского моря, количественно оценить процессы, определяющие ее продукционный потенциал, величину и структуру.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели было необходимо решить следующие задачи:

- обобщить информацию о состоянии экосистемы Каспийского моря и современных тенденциях ее изменения;
- систематизировать существующие математические модели морских экосистем и выбрать наиболее полно описывающую трансформацию БВ в морской среде;
- обеспечить модель входными гидрометеорологическими, гидрохимическими и гидробиологическими данными для осуществления расчетов внутригодовой динамики химических и биологических характеристик морской среды;
- убедиться в адекватности выбранной модели исследуемому объекту путем сравнения расчетных концентраций БВ и среднесезонных данных;
- с помощью моделирования выявить биогеохимические особенности функционирования экосистемы Каспийского моря: 1. рассчитать внутригодовую динамику химических и биологических характеристик морской среды; 2. оценить внешние и внутренние потоки БВ и составить их баланс; 3. оценить интенсивность продукционно-деструкционных процессов и составить баланс органических веществ (ОВ) для отдельных акваторий моря; 4. оценить условия естественного самоочищения вод Каспийского моря на основе анализа пространственной и временной изменчивости концентраций и соотношений БВ, показателей продукции гидробионтов и данных о поступлении БВ из внешних источников.

*Методы исследований.* Систематизация экологических данных по Каспийскому морю для оценки его современного состояния и тенденций изменения экосистемы выполнены с помощью информационной геоэкологической модели, разработанной в ИГ РАН [Фашук, 1997].

Биогидрохимические условия функционирования экосистемы Каспийского моря исследовались на усовершенствованной имитационной модели трансформации БВ [Леонов, Сапожников, 1997]. Расчеты на модели выполнялись с шагом 0.1 сут. методом Рунге-Кутты-4 для календарного года (1 января - 31 декабря).

*Информационная база исследования.* Для решения поставленных задач было проанализировано ~100 монографий и статей о состоянии экосистемы Каспийского моря и тенденциях ее изменения, а также >100 публикаций о существующих математических моделях.

Необходимые для расчетов величины среднемесячных значений расходов рек - притоков Каспийского моря, а также данные по температуре, освещенности и прозрачности вод брались из [Катунии, 1976]; по атмосферным осадкам - из [Архипова и др., 1970]. Значения фотопериода (отношение продолжительности светового дня к 24 ч.) вычислялись для каждого месяца на модели DAYLE [Straskraba, Gnauck, 1985]. Расходы воды на границах акваторий моря, обеспечивающих перенос веществ внутри водоема, оценивались сначала по рекомендациям А.Л.Бондаренко [1993], а впоследствии вычислялись на гидродинамической модели. Для настройки гидроэкологической модели принята норма внутригодового распределения естественного годового стока Волги за 1881-1990 гг. (250 км<sup>3</sup>). Концентрации БВ в атмосферной влаге оценивались по литературе [Бруевич, 1941; Листенгаген, 1967; Скопинцев и др., 1971; Семенов и др., 1966]. Соотношения начальных концентраций биомасс гидробионтов в единицах С, Si, N и P задавались с учетом имеющихся в литературе оценок [Биогеохимия океана. 1983; Виноградов, 1937].

*Научная новизна результатов.* В процессе решения поставленных задач впервые:

- получены количественные оценки внутригодовой совместной динамики: растворенных минеральных компонентов N [аммонийного (NH<sub>4</sub>), нитритного (NO<sub>2</sub>), нитратного (NO<sub>3</sub>)], Si (DSi) и P (DIP); органических компонентов С (DOC), N (DON) и P (DOP); взвешенных детритных компонентов N (ND) и P (PD), а также растворенного O<sub>2</sub> в 10-и акваториях Каспийского моря;

- оценены внутренние потоки соединений N и P, формирующиеся в экосистеме за счет процессов биотрансформации БВ и учитывающие основные функции гидробионтов (потребление веществ; выделение продуктов обмена, отмирание биомассы);

- рассчитаны показатели биопродукции (для бактерий, диатомовых, зеленых и синезеленых водорослей, растительноядного и хищного зоопланктона) и показана их внутригодовая изменчивость;

- составлен баланс аллохтонных и автохтонных потоков ОВ для акваторий Каспийского моря, оценен относительный вклад в нем составляющих, обеспечивающих поступление (первичная продукция, вынос с речным стоком, атмосферными осадками, адвекция с соседних акваторий, разложение детрита) и потери (продукция зоопланктона, потребление бактериями, седиментация, вынос в соседние акватории) компонентов ОВ.

*Указанные положения выносятся на защиту.*

*Практическая значимость исследования.* Результаты исследования могут быть использованы для характеристики экологического состояния экосистемы Каспийского моря, прогноза качества вод, способности водной среды к самоочищению, прогнозов тенденций возможных изменений биопродуктивности водоема. Рассчитанные поступления БВ, установленные особенности характера их трансформации и круговорота в морской среде могут служить основой для планирования рациональной хозяйственной и природоохранной деятельности в бассейне Каспийского моря.

*Апробация работы.* Результаты исследований были представлены на:

Всероссийской научной школе "Математические методы в экологии" (Петрозаводск, 2001), VIII съезде Гидробиологического общества РАН (Калининград, 2001), Международной научно-практической конференции "Прибрежное рыболовство -XXI в." (Южно-Сахалинск, 2001), VI Международном Конгрессе по математическому моделированию (Н. Новгород, 2004).

*Публикации.* По теме диссертационной работы опубликовано 9 научных работ, в том числе 6 статей и 3 тезисов докладов.

*Структура работы.* Диссертация состоит из Введения, 5-и глав, Заключения и Списка литературы (277 наименований, из них 40 работ на иностранных языках). Объем исследования 189 страниц текста, включая 23 рисунка и 32 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *Введении* показана и обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и основные задачи диссертационной работы, отражена научная новизна и практическая значимость выполненного исследования и полученных результатов.

### *Глава 1. СОСТОЯНИЕ ЭКОСИСТЕМЫ КАСПИЙСКОГО МОРЯ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ЕЕ ИЗМЕНЕНИЯ*

В первой главе по литературным данным выполнен системный географо-экологический анализ состояния экосистемы Каспийского моря. Проанализированы основные природные факторы и процессы, определяющие устойчивость функционирования экосистемы и ее биопродуктивность. В частности, охарактеризованы физикогеографические (речной сток, колебания уровня моря, донные осадки); гидрометеорологические (атмосферная циркуляция, тепловой фон и ледовые условия, режим изменения солености морской воды, динамика водных масс) и биогидрохимические (продукционно-деструкционные и анаэробные процессы) особенности экосистемы моря.

Обобщены данные об антропогенной нагрузке на экосистему Каспийского моря. Проведен анализ информации о хозяйственной деятельности (зарегулирование и изменение качества речного стока, разработка морских месторождений нефтяных углеводородов) и оценены их экологические последствия (современное загрязнение вод и донных осадков, содержание загрязняющих веществ в морских гидробионтах).

Специальное внимание обращено на анализ состояния биологических компонентов экосистемы Каспийского моря: популяций фито- и зоопланктона, зообентоса и нектона. По сравнению с 1930-и гг. в последние годы отмечено резкое сокращение уловов промысловых рыб: полупроходных (вобла, лещ, судак, сазан) - в 5 раз; речных (сом, щука, красноперка, линь) - в 3 раза, сельди - в 40 раз. Общий вылов рыбы в водоеме (0.3-0.5 млн. т) остается без изменения за счет резкого увеличения (в 30 раз) вылова кильки. Общая биомасса зообентоса - основных объектов питания осетровых, сократилась за это время в 4 раза, а солоновато-водных моллюсков - в 10 раз. Оценены последствия вселения в водоем гребневика Мнемониса.

Завершается глава 1 анализом результатов натурных исследований состояния Каспийского моря, проведенных в последние годы [Сапожников, 1996; Седов и др., 1999; Арпе и др., 2000; Катунин и др., 2000 а; 2000 б; Сапожников, Метрсуели. 2000; Сапожников и др., 2000; Агатова и др., 2001; Метрсуели, Михайловский, 2000]. На основе этого были предложены качественная схема механизмов и возможные направления трансформации экосистемы моря. Отмечено, что именно биогидрохимические процессы в водоеме наиболее полно отражают изменения его экосистемы под влиянием природных и антропогенных воздействий. Сделан вывод, что математическое моделирование - одно из перспективных направлений анализа и обобщения рассмотренных биогидрохимических причинно-следственных связей, поиска новых экологических зависимостей, формирующихся в морской экосистеме, прогноза тенденций будущих изменений условий среды и продуктивности водоема.

## *Глава 2. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МОРСКИХ ЭКОСИСТЕМ*

В этой главе проанализированы имеющиеся модели морских экосистем, рассмотрены их особенности, зависящие от цели моделирования (имитационные и качественные модели), способа реализации (детерминистические, стохастические, стохастико-детерминистические) и способа представления пространственной структуры явления (точечные, резервуарные и непрерывные). Исследуются задачи, решавшиеся с помощью математического аппарата, способы описания в рассмотренных моделях морских биохимических процессов.

Обращено внимание на применяемые гидродинамические модели для решения задач контроля состояния и загрязнения морских экосистем. Отсутствие в этих моделях биогидрохимического блока обедняет возможности их применения для оценки состояния морских экосистем.

Систематизируется информация о существующих имитационных моделях, с помощью которых можно аналитически и численно исследовать происходящие в водных экосистемах изменения важнейших химико-биологических показателей [Вавилин, 1986; Домбровский и др., 1990; Цхай, 1995; Леонов, 1999 и др.] Здесь обосновывается выбор экологической модели для исследования поставленных в диссертации задач. Наиболее полно условия функционирования экосистемы Каспийского моря и процессов трансформации соединений биогенных элементов (С, N, P, Si, O) в морской среде может воспроизвести гидроэкологическая модель, которая была испытана при изучении экосистемы Охотского моря [Леонов, Сапожников, 1997].

## *Глава 3. ГИДРОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦИИ СОЕДИНЕНИЙ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ЭКОСИСТЕМЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ*

Здесь в общем виде описывается выбранная для изучения условий функционирования экосистемы Каспийского моря имитационная модель трансформации органических веществ - соединений N, P, Si, растворенного органического C (DOC) и O<sub>2</sub> [Леонов, Сапожников, 1977]. Рассматривается логическая схема модели - взаимосвязанные биогидрохимические циклы N и P, а также описаны важнейшие потоки трансформации Si, DOC и O<sub>2</sub> в двуслойной водной экосистеме. Воспроизводимая моделью биотрансформация соединений биогенных элементов осуществляется сообществом микроорганизмов: гетеротрофные бактерии (B) потребляют органические соединения и в процессе метаболизма образуют пул минеральных веществ; фитопланктон (F1 - диатомовые, F2 - зеленые и F3 - синезеленые водоросли) утилизирует

минеральные вещества и формирует запас ОВ в водной среде; зоопланктон (Z1 - растительноядный и Z2 - хищный) регулируют динамику организмов сообщества и своей активностью влияет на развитие продукционно-деструкционных процессов.

Описание процессов биотрансформации веществ в модели основано на имеющихся представлениях о круговороте вещества в водной среде - утилизации соответствующими группами микроорганизмов отдельных субстратов и образовании своей биомассы, выделении продуктов метаболизма и формировании детрита. Фактически модель воспроизводит переходные процессы в водной среде и описывает реакцию водной экосистемы на изменения условий среды обитания или на изменение хотя бы одного из

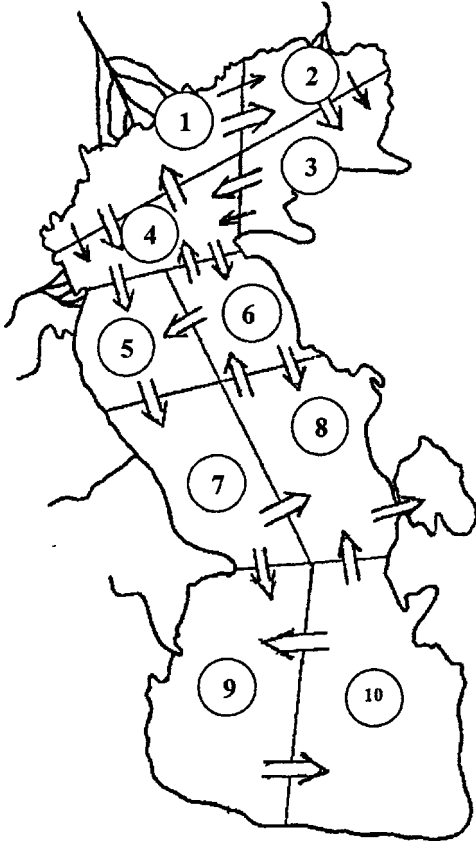


Рис.3.1 Подразделение Каспийского моря на акватории 1-10 (стрелки  $\rightarrow$  показывают перенос пресных вод, стрелки  $\Rightarrow$  показывают перенос морских вод на границах выделенных акваторий).

учитываемых в модели факторов (водный режим, температура, освещенность водной среды, биогенная нагрузка). Переходные состояния рассматриваются в модели для каждой из 10-и, выделенных внутри моря, акваторий (рис. 3.1).

Рассмотренная общая схема уравнений модели описывает исследуемые биогидрохимические процессы. В целом модель содержит 226 уравнений [Леонов, Сапожников, 1997]. Изменение концентраций компонентов  $C(ijk)$  (в мг Элемента/л) в модели задано в общем виде уравнением:

$$dC(ijk)/dt = R(ijk) + \text{LOAD}(ijk) + \text{TR}(ijk) \quad (1)$$

где  $i$  - счетчик выделенных акваторий;  $j$  - счетчик слоев ( $j=1$ );  $k$  - счетчик компонентов модели;  $R(ijk)$ ,  $\text{LOAD}(ijk)$ ,  $\text{TR}(ijk)$  - скорости изменения концентраций веществ соответственно за счет взаимодействий химических и биологических компонентов, поступления веществ из внешних источников и пространственного (горизонтального И вертикального) переноса (все имеют размерность мг Элемента/(л  $\times$  сут)).

Система уравнений описывает:

- пул биогенных веществ (C, N, P, Si) для организмов рассматриваемого в модели сообщества (всего 16 уравнений);
- скорости потребления отдельных субстратов: гетеротрофными бактериями, фито- и зоопланктоном (соответственно, 29 и 40 уравнений);
- функции для коррекции на температуру и освещенность констант скоростей потребления субстратов гидробионтами (11 уравнений);
- удельные скорости метаболических выделений и выделительные активности организмов (31 уравнение.);
- удельные скорости отмирания организмов (15 уравнений.);
- суммарные скорости изменения биомасс микроорганизмов за счет взаимодействий химических и биологических компонентов (15 уравнений);
- суммарные скорости изменения концентраций биогенных веществ в водной среде (14 уравнений) и в осадках (9 уравнений);
- скорости поступления веществ из внешних источников (14 уравнений).

Модель также рассчитывает скорости изменения концентраций биогенных веществ за счет пространственного горизонтального и вертикального переноса, вертикального обмена с нижележащим слоем, поступления веществ с речным стоком, переноса из соседних акваторий в пределах морской экосистемы и потери веществ при выносе водным потоком через внешние границы морской экосистемы.

Уравнения последнего блока учитывают:

- расходы воды притоков в соответствующие акватории моря ( $\text{км}^3/\text{мес}$ );
- расходы воды на внешних границах моря для расчетов выноса веществ из экосистемы моря ( $\text{км}^3/\text{мес}$ );
- составляющие вертикального переноса веществ ( $\text{км}^3/\text{мес}$ );
- расходы воды на границах между отдельными акваториями моря ( $\text{км}^3/\text{мес}$ );
- мгновенные концентрации веществ в соответствующих акваториях моря в рассматриваемом слое воды (мг Элемента/л);
- мгновенные концентрации веществ в соответствующих акваториях моря в верхнем (и нижнем) слое столба воды (мг Элемента/л);
- концентрации рассматриваемых компонентов в водах притоков (мг Элемента/л);
- количества веществ, переносимые по вертикали (мг Элемента/л);
- объем вод рассматриваемых акваторий и слоев ( $\text{км}^3$ );
- управляющие параметры для описания процессов переноса вещества водным потоком (безразмерные).

Модель рассчитывает динамику концентрации DOC,  $\text{O}_2$ , N-, P- и Si-содержащих органических и минеральных веществ при их биотрансформации и развитии процессов обмена веществ через границы раздела вода-воздух и вода-дно. Модель учитывает концентрации соединений P (DIP, DOP, PD), N ( $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$ , DON, ND), DISi, DOC и растворенного  $\text{O}_2$ .

Биомасса гетеротрофных бактерий рассчитывается в модели в единицах C (BC), N

(BN) и P (BP); диатомовых водорослей - в единицах Si (FISi), N (FIN) и P (F1P); зеленых и синезеленых водорослей - в единицах N (F2N, F3N) и P (F2P, F3P); растительноядного зоопланктона - в единицах Si (ZISi), N (Z1N) и P (ZIP); хищного зоопланктона - в единицах N (Z2N) и P (Z2P).

Модельные оценки первичной продукции (в единицах N) пересчитывались для сравнения в единицы С. Пересчет проводился с учетом стехиометрической модели органического вещества  $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}\text{H}_3\text{PO}_4$ , на окисление которого требуется 276 атомов  $\text{O}_2$  и соотношение в котором С : Si: N : P=106:23:16:1 [Richards, 1965].

Таким образом, модель описывает внутригодовую динамику концентраций химико-биологических показателей состояния водной среды; мгновенные скорости процессов, ответственных за изменение концентраций веществ; внутренние и внешние потоки веществ в разных акваториях исследуемой экосистемы; время оборота всех рассматриваемых в модели химических и биологических компонентов.

В табл. 3.1 представлены для примера оцененные по литературным данным и требуемые для реализации модели среднесезонные значения температуры, освещенности и прозрачности водной среды, фотопериода и атмосферных осадков для каждого месяца для акватории 1 Каспийского моря.

Оцененные объемы вод в акваториях 1-10 (рис. 3.1) составляют 159.5; 120.3; 147.0; 114.1; 7012.0; 1892.0; 15412.0; 4624.0; 37764.0; 6456.0 км<sup>3</sup>, соответственно, и они приняты неизменными для расчетного года. Средние глубины акваторий 1-4 составляют 6 м, а акваторий 5-10 - приняты равными 200, 100, 400, 100, 450 и 200 м, соответственно [Каспийское море. Проект «Моря»..., 1996]. При расчетах на модели использовались оцененные в данном исследовании значения расходов воды на границах выделенных акваторий, обеспечивающих водообмен и перенос веществ внутри водоема [Леонов, Стыгар, 2001].

Изменения концентраций БВ в воде основных рек-притоков Каспийского

Таблица 3.1. Ежемесячные среднесезонные значения параметров водной среды для акваторий 1-10 Каспийского моря (Т – температура воды, оС; L – освещенность, кал/(см<sup>2</sup> сут); F – фотопериод, безразмерный; DS – прозрачность воды, м; AP – атмосферные осадки, мм)

Пара-метр	Акватория 1											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
T	0.7	0.9	3.4	11.8	20.6	24.2	26.6	25.7	20.5	13.6	6.9	0.5
L	121	204	303	463	580	636	611	539	429	292	166	113
F	0.357	0.390	0.439	0.501	0.586	0.639	0.651	0.623	0.553	0.463	0.414	0.377
DS	0.2	0.2	0.3	3.4	3.4	3.5	3.5	3.4	3.4	3.3	3.3	0.5
AP	0.0120	0.0114	0.0124	0.0124	0.0137	0.0133	0.0112	0.0109	0.0115	0.0137	0.0124	0.0154

моря, как и начальные их концентрации (на конец года) в водах акваторий 1-10 Каспийского моря, были охарактеризованы по литературным данным [Барс\кова, 1957, 1962, 1965; Бруевич. 1937, 1949; Бруевич, Аничкова. 1941; Затучная, 1970; Зенин, Васильева, 1961; Максимова, Метревели, 1984; Мальцева, 1980; Алекин, 1948; Альбицкая и др., 1989; Большое, 1983, 1989; Воловик. Зенин, 1978; Дышко, Скопинцев, 1959; Крылова, Ско-пинцев, 1959; Мальцева, 1980; Михайлов, 1997; Николаева, Скопинцев, 1961; Пахомова, 1961; Ежегодник качества..., 1990; 1991].

Концентрации БВ в атмосферной влаге также оценивались по литературным данным [Бруевич, 1941; Листенгартен. 1967; Скопинцев и др., 1971; Семенов и др., 1966], и для расчетов были приняты следующие значения их среднегодовых концентраций:  $DOC(r) = 5.0 \text{ мгС/л}$ ;  $DON(r) = 2.0 \text{ ND}(r) = 0.4$ ;  $NH_4(r) = 0.4$ ;  $NO_2(r) = 0.02$ ;  $NO_3(r) = 0.4 \text{ мгN/л}$ ;  $DOP(r) = 0.03$ ;  $DIP(r) = 0.03$ ;  $PD(r) = 0.03 \text{ мгP/л}$ .

#### *Глава 4. БИОГИДРОХИМИЧЕСКИЙ МОДЕЛЬНЫЙ ПОРТРЕТ СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ КАСПИЙСКОГО МОРЯ.*

Четвертая глава включает результаты анализа данных моделирования: внутрigoдoвой динамики концентраций БВ, их выноса в море с речным стоком, внутриводоeмного переноса и баланса этих соединений, биогидрохимических потоков биогенных веществ, баланса продукционных и деструкционных процессов для разных акваторий моря. В целом эта подборка результатов моделирования служит биогидрохимическим портретом экосистемы Каспийского моря, так как раскрывает особенности процессов трансформации БВ и условия формирования потенциала биопродуктивности в этой наиболее продуктивной северной части моря.

Пример расчетной динамики концентраций форм N - рис. 4.1. Анализ показывает, что во внутрigoдoвом изменении концентраций органических соединений ( $DON$ ,  $DOP$ ,  $DOC$ ,  $PD$  и  $ND$ ) не отмечается резких отличий по акваториям, а их экстремумы связаны с увеличением активности гидробионтов. Максимальные концентрации  $DOP$  наблюдаются в марте ( $0.045 \text{ мг P/л}$ ), минимальные - приходятся на май и сентябрь. Годовой ход концентраций  $DON$  не имеет ярко выраженных экстремумов. В течение всего года они меняются в пределах  $1.5-3 \text{ мг N/л}$ . Содержание  $DOC$  изменяется с незначительными годовыми колебаниями в диапазоне  $8-11 \text{ мг C/л}$  и резким падением в мае до  $4 \text{ мг C/л}$ . В течение года наблюдается невысокое содержание детрита. В единицах P в его содержании отмечен ноябрьский максимум -  $0.028 \text{ мг P/л}$  (акватория 1);  $0.037 \text{ мг P/л}$  (акватория 2) и июньский минимум  $0.001 \text{ мг P/л}$ .

Динамика концентрации  $DIP$  характеризуется весенним максимумом (март  $0.028 \text{ мг P/л}$ ) и летним минимумом (июль  $0.0025 \text{ мг P/л}$ ). Концентрации  $NH_4$  меняются в диапазоне  $0.001-0.002 \text{ мг N/л}$  и характеризуется тремя очевидными (январским, апрельским и ноябрьским) максимумами. В водах акватории 1, наиболее подверженной влиянию стока Волги, апрельский максимум выше и составляет  $0.028 \text{ мг N/л}$ . Сезонные изменения содержания  $NO_2$  в Северном Каспии происходят в диапазоне  $0.001-0.01 \text{ мг N/л}$ . Минимальные концентрации приходятся на июль-сентябрь.

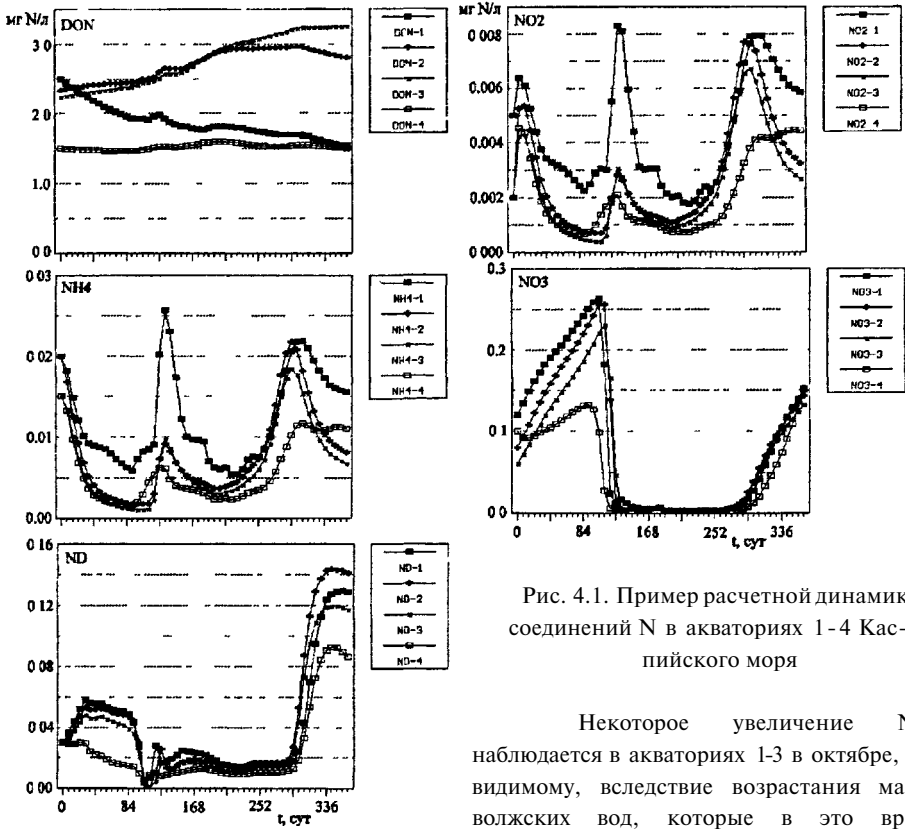


Рис. 4.1. Пример расчетной динамики соединений N в акваториях 1-4 Каспийского моря

отмечены у северного побережья моря.

Содержание  $\text{NO}_3$  в летний сезон значительно уменьшается вследствие их потребления фитопланктоном, и в открытом море они почти не обнаруживаются. Динамика  $\text{NO}_3$  по всем четырем акваториям Северного Каспия характеризуется апрельским максимумом (0.26; 0.26; 0.23 и 0.13 мг N/л, соответственно в акваториях 1-4) и декабрьским максимумом (соответственно 0.15; 0.15; 0.13; 0.15 МТN/Л). В летне-осенний период содержание нитратов меняется в пределах 3-5 мкг N/л (рис. 4.1).

Содержание  $\text{DISi}$  во всех акваториях Северного Каспия характеризуется спадом в апреле-мае. Диапазон концентрации  $\text{DISi}$  составляет 1 - 2 мг Si/л.

Полученные расчетные данные по внутригодовой динамике концентраций БВ в целом реалистично отражают сезонную картину изменчивости соединений C, Si, N и P и показывают соответствие имеющимся в литературе представлениям о сезонных изменениях запасов БВ в водах северной части моря. Основное количество накопленных в экосистеме моря минеральных веществ расходуется в период весенней активности фитопланктона. Концентрация БВ в летне-осенний период остается невысокой и восстанавливается к началу зимнего сезона. Содержание органических компонентов

подвержено колебаниям и является показателем интенсивного развития продукционных процессов в водной среде.

Оценен вынос в Каспийское море БВ с речным стоком. Со стоком рр. Волга, Урал и Терек в северную часть моря поступает соответственно 37.7; 2.7 и 0.6 тыс. т  $P_{\text{общ.}}$ ; 345.3; 35.8 и 9.8 тыс. т  $N_{\text{общ.}}$ ; 655.6; 30.2 и 66.6 тыс. т  $DISi$ . Сопоставление модельных расчетов и литературных данных по поступлению БВ в северную часть Каспийского моря с волжскими водами показывает, что расчетные величины поступления БВ либо попадают в оцененный по литературным данным диапазон их возможных колебаний, либо близки значениям их среднееголетнего выноса. Это свидетельствует о корректности использованной входной информации для описания основной внешней биогенной нагрузки на водоем.

Исследованный внутриводоемный перенос и баланс БВ показал, что их поступления в акваториях 1-4 в целом сбалансированы потерями. Наибольшая сбалансированность характерна для соединений P. В качестве примера в табл. 4.1. показан расчетный баланс P для акваторий 1 и 2. Для соединений N баланс между поступлениями и потерями соединений азота лучше в акваториях 2 и 4 (здесь невязка баланса N составляет 9.1% и 4.2%, соответственно), а в акваториях 1 и 3 сбалансированность указанных процессов ниже и оцененная невязка баланса N для этих акваторий выше (25.2% и 27.1%, соответственно).

В водах акваторий 1-4 в течение года сообществом гидробионтов потребляется соответственно 858.5; 594.3; 638.2 и 423.5 тыс. т N; 315.5; 218.82 211.2 и 137.0 тыс. т P; 1951.4; 1456.1; 1720.1 и 954.7 тыс. т Si. На долю бактерий приходится наибольшее потребление БВ: 58.6-66% N; 64.6-70.2% P; 59.1-63.7% Si; фитопланктон потребляет 27.3-35% N; 21-27.7% P; 25.3-33.5% Si; а зоопланктон - 6.4-7.4% N; 7.6-9.2% P; 7.4-11% Si.

За счет метаболических выделений организмами в акваториях 1 - 4 создается соответственно 278.1; 213.1; 227.1; 143.1 тыс. т N; 101.5; 74.7; 71.0; 44.9 тыс. т P; 566.6; 424.7; 477.6; 285.8 тыс. т Si. При разложении образованного организмами детрита в течение года в акваториях 1-4 образуется соответственно 588.7; 381.2; 394.1; 245.6 тыс. т DON; 152.8; 105.3; 100.0; 60.1 тыс. т DOP; 725.8; 529.3; 642.64 374.9 тыс. т DOSi.

Количество образующихся в экосистеме БВ превышает их поступления в морскую среду с речным стоком, что свидетельствует о существенной роли гидробионтов в рециклинге биогенных субстанций и в поддержании высокой биоактивности в летний период, когда запас БВ в водной среде невелик.

Для акваторий 1-4 расчетные значения годовой первичной продукции составили соответственно 3.4 - 7.2; 1.8 - 3.8; 2.0 - 3.8 и 1.5 - 2.9 млн. т C, а для всей акватории Северного Каспия - 8.8 - 17.7 (среднее 13.3) млн. т C. При этом фитопланктон потребляет 215.53 тыс. т P и 773.59 тыс. т N. Полученное в данном исследовании годовое значение первичной продукции близко величине первичной продукции 20-21 млн. т ОВ (или 10-10.5 млн. т C) для северной части Каспийского моря, оцененной на основе кислородных измерений фотосинтетической активности фитопланктона [Федосов, Барсукова, 1959]. Отношение значений годовой продукции бактерий, фито- и зоопланктона, вычисленных в единицах N, оценено меняющимся для акваторий 1-4 в пределах 8.3-9.9 : 4.1-5.5 : 1, а в единицах P - 7.3-8.5 : 2.4-3.6 : 1.

Таблица 4 1. Баланс Р-содержащих веществ для акваторий 1-4 Каспийского моря  
(анализ данных моделирования по внешним потокам веществ): 1. количество :  
числитель - мг Р/(л год); знаменатель - тыс. т. Р; 2. доля веществ, числитель в %  
от  $\Sigma P_i$ ; знаменатель - в % от  $P_{tot}$ .

Составляющие баланса	DIP		PD		DOP		Р <sub>биомасса</sub>		Р <sub>tot</sub>	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>Акватория 1</b>										
<i>Приход:</i>										
Воды притока (р Волга)	<u>0 02904</u> 4 6	<u>53 1</u> 12 3	<u>0 08944</u> 14 3	<u>41 6</u> 37 8	<u>0 11784</u> 18 8	<u>99 3</u> 49 9			<u>0 23632</u> 37 7	<u>60 8</u> 100 0
Атмосферные осадки	<u>0 00085</u> 0 1	<u>1 6</u> 33 3	<u>0 00085</u> 0 1	<u>0 4</u> 33 3	<u>0 00085</u> 0 1	<u>0 7</u> 33 4			<u>0 00255</u> 0 4	<u>0 7</u> 100 0
Донные отложения	<u>0 02480</u> 4 0	<u>45 3</u> 16 6	<u>0 12444</u> 19 8	<u>58 0</u> 83 4					<u>0 14924</u> 23 8	<u>38 4</u> 100 0
Привнос из соседних акваторий							<u>0 00061</u> 0 1	<u>100 0</u> 100 0	<u>0 00061</u> 0 1	<u>0 1</u> 100 0
<b>Σ P<sub>i</sub></b>	<u>0 05469</u> 8 7	<u>100 0</u> 14 1	<u>0 21473</u> 34 3	<u>100 0</u> 55 2	<u>0 11869</u> 18 9	<u>100 0</u> 30 5	<u>0 00061</u> 0 1	<u>100 0</u> 0 2	<u>0 38872</u> 62 0	<u>100 0</u> 100 0
<i>Расход:</i>										
Седиментация			<u>0 20826</u> 33 2	<u>100 0</u> 100 0					<u>0 20826</u> 33 2	<u>51 9</u> 100 0
Вывос в соседние акватории	<u>0 01521</u> 2 4	<u>100 0</u> 7 9			<u>0 08340</u> 13 3	<u>100 0</u> 43 3	<u>0 09416</u> 15 0	<u>100 0</u> 48 8	<u>0 19277</u> 30 8	<u>48 1</u> 100 0
<b>Σ P<sub>i</sub></b>	<u>0 01521</u> 2 4	<u>100 0</u> 3 8	<u>0 20826</u> 33 2	<u>100 0</u> 51 9	<u>0 08340</u> 13 3	<u>100 0</u> 20 8	<u>0 09416</u> 15 0	<u>100 0</u> 23 5	<u>0 40103</u> 64 0	<u>100 0</u> 100 0
<b>Баланс, мгР/(л год) / %</b>	0 03948 / 72 2		0 00647 / 3 0		0 03529 / 29 7		-0 09355 / 99 4		-0 01231 / 3 1	
<b>Акватория 2</b>										
<i>Приход:</i>										
Воды притока (р Урал)	<u>0 00175</u> 0 2	<u>4 9</u> 7 7	<u>0 01954</u> 2 4	<u>13 4</u> 86 6	<u>0 00128</u> 0 1	<u>2 6</u> 5 7			<u>0 02257</u> 2 7	<u>8 0</u> 100 0
Атмосферные осадки	<u>0 00085</u> 0 1	<u>2 4</u> 33 3	<u>0 00085</u> 0 1	<u>0 6</u> 33 3	<u>0 00085</u> 0 1	<u>1 7</u> 33 4			<u>0 00255</u> 3 1	<u>0 9</u> 100 0
Донные отложения	<u>0 02203</u> 2 7	<u>61 8</u> 15 7	<u>0 11870</u> 14 3	<u>81 7</u> 84 3					<u>0 14073</u> 16 9	<u>50 1</u> 100 0
Привнос из соседних акваторий	<u>0 01100</u> 1 3	<u>30 9</u> 9 7	<u>0 00621</u> 0 7	<u>4 3</u> 5 4	<u>0 04766</u> 5 7	<u>95 7</u> 41 9	<u>0 05009</u> 6 0	<u>100 0</u> 43 0	<u>0 11496</u> 13 8	<u>41 0</u> 100 0
<b>Σ P<sub>i</sub></b>	<u>0 03563</u> 4 3	<u>100 0</u> 12 7	<u>0 14530</u> 17 5	<u>100 0</u> 51 7	<u>0 04979</u> 6 0	<u>100 0</u> 17 7	<u>0 05009</u> 6 0	<u>100 0</u> 17 9	<u>0 28021</u> 33 7	<u>100 0</u> 100 0
<i>Расход:</i>										
Седиментация			<u>0 19537</u> 23 5	<u>100 0</u> 100 0					<u>0 19537</u> 23 5	<u>67 9</u> 100 0
Вывос в соседние акватории	<u>0 01730</u> 2 1	<u>100 0</u> 18 7			<u>0 04226</u> 5 1	<u>100 0</u> 45 7	<u>0 03287</u> 4 0	<u>100 0</u> 35 6	<u>0 09243</u> 11 1	<u>32 1</u> 100 0
<b>Σ P<sub>i</sub></b>	<u>0 01730</u> 2 1	<u>100 0</u> 6 0	<u>0 19537</u> 23 5	<u>100 0</u> 67 9	<u>0 04226</u> 5 1	<u>100 0</u> 14 7	<u>0 03287</u> 4 0	<u>100 0</u> 11 4	<u>0 28780</u> 34 6	<u>100 0</u> 100 0
<b>Баланс, мгР/(л год) / %</b>	0 01833 / 51 4		-0 05007 / 25 6		0 00753 / 15 1		0 01722 / 34 4		-0 00759 / 2 6	

Таблица 4.2. Оцененные с помощью моделирования и по литературным данным поступления биогенных веществ (тыс. т. в единицах P, N, Si, C и O<sub>2</sub>) со стоком рек в северную часть Каспийского моря (в скобках – средние значения)

Биогенные вещества	Моделирование			Литературные данные по волжскому стоку			
	Волга	Урал	Терек	1936 - 1955*	1956 - 1958**	1959 - 1975***	1936 - 1975
P <sub>общ</sub>	37.695	2.715	0.572	23.6 - 31.5 (26.4)	26.8 - 41.6 (34.0)	19.0 - 41.3 (28.6)	(28.6)
DIP	4.633	0.211	0.176	2.1 - 9.6 (5.2)	3.1 - 4.5 (3.7)	1.4 - 4.0 (2.6)	(4.0)
DOP	18.796	0.153	0.373	3.7 - 14.2 (9.1)	12.7 - 26.3 (17.7)	11.3 - 25.6 (16.3)	(14.1)
PD	14.266	2.351	0.023	7.6 - 14.5 (14.4)	10.7 - 16.5 (13.4)	5.5 - 13.9 (9.6)	(11.8)
N <sub>общ</sub>	345.303	35.809	9.848	131.0 - 410.7 (270.1)	323.1 - 393.3 (365.0)	237.6 - 531.8 (345.4)	(323.7)
NH <sub>4</sub> +UR	71.205	2.009	2.853	11.8 - 76.5 (35.5)	44.1 - 53.8 (49.4)	20.9 - 69.9 (34.3)	(36.6)
NO <sub>2</sub>	2.008	0.116	0.511	(1.9)	2.1 - 4.0 (3.0)	0.8 - 1.6 (1.3)	(2.0)
NO <sub>3</sub>	47.499	1.381	1.077	4.5 - 24.5 (13.4)	88.6 - 125.1 (106.9)	63.5 - 134.9 (88.8)	(54.7)
DON	126.121	12.948	2.171	52.0 - 142.8 (100.1)	112.8 - 169.3 (137.3)	102.0 - 186.9 (141.8)	(125.7)
ND	98.470	19.355	3.236	67.6 - 197.0 (136.7)	82.1 - 122.5 (96.9)	56.1 - 118.8 (91.2)	(110.3)
DISi	655.573	30.229	66.629	346.0 - 880.0 (666.3)	638.2 - 866.7 (745.2)	308.0 - 941.0 (539.1)	(631.1)
C <sub>орг</sub>	2159.236	80.077	66.629	733.5 - 2800.0 (1671.0)	2308.0 - 2572.0 (2438.0)	2641.0 - 3222.0 (2931.0)	(2251.0)
O <sub>2</sub>	2345.536	86.988	126.655	-	-	-	-

\* ) По [Барсукова, 1965, 1966, 1971; Бруевич, 1941, 1949; Бруевич, Аничкова, 1941; Федосов, Барсукова, 1959]

\*\* ) По [Барсукова, 1962, 1965, 1966, 1971; Зенин, Проценко, 1961]

\*\*\* ) По [Барсукова, 1965, 1966, 1971; Затучная, 1970; Зенин и др., 1964; Максимова, 1979]

Вклад диатомовых в суммарную продукцию фитопланктона составил 58-63% (в единицах N) и 70-76% (в единицах P).  
Вычисленные значения первичной продукции были сопоставлены с имеющимися в литературе экспериментальными оценками, полученными для акваторий 1-4 (период апрель-ноябрь) с помощью кислородных измерений фотосинтетической активности фитопланктона [Винецкая, 1962, 1965, 1966] (табл. 4.2). Расчетные по результатам моделирования для отдельных месяцев и акваторий скорости первичной продукции близки экспериментальным оценкам, что служит одним из доказательств адекватности модели.

### Глава 5. БИОТРАНСФОРМАЦИЯ БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ И УСЛОВИЯ ЕВТРОФИРОВАНИЯ ВОД ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ВОД КАСПИЙСКОГО МОРЯ

Реакция экосистемы на возрастание биогенной нагрузки выявляется, главным образом, по изменчивости потоков БВ (при развитии процессов биотрансформации - потребление питательных веществ, выделение продуктов метаболизма, отмирание биомасс гидробионтов), выраженности трофодинамических взаимодействий компонентов, а также при переносе компонентов водными массами через границы между соседними акваториями.

Здесь приведены результаты модельного расчета внутригодовой динамики концентраций органических и минеральных фракций элементов (C, N, Si, P) в 10-и акваториях Каспийского моря. На рис. 5.1 показана расчетная динамика концентраций форм P. Эффект евтрофирования морской среды исследуется по возрастанию биомасс гидробионтов (в частности, фито- и зоопланктона), интенсивности и продолжительности периодов цветения планктона, а также изменения условий биогенного лимитирования процессов первичной продукции в разных акваториях моря.

Диапазоны изменений в течение года содержания  $N_{\min}$  в акваториях 1-10 составляют 8.1-274.0; 4.8-264.4; 4.2-232.6; 4-132.6; 3.2-89.6; 3.7-86.8; 3.1-90.6; 3.7-84.7; 2.9-83.2; 2.7-80.0 мкг N/л, соответственно. Содержание минеральных компонентов N ( $NH_4$ ,  $NO_2$  и  $NO_3$ ) в течение года меняется довольно значительно. В целом доля  $NH_4$  от  $N_{\min}$  в течение года в разных акваториях моря меняется от 0.4 до 68.6%,  $NO_2$  - от 0.2 до 25.2%,  $NO_3$  - от 10.5 до 99.4%. Концентрация  $NH_4$  увеличивается в водной среде весной и осенью за счет активизации гидробионтов (наиболее интенсивно в северных акваториях). Летом активное развитие окислительной трансформации N (нитрификация) поддерживает в водной среде присутствие  $NO_2$  (~2-5 мкг N/л в северных акваториях и 1-3 мкг N/л в средней и южной частях моря). Активное потребление  $NO_3$  в северных районах начинается в апреле, а в южных - в марте. К лету их запас в водной среде истощается, причем раньше, чем запас DIP. Минимум  $NO_3$  отмечается во всех районах моря в июне-сентябре, и обычно раньше достигается в северных мелководных районах. Содержание  $NO_3$  в морской среде восстанавливается к концу года.

Пределы колебаний концентраций  $DISi$  в акваториях 1-10 составляют 0.0762-1.234, 0.017-0.764, 0.015-0.800, 0.214—0.741, 0.398-0.890, 0.402-0.728, 0.407-0.736, 0.393-0.721, 0.402-0.712 и 0.334-0.704 мг Si/л соответственно. Выраженные минимумы концентраций  $DISi$  в течение года обнаруживаются лишь в водах северной части моря (в акваториях 1-3). Снижение содержания  $DISi$  (особенно выражено в мае-июне) обусловлено главным образом влиянием роста диатомовых водорослей. С ноября по март происходит накопление  $DISi$  в водной среде (за счет поступления  $DISi$  с речным стоком и переноса водными массами).

Расчетные диапазоны изменений концентраций DIP для акваторий 1-10 составляют 1.9-22.5, 2.3-22.4, 2.4-20.3, 3.7-25.3, 14.4-26.2, 15.1-26.2, 14.7-26.3, 16.0-26.0, 16.9-27.0 и 17.7-25.8 мкг P/л. Минимальное содержание DIP, как и  $DISi$ , летом отмечено в северных акваториях моря. В водах средней и южной частей моря содержание DIP летом выше и поддерживается процессами вертикального и горизонтального переноса водных масс.

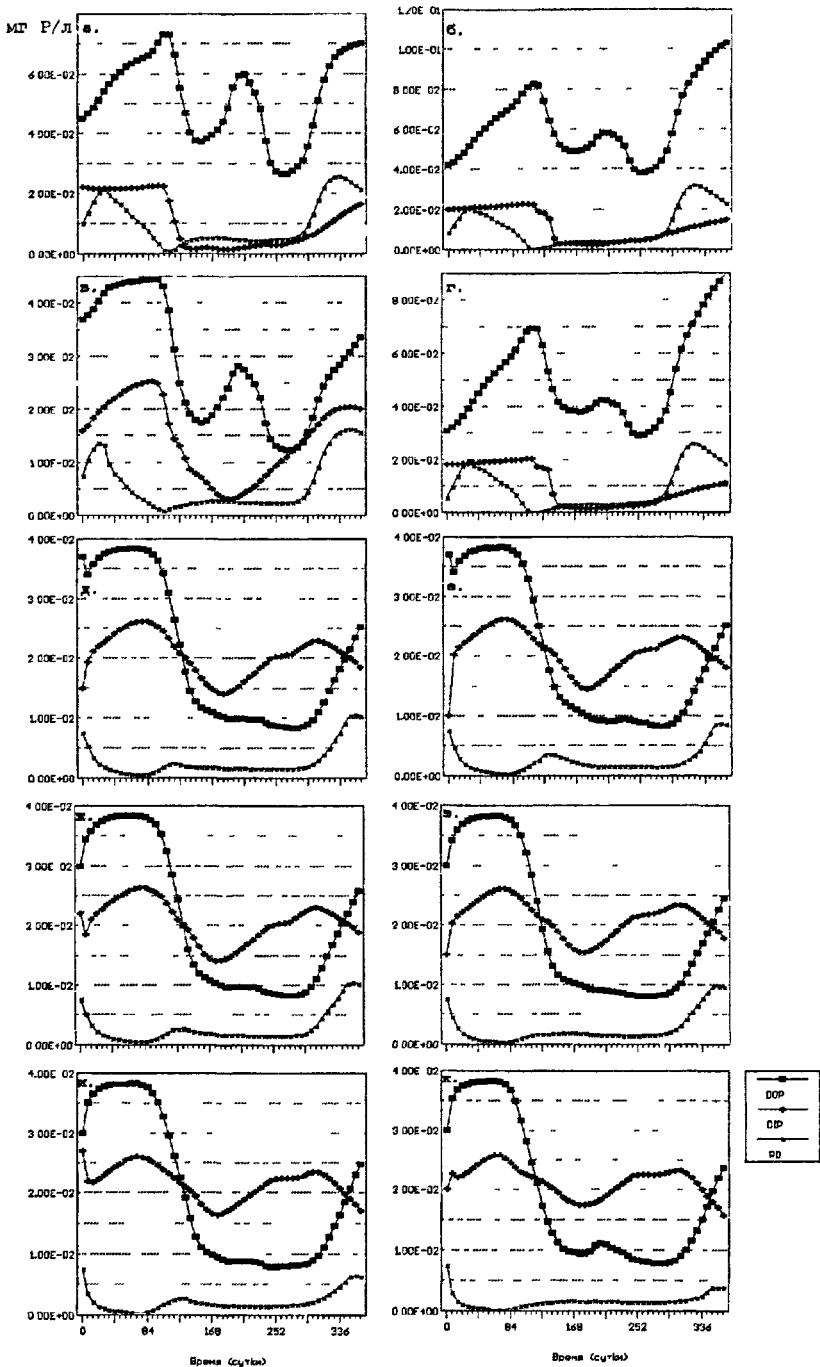


Рис 5.1. Расчетная динамика соединений Р в акваториях Каспийского моря.

1 - 3 - DOP, DIP и PD соответственно

В целом расчетная картина сезонных изменений концентраций БВ соответствует средним среднегодовым данным по изменчивости биогенных компонентов в разных акваториях моря [Каспийское море. Проект «Моря»,... 1996].

Анализ величин и характера внутригодовой изменчивости расчетных концентраций БВ и их весовых соотношений в 10 акваториях Каспия показал, что отношения  $N_{\min}/DIP$  и  $DISi/DIP$  в целом согласуются с имеющимися в литературе данными [Семенов, 1984]. В акватории 1 выше, чем в других акваториях, значения  $DISi/DIP$ . Среднемесячные значения весовых соотношений  $DISi/DIP$  в январе-марте в акваториях 1 и 3 меняются в пределах 37-42, тогда как в других акваториях - 24.7 - 29.8. В последующие месяцы значения этого отношения возрастают и в июле достигают максимума (811, 171-184 и 25.4-31, соответственно в акваториях 1, 2-4 и 5-10). К декабрю значения  $DISi/DIP$  снижаются: в акваториях 1-4 они составляют 28-82, а в акваториях 5-10 - 19.7 - 20.5.

Среднемесячные значения весового отношения  $DISi/N_{\min}$  в акваториях 1-2 в январе-марте составляют 2.9-4.7, в акваториях 3-4 и 5-10 - соответственно 4.2-7.9 и 8.1-10.4. В последующие месяцы значения  $DISi/N_{\min}$  сначала возрастают и достигают максимума в августе (в акватории 1-2, 3, 4 и 5-10 - соответственно 73.8-123.6, 51.3, 133.9 и 117.2-145.1), а затем снижаются и к декабрю составляют 6.2-8.8, 3.9-9.4 и 10.3-14.3 соответственно в акваториях 1-2, 3-4 и 5-10.

Изменение в течение года весовых соотношений  $N_{\min}/DIP$  в акваториях 1-10 показано на рис. 5.2. В январе-марте весовое соотношение  $N_{\min}/DIP$  в водах акваторий 1-3 меняется

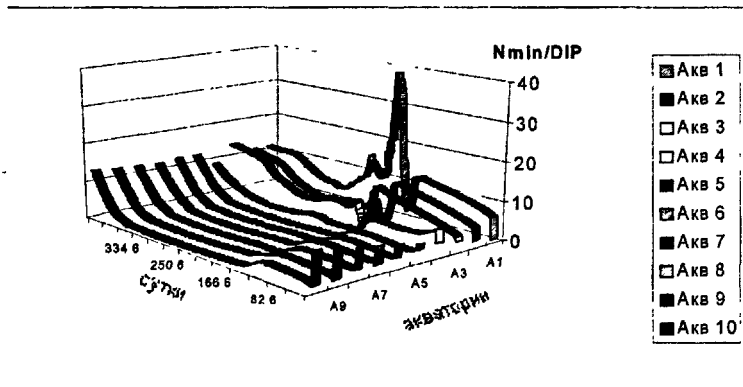


Рис. 5.2. Оцененное по результатам моделирования изменение в течение года весовых соотношений  $N_{\min}/DIP$  в акваториях 1-10 Каспийского моря.

и составляет 5.5-10.8, к маю оно возрастает и достигает максимума - 10.9-41.8 (среднее 24.7) и 10-11.2 соответственно в акваториях 1 и 2-3. В последующие месяцы значения  $N_{\min}/DIP$  снижаются. В акватории 1 они составляют 4-4.6 (август-сентябрь), а в акваториях 2 и 3 - соответственно 1.9-2.6 и 2.8-3.8 (июнь-сентябрь). К декабрю значения  $N_{\min}/DIP$  возрастают в этих акваториях до 8.6-10.3. В акватории 4 среднемесячные значения  $N_{\min}/DIP$  от января-марта к августу-сентябрю равномерно снижаются (от 4.8-5.9

до 0.6-0.8) и к декабрю возрастают (до 3). Такая же тенденция отмечается и для акваторий 5-10: наибольшие значения характеризуют январь-март (2.4-3.4), а наименьшие - июнь-июль (0.2-0.3), в последующие месяцы отмечено возрастание (до 1.6-2) в декабре.

Отмечается общая тенденция снижения среднемесячных значений весовых отношений  $DISi/DIP$  и  $N_{min}/DIP$ , а также увеличения значений  $DISi/N_{min}$  от северных акваторий к южным.

В северной части моря значения отношений  $DISi/DIP$ ,  $DISi/N_{min}$  и  $N_{min}/DIP$  в течение года различаются в западных и восточных акваториях: они выше в водах западной акватории 1, чем в восточной акватории 2 (в январе-апреле и декабре значения  $DISi/DIP$  выше в 1.4-1.5 раза; в мае-августе это различие возрастает до 3.5-30.7 раз; в течение года значения  $N_{min}/DIP$  выше в 1.1-4.5, а значения  $DISi/N_{min}$  - в 1.2-5.3 раза). Наибольшие различия отмечены в мае-июне.

В водах западной акватории 4 значение  $DISi/DIP$  большую часть года в 1.3-1.5 раза ниже, чем в восточной акватории 3 (только в мае-июле оно выше в акватории 4 - в 1.2-11.1 раза). В акватории 4 значение  $N_{min}/DIP$  ниже (в 1.5-10.5 раза), чем в акватории 3, а  $DISi/N_{min}$  - напротив выше (в 1.2-31.1 раза). Наибольшие различия отмечаются в мае.

В средней части моря (акватории 5-8) в январе-апреле и октябре-декабре значения  $DISi/N_{min}$  в западных и восточных акваториях практически одинаковы; превышение значений  $DISi/N_{min}$  в 1.1-1.6 раза в западных акваториях отмечено в мае-сентябре. В южной части моря в начале и в конце года значения  $DISi/N_{min}$  в западной и восточной акваториях практически одинаковы, а с апреля по октябрь в восточной акватории 10 значения  $DISi/N_{min}$  выше в 1.1-1.6 раз, чем в западной акватории 9.

По сравнению с северными акваториями в средней и южной частях моря значения  $DISi/DIP$  и  $N_{m;n}/DIP$  меняются в течение года в меньшем диапазоне, здесь невелики различия в величинах указанных отношений между западными и восточными акваториями.

"Нормальные" атомные значения  $N/P$  меняются в водной среде от 10 до 16 [Максимова, 1974]; среднее значение  $N/P=15$  близко к таковому в клетках фитопланктона (соответствует значению весового отношения  $N/P=7.2$ ) [Redfield, 1958]. Соотношение минеральных фракций  $N$  и  $P$  позволяет судить о том, какой из биогенных элементов служит потенциальным лимитантом процессов первичного продуцирования  $OB$  в водной среде: при весовом отношении  $N/P < 7$  - лимитант  $N$ , при  $N/P = 7-12$  лимитантом может быть и  $N$ , и  $P$  (в этих условиях оба элемента ассимилируются фитопланктоном с оптимальной скоростью), а при  $N/P > 12$  - лимитантом является  $P$  [Overbeck, 1989]. Таким образом, в акватории 1 лишь весеннее развитие диатомовых лимитируется  $P$ , осенью здесь (а в акваториях 2-3 в течение года) процессы продуцирования  $OB$  лимитируются как  $P$ , так и  $N$ . В остальных районах развитие гидробионтов лимитируются преимущественно  $N$ .

Существенные различия по акваториям моря обнаруживаются в значениях  $N_{tot}/P_{tot}$ . Зимой в водах акваторий 1-2 это отношение составляет 35, в акваториях 3, 4-8 оно оценено равным 42 и 24-26, соответственно. К началу весеннего цветения диатомовых в водах акваторий 1-2 значения  $N_{tot}/P_{tot}$  снижаются до 25, а в летне-осенний период они меняются в пределах 15-20. В акватории 3 оно снижается до 30, в акваториях 4-8 - до 20-21. В акваториях 9-10  $N_{tot}/P_{tot}$  в течение года меняется в небольшом интервале (20-21).

По данным о среднесуточном расходе воды и среднесуточных концентрациях БВ в главных реках-притоках было оценено их ежемесячное и годовое поступление в акватории 1, 2, 4 (соответственно со стоком рр. Волги, Урала и Терека), а также в акватории 5, 7 и 9 (со стоком рр. Сулак, Самур и Кура). Полученные данные по суммарному речному стоку БВ в Каспийское море представлены в табл. 5.1.

Таблица 5.1. Оценка по среднесуточным данным годового поступления БВ с речным стоком в Каспийское море (числитель – тыс т в единицах P, N, C, Si; знаменатель – % от суммарного речного стока биогенных веществ)

Биогенные вещества	Волга	Урал	Терек	Сулак	Самур	Кура	Суммарный речной сток БВ
<b>Соединения P</b>							
PD	<u>14.265</u>	<u>2.350</u>	<u>0.023</u>	<u>0.044</u>	<u>0.039</u>	-	<u>16.721</u>
	85.3	14.1	0.1	0.3	0.2	-	100.0
DOP	<u>18.794</u>	<u>0.154</u>	<u>0.373</u>	<u>0.011</u>	<u>0.007</u>	-	<u>19.339</u>
	97.2	0.8	1.9	0.1	0	-	100.0
DIP	<u>4.632</u>	<u>0.211</u>	<u>0.176</u>	<u>0.062</u>	<u>0.018</u>	<u>0.592</u>	<u>5.691</u>
	81.4	3.7	3.1	1.2	0.3	10.4	100.0
P <sub>dis</sub>	<u>23.426</u>	<u>0.365</u>	<u>0.549</u>	<u>0.072</u>	<u>0.025</u>	-	<u>24.437</u>
	95.9	1.6	2.2	0.2	0.1	-	100.0
P <sub>org</sub>	<u>33.059</u>	<u>2.504</u>	<u>0.396</u>	<u>0.055</u>	<u>0.046</u>	-	<u>36.060</u>
	91.7	6.9	1.2	0.1	0.1	-	100.0
P <sub>tot</sub>	<u>37.691</u>	<u>2.715</u>	<u>0.572</u>	<u>0.117</u>	<u>0.064</u>	<u>0.592</u>	<u>41.751</u>
	90.2	6.5	1.4	0.3	0.2	1.4	100.0
<b>Соединения N</b>							
ND	<u>98.465</u>	<u>19.353</u>	<u>3.235</u>	<u>0.407</u>	<u>0.007</u>	-	<u>121.467</u>
	81.1	15.9	2.7	0.3	0	-	100.0
DON	<u>126.113</u>	<u>12.948</u>	<u>2.171</u>	<u>0.526</u>	<u>0.236</u>	-	<u>141.994</u>
	88.8	9.1	1.5	0.4	0.2	-	100.0
NH <sub>4</sub>	<u>71.198</u>	<u>2.008</u>	<u>2.853</u>	<u>0.701</u>	<u>0.267</u>	<u>0.365</u>	<u>77.392</u>
	92.0	2.6	3.7	0.9	0.3	0.5	100.0
NO <sub>2</sub>	<u>2.008</u>	<u>0.116</u>	<u>0.511</u>	<u>0.086</u>	<u>0.027</u>	<u>0.071</u>	<u>2.819</u>
	71.2	4/1	18.1	3.1	1.0	2.5	100.0
NO <sub>3</sub>	<u>47.496</u>	<u>1.381</u>	<u>0.980</u>	<u>5.769</u>	<u>0.595</u>	<u>2.532</u>	<u>58.753</u>
	80.0	2.4	1.7	9.8	1.0	4.3	100.0
N <sub>min</sub>	<u>120.701</u>	<u>3.505</u>	<u>4.344</u>	<u>6.555</u>	<u>0.889</u>	<u>2.969</u>	<u>138.963</u>
	86.9	2.5	3.1	4.7	0.6	2.2	100.0
N <sub>dis</sub>	<u>350.690</u>	<u>16.453</u>	<u>6.515</u>	<u>7.082</u>	<u>1.125</u>	-	<u>381.865</u>
	85.2	12.3	2.0	0.4	0.1	-	100.0
N <sub>org</sub>	<u>224.578</u>	<u>32.301</u>	<u>5.406</u>	<u>0.933</u>	<u>0.243</u>	-	<u>263.460</u>
	85.2	12.3	2.0	0.4	0.1	-	100.0
N <sub>tot</sub>	<u>345.279</u>	<u>35.806</u>	<u>9.750</u>	<u>7.488</u>	<u>1.132</u>	<u>2.969</u>	<u>402.424</u>
	85.8	8.9	2.4	1.9	0.3	0.7	100.0
<b>Соединения C и Si</b>							
DOC	<u>2159.088</u>	<u>80.071</u>	<u>70.028</u>	<u>16.196</u>	<u>19.927</u>	<u>91.443</u>	<u>2436.753</u>
	88.6	3.3	2.9	0.7	0.8	3.7	100.0
DISi	<u>655.523</u>	<u>30.225</u>	<u>66.619</u>	<u>11.180</u>	<u>6.095</u>	<u>29.559</u>	<u>799.201</u>
	82.0	3.8	8.3	1.4	0.8	3.7	100.0

Без учета стока БВ в море с водами Куры, ежегодно реками выносятся 41.751 тыс. т P (в форме PD- 40.1%; DOP - 46.3%; DIP -13.6%); 402.424 тыс. т N (в форме ND - 30.2%; DON - 35.3%;  $N_{\min}$  - 34.5%); 2436.753 тыс. т C в форме DOC; 799.201 тыс. т Si в форме DISi. В речном стоке  $N_{\min}$  на 55.7% представлен  $NH_4$ , на 42.3% -  $NO_3$  и на 2% -  $NO_2$ . От 71.2 до 95.9% годового выноса БВ в Каспийское море обеспечивается стоком Волги; вынос БВ в море с водами Урала, Терека, Сулака, Самура и Куры оценивается, соответственно, в 0.8-15.9%, 0.1-18.1; 0.1-4.7; 0-1 и 0.5-10.4%. Речной биогенный сток в Каспийское море характеризуется следующими соотношениями: ND:PD = 7.3:1;  $N_{\text{dis}}$ :  $P_{\text{dis}}$  = 15.6 : 1;  $N_{\text{tot}}$ : $P_{\text{tot}}$  = 9.6 : 1; DISi:  $N_{\text{rain}}$ : DIP = 140.4 : 24.4 : 1; DOC : DON : DOP = 126.0:7.3:1.

Воды притоков имеют характерные диапазоны изменения соотношений минеральных компонентов БВ. Так в водах Волги DISi/DIP меняются в следующих пределах- 96 (октябрь) - 253 (апрель), в водах Урала - 64 (ноябрь) - 246 (сентябрь); Терека - 236 (октябрь) - 1175 (май); Сулака - 100 (декабрь) - 286 (июнь); Самура- 146 (январь, декабрь) - 563 (май); Куры - 34 (ноябрь) - 64 (сентябрь). Таким образом, оцененные по многолетним данным ежемесячные значения DISi/DIP наименьшие в водах Куры. Ежемесячные значения DISi/DIP в водах Волги и Урала одного порядка, несколько выше они в водах Сулака и Самура. Воды Терека отличаются наибольшими ежемесячными значениями DISi/DIP. Максимальные значения DISi/DIP в притоках чаще всего отмечаются в период паводка.

Оцененные изменения DISi/ $N_{\min}$  в водах Волги составляют 4.4 (февраль) - 11.4 (сентябрь), Урала - 2.4 (ноябрь) - 22 (сентябрь), Терека - 12 (июль) - 43 (сентябрь), Сулака - 1.1 (апрель, декабрь) - 2.5 (январь), Самура - 3.4 (февраль) - 15.2 (август), Куры - 4.5 (декабрь) - 26 (октябрь). Таким образом, воды Терека в разные месяцы характеризуются наибольшими, а воды Сулака - наименьшими значениями DISi/ $N_{\min}$ . В остальных притоках (Волга, Урал, Самур, Кура) значения DISi/ $N_{\min}$  в разные месяцы достаточно близки.

Изменения в разные месяцы значений  $N_{\min}$ /DIP в водах Волги составляет 10 (октябрь) - 51 (февраль), Урала - 9 (июль) - 26 (ноябрь), Терека - 7 (сентябрь) - 60 (июнь), Сулака - 45 (январь) - 154 (июнь, июль), Самура - 31 (октябрь) - 78 (май), Куры - 1.4 (октябрь, ноябрь) - 8.3 (декабрь-февраль). Наибольшие значения  $N_{\min}$ /DIP в разные месяцы характерны для вод Сулака и Самура, промежуточные значения - для Волги, Урала и Терека, а наименьшие - для вод Куры.

Обсуждаемые выше соотношения минеральных компонентов БВ для рек-притоков сопоставлялись с таковыми для морских акваторий, в которые реки впадают. На рис. 5.3 показаны изменения ежемесячных значений  $N_{\text{min}}/DIP$  в реках (индекс r) и в морских акваториях (с индекс s). Как видно, только характеристики вод Сулака и Самура, сток которых незначителен, непосредственно не связаны с отношениями  $N_{\text{min}}/DIP$  в морской среде (соответственно, акватории 5 и 7). Для вод акваторий 1, 2, 4 и 9, в которые соответственно впадают Волга, Урал, Терек и Кура, в целом отмечается высокая коррелированность значений  $N_{\text{min}}/DIP$  в речных и морских водах ( $r = 0.834$ ). Между отношениями DISi/ $N_{\text{min}}$ , а также DISi/DIP в речном стоке и в морских акваториях значимых связей не выявлено.

Оценка изменчивости вычисленных значений биопродукции гидробионтов и внутренних потоков БВ в акваториях Каспийского моря показывает, что расчетные значения продукции гидробионтов в западных акваториях моря в целом выше (бактерий в 1.5-5.8, фитопланктона в 1.2-3.9, зоопланктона в 1.2-5.5 раза), чем в восточных. Лишь в

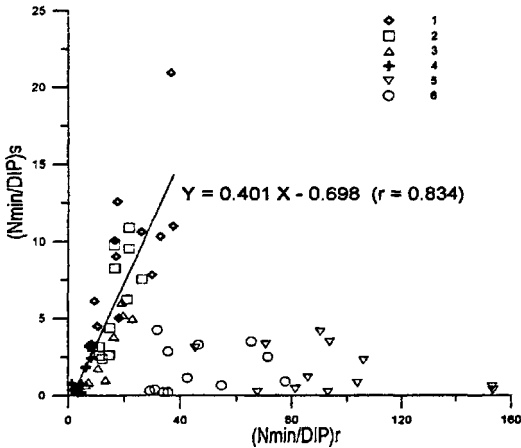


Рис. 5.3 Взаимосвязь соотношений концентраций минеральных N и P в стоке Волги, Урала, Терека и Куры (соответственно 1-4) и в акваториях моря, в которые эти притоки впадают (для стока Сулака (5) и Самура (6) связи нет).

среднюю часть моря. Весовые отношения годовых значений продукции гидробионтов (в единицах C, Si, N, P) в западных и восточных акваториях моря меняются мало, однако обнаруживается тенденция возрастания отношений продукции от северных акваторий моря к южным. Подобный эффект очевидно отражает различные условия поступления и изменения в соотношении БВ по акваториям моря.

В целом в акватории 1-10 из внешних источников за счет биотрансформации и внутренней циркуляции в водную среду поступает в форме DIP 0.322-0.565 г P/(м<sup>3</sup> год), причем наибольшее поступление отмечено для акватории 1, а наименьшее - для акватории 3. При расчете суммарного поступления DIP в акватории моря учитывались метаболические выделения бактерий (их вклад наибольший - 52.6-92.5%) и зоопланктона (2.5-5.7%), вынос речным стоком (0-5.1%), поступление из седиментов на мелководных акваториях 1-4 (1.3-1.8%), перенос водным потоком из соседних акваторий (-7 - 20.4%) и на глубоководных участках (акватории 5-10) по вертикали (19.8 - 41.3%).

Суммарные значения первичной продукции (ОТ) в большей степени определяются активностью диатомовых: в северной части моря (акватории 1-4) их доля в ПФ составляет 58.4-66.6, в средней (акватории 5-8) - 67.4-78.1, в южной (акватории 9-10) - 57.4-80.4%. Линейные зависимости продукции диатомовых **ПФ1 от R<sub>DIP</sub>** (внутренних потоков поступлений DIP) характеризуют западные и восточные акватории моря в северной, средней и южной частях моря.

Вклад зеленых водорослей в **ПФ** составляет 18-25.6%, 14.7-22 и 14-28.4%, а синезеленых -14.1-15%; 6.4-10.6 и 5.7-14.3% соответственно в северных, средних и южных акваториях моря. Зависимости продукции зеленых (ПФ2) и синезеленых (ПФ3) водорослей от RDIP описываются преимущественно показательными функциями, характеризующимися значениями коэффициентов детерминации R<sup>2</sup>=0.529-0.901 и 0.293 -0.889 соответственно.

В этой главе оценена сбалансированность продукционно-деструкционных процессов

западной акватории 4 значения продукции гидробионтов в целом оказываются ниже, чем в восточной акватории 3, что связано с высокой эффективностью выноса водным потоком БВ и биомасс гидробионтов из акватории 4 в

в различных частях экосистеме Каспийского моря. В Северном Каспии (акватории 1-4) значимость процессов, формирующих запас ОВ, существенно меняется по районам (табл. 5.2). В акватории 1 в приходной части существенна роль процессов первичного продуцирования ОВ и его биотрансформации. В акваториях 2 и 3, как и для всей северной части моря, в формировании пула  $N_{орг}$  существенна роль процессов первичного продуцирования ОВ, адвективного переноса субстанций из соседних акватория и биотрансформации вещества, а при формировании пула  $P_{орг}$  роль адвективного переноса незначима. В акватории 4 пул  $N_{орг}$  формируется преимущественно за счет адвективного переноса вещества, а  $P_{орг}$  - за счет процессов первичного продуцирования и биотрансформации.

В акваториях 5-8 (средний Каспий) наиболее существенную роль в формировании пула ОВ играют процессы адвективного переноса веществ из соседних акваторий, первичной продукции и биотрансформации БВ. В восточных акваториях в поддержании запасов ОВ особенно значимы процессы вертикального обмена с нижележащими слоями, а в западных акваториях вертикальный перенос способствует выносу растворенных органических компонентов N и P в подповерхностные слои.

Расходная составляющая баланса ОВ показывает повсеместно наибольшую значимость процессов потребления растворенных и взвешенных веществ бактериями (в западных акваториях этот процесс развивается активнее). Адвективный вынос компонентов водным потоком в соседние акватории особенно существенен для формирования пула  $N_{орг}$ .

Продукция зоопланктона играет второстепенную роль в формировании запасов  $N_{орг}$  и  $P_{орг}$  как в водах северного Каспия, так и в его средней части.

Общее поступление автохтонного и аллохтонного вещества в акваториях 1-4 составляет соответственно 1428.02, 1034.41, 1107.72 и 2811.18 тыс. т N/год и 361.12, 208.94, 203.31 и 175.69 тыс. т P/год. Оцененное отношение вновь образованного и поступившего  $N_{орг} : P_{орг}$  меняется от 4 : 1 (акватория 1) до 16 : 1 (акватория 4), а в среднем для Северного Каспия составляет 6 : 1. В водах средней части моря в акваториях 5-8 общее поступление автохтонного и аллохтонного вещества составляет 6605.6, 11485.8, 5493.5, 14200.0 тыс. т N/год и 946.6, 536.9, 1039.7, 838.3 тыс. т P/год соответственно. Отношение вновь образованного (включая привнесенное)  $N_{орг} : P_{орг}$  меняется от 5.3 (акватория 7) до 21.4 (акватория 6). В водах западных акваторий значения  $N_{орг} : P_{орг}$  в целом ниже (среднее 6.2), чем в восточных акваториях (среднее 19.2).

Расчеты показали, что в северных акваториях 1-4 образование ОВ (включая поступление из внешних источников) превышает его потери (4.1 - 27.6% по  $N_{орг}$  и на 2.4 - 24.6% по  $P_{орг}$ ), а в целом для северного Каспия это превышение составляет 20.5% по  $N_{орг}$  и в 12.7% по  $P_{орг}$ . В водах средней части моря акватории по-разному обеспечены органическими компонентами N и P. В западных акваториях 5 и 7 потери  $N_{орг}$  и  $P_{орг}$  в целом выше (соответственно на 28.9-31 и 8.3-21.6%), чем их образование. В восточных акваториях 6 и 8 картина обратная: здесь образование  $N_{орг}$  и  $P_{орг}$  в целом превышает (соответственно на 35-44.3 и 19.1-38.6%) их потери. Однако расчеты общего баланса органических компонентов N и P для всей средней части моря (без учета роли гори-

зонтального переноса БВ) показали, что образование и поступление  $P_{орг}$  практически сбалансировано его потерями (невязка 0 4%), а для  $N_{орг}$  поступление на 20 5% выше его потерь

Таблица 5.2. Расчетный баланс аллохтонных и автохтонных потоков органического вещества для акваторий 1-4 Каспийского моря, (числитель - для соединений N, знаменатель - для соединений P)

Составляющие баланса	Параметр	Акватория 1		Акватория 2		Акватория 3		Акватория 4		Северный Каспий	
		тыс т/год	%	тыс т/год	%	тыс т/год	%	тыс т/год	%	тыс т/год	%
<b>Приход:</b>											
<i>Первичная продукция</i>											
	PF1 <sub>N</sub>	348 09	24.4	204 33	19.7	221 19	20.0	165 70	5.9	939 31	17.4
	PF1 <sub>P</sub>	121 80	33.7	66 38	31.8	68 20	33.5	52 65	30.0	309 03	33.6
	PF2 <sub>N</sub>	126 01	8.8	60 18	5.8	68 10	6.1	48 56	1.7	302 85	5.6
	PF2 <sub>P</sub>	27 69	7.7	13 91	6.7	14 50	7.1	8 60	4.9	64 70	7.0
	PF3 <sub>N</sub>	127 22	8.9	56 74	5.7	66 25	6.0	50 46	1.8	302 67	5.6
	PF3 <sub>P</sub>	25 50	7.1	11 56	5.5	11 95	5.9	8 29	4.7	57 30	6.2
<i>Поступление со стоком рек</i>											
	DON	126 12	8.8	12 95	1.3	0 0	0 0	1 03	0.1	140 10	2.6
	DOP	18 80	5.1	0 16	0.1	0 0	0 0	0 37	0.2	19 33	2.1
	ND	98 47	6.9	19 36	1.9	0 0	0 0	3 24	0.1	121 07	2.2
	PD	14 27	4.0	2 35	1.1	0 0	0 0	0 02	0.0	16 64	1.8
<i>с атмосферными осадками</i>											
	DON	9 04	0.6	6 81	0.7	8 32	0.8	6 47	0.2	30 64	0.6
	DOP	0 14	0.0	0 10	0.0	0 12	0.1	0 10	0.1	0 46	0.1
	ND	1 81	0.1	1 36	0.1	1 66	0.1	1 29	0.1	6 12	0.1
	PD	0 14	0.0	0 10	0.0	0 12	0.1	0 10	0.1	0 46	0.1
<i>с переносом из соседних акваторий</i>											
	DON	2 52	0.7	283 44	27.4	342 58	30.9	2270.12	80.7	1940 80	35.9
	DOP	0 0	0.0	7 54	3.6	6 86	3.4	40 43	23.0	32 88	3.6
	ND	0 02	0.0	6 03	0.6	5 48	0.5	18 70	0.7	12 86	0.2
	PD	0 01	0.0	1 57	0.8	1 53	0.8	5 01	2.9	0 0	0.0
<i>с разложением детрита</i>											
	ND	588 72	41.3	381 21	36.8	394 14	35.6	245 61	8.7	1609 68	29.8
	PD	152 77	42.4	105 27	50.4	100 03	49.1	60 12	34.1	418 19	45.5
<b>Всего:</b>											
	$N_{орг}$	1428 02	100.0	1034 41	100.0	1107 72	100.0	2811 18	100.0	5406 10	100.0
	$P_{орг}$	361 12	100.0	208 94	100.0	203.31	100.0	175 69	100.0	918 99	100.0
<b>Расход:</b>											
<i>Продукция зоопланктона</i>											
	PZ1 <sub>N</sub>	92 40	8.0	65 59	7.9	69 18	8.6	53 01	2.0	280 18	6.5
	PZ1 <sub>P</sub>	34 93	12.8	26 18	13.0	26 41	13.9	17 43	10.2	104 95	13.1
	PZ2 <sub>N</sub>	16 61	1.4	14 20	1.7	14 52	1.8	10 20	0.4	55 53	1.3
	PZ2 <sub>P</sub>	10 08	4.8	11 36	5.7	11 99	6.3	7 39	4.3	43 82	5.5
<i>Потребление бактериями</i>											
	DON+ND	503 91	43.7	392 11	47.5	417 71	52.1	260 48	9.7	1574 21	36.6
	DOP+PD	203 93	74.8	153 71	76.3	144 54	76.0	90 05	52.5	592 23	73.8
<i>Седиментация</i>											
	ND	6 81	0.6	5 53	0.7	5 77	0.7	2 92	0.1	21 03	0.5
	PD	1 77	0.6	1 54	0.8	1 58	0.8	0 77	0.4	5 66	0.7
<i>Вывос в соседние акватории</i>											
	DON	520 83	45.2	342 56	41.5	290 62	36.3	2332 04	86.4	2332 04	54.2
	DOP	15 71	5.9	6 85	3.4	4 47	2.4	45 73	26.7	45 73	5.7
	ND	11 92	1.0	5 48	0.7	3 91	0.5	37 10	1.4	37 09	0.9
	PD	3 02	1.1	1 54	0.8	1 07	0.6	10 06	5.9	10 06	1.2
<b>Всего:</b>											
	$N_{орг}$	1152.48	100.0	825 47	100.0	801 71	100.0	2695 75	100.0	4300 26	100.0
	$P_{орг}$	272 44	100.0	201 18	100.0	190 06	100.0	171 40	100.0	802 45	100.0
<b>Баланс/Невязка:</b>											
	$N_{орг}$	275.54	19.3	208 94	20.2	306.01	27.6	115.43	4.1	1105.84	20.5
	$P_{орг}$	88 68	24.6	7 76	3.7	13 25	6.5	4 29	2.4	116 54	12.7

### Выводы.

В результате данного исследования выявлены основные закономерности трансформации и круговорота соединений биогенных элементов (N, P, Si) в экосистеме Каспийского моря.

кого моря. В процессе решения поставленных задач получены следующие выводы.

1. В конце XX в. в каспийской экосистеме отмечались существенные изменения:

- из-за повышения увлажненности в бассейне Волги устойчиво рос (до 1996 г) уровень моря, что привело к распреснению поверхностных вод Среднего и Южного Каспия, ухудшению здесь вертикального обмена кислородом и началу восстановления в придонном слое анаэробных условий;

- в условиях повышенной водности происходит расширение по сравнению с маловодным периодом площадей распресненных приустьевых акваторий в 1.5 раза (до 75 тыс. км<sup>2</sup>);

- концентрации фосфатов, нитратов и силикатов в водах Северного Каспия снизились за последние 60 лет на 20-30%, а растворенного ОВ возросло до 10-15 мг С/л (в 2-3 раза выше, чем в Черном море), что свидетельствует об активизации продукционно-деструкционных процессов;

- зарегулирование речного стока на фоне повышения водности лет привело к изменению солевого режима вод Северного Каспия, трансформации его гидрологической структуры (развитие мощного пикноклина), ухудшению условий вертикального обмена О<sub>2</sub> и, как следствие, расширению зон летней придонной гипоксии на мелководье, занимающей здесь сегодня площади до 30 тыс. км<sup>2</sup> при объеме половодья 120 км<sup>3</sup>;

- рост загрязнения прибрежных морских вод продуктами хозяйственной деятельности нефтяными углеводородами (1-6 ПДК при максимуме 10-20 ПДК в районе Тенгизского месторождения), фенолами (2-8 ПДК), тяжелыми металлами (Си и Hg - до 5-11 ПДК), определил существенное ухудшение их качества по этим показателям, накопление токсикантов в донных отложениях и в морских организмах (по Pb и Cd - в 2-3.6 раз выше максимально допустимого уровня). В результате изменились структура и численность популяций промысловых гидробионтов и объектов их питания.

2. Систематизация и анализ возможностей существующих математических моделей отдельных компонентов морских экосистем показали, что с помощью боксовой гидроэкологической модели трансформации соединений биогенных элементов на основе взаимосвязанного описания химических, биологических и физических процессов можно достаточно адекватно исследовать:

- объемы поступления БВ в водоем с речным стоком, атмосферными осадками, в результате обмена на границе раздела вода-дно;

- реакцию экосистемы на изменение мощности этих источников по изменению потоков БВ за счет развития процессов биотрансформации (потребление питательных веществ, выделение продуктов метаболизма, отмирание гидробионтов, интенсивность трофодинамических взаимодействий), а также при переносе компонентов водными массами через границы между соседними акваториями;

- эффекты евтрофирования поверхностных вод по возрастанию биомассы гидробионтов, интенсивности и продолжительности периодов цветения планктона, изменению условий биогенного лимитирования процессов биопродукции (Р или N);

- интенсивность вертикального переноса и обмена БВ и ОВ между верхним и нижним слоями моря, а также условия создания дефицита О<sub>2</sub> в придонных водах;

- роль основных биологических компонентов, участвующих в продукционном цикле, и способствующих перераспределению БВ в столбе воды, а также по внутригодовому их поступлению и последующей трансформации экосистеме моря.

3. Расчетная внутригодовая динамика концентраций БВ в целом отвечает имеющимся представлениям о характере изменчивости биогенных субстанций в Каспийском море. Выбранная модель, таким образом, адекватно отражает картину сезонных изменений БВ

и может использоваться для исследования процессов их трансформации в водоеме.

4. Расчетные сезонные изменения концентраций минеральных форм БВ и амплитуды их колебаний меняются по акваториям моря. Это в целом связано с разными условиями поступления БВ в морскую среду и с их последующей трансформацией. Принципиальными источниками БВ в северных мелководных акваториях служат речной сток и седименты, а в средней и южной частях моря - горизонтальный перенос водными массами из соседних акваторий и вертикальный обмен между нижележащими и поверхностными слоями. В глубоководных районах вертикальный обмен обеспечивает вынос из нижних слоев к поверхности существенного количества БВ, и поэтому в этих районах содержание БВ может быть более высоким, чем даже в северных мелководных зонах.

5. Модельные расчеты показали, что с речным стоком Каспийское море ежегодно получает >40 тыс. т P, >400 тыс. т N, ~2500 тыс. т С и ~800 тыс. т Si. Основное количество P поступает в Каспий с волжскими водами в форме DOP (45.4-60.7%), в форме PD поступает 27-42%, а в форме DIP - 9.5-14.8%. Доминирующей формой N в волжском стоке является DON (27.6-46.7%), в форме ND поступает от 16.8 до 41.5%. В паводковый период (апрель-июнь) с волжскими водами в Каспийское море поступает от 50.2 до 58.6% годового выноса соединений P, от 46.6 до 62.1% соединений N и 56.5% DISi.

Биогенный сток рр.Урал и Терек отличается от волжского стока не только количественно, но и качественно. Со стоком Урала P поступает в Каспий в основном в форме PD (от 71.9 до 91.3%). Среди фракций N в стоке Урала высока доля ND (в среднем 54%), на долю DON приходится в среднем 36.2%. В период наибольшего стока (июнь-август) с водами Урала в море поступает 27 - 36.6% годового выноса соединений P, 22.3 - 42.5% соединений N и 35% DISi.

В стоке Терека среди фракций P доминируют растворенные фракции: на долю DOP приходится в среднем 65.2% (в отдельные месяцы - до 81.9%), на долю DIP - 12.4-44.7%. Доля взвешенного N в стоке этой реки среди остальных его фракций достигает 26.8-42.1%, DON - 18-31.9%, а минеральных фракций N - до 45%. За июнь-август (период наибольшего стока) с водами Терека в море выносятся 27 - 36.6% годового выноса соединений P, 22.3 - 42.5% соединений N и 35% DISi. Вынос БВ в Каспийское море со стоком рр.Сулак и Самур незначителен.

6. По результатам моделирования оценен баланс БВ в Северном Каспии. Общее поступление соединений N и P в водную среду северного Каспия из основных внешних источников (речной сток, атмосферные осадки), а также за счет внутренних процессов (развития обменных процессов на границе вода-дно и переноса БВ водными потоками из соседних акваторий) соответственно составляет 3.646 - 4.134 мг N/(л год) и 0.196 - 0.401 мг P/(л год) (или соответственно 497.3 - 581.5 тыс. т N и 28.8 - 62.0 тыс. т P).

Потери N из водной среды различных районов Северного Каспия при седиментации ND составляют 0.526-0.872 мг N/(л год) (или 60.1-139.1 тыс. т N). Роль этого процесса в общих потерях N-содержащих компонентов оценивается здесь в 3-22.8%. Водным потоком из разных районов Северного Каспия выносятся 4.000-16.851 мг N/(л год) (или 638-1899.9 тыс. т N), что составляет в расходной части баланса БВ 82.1-97%.

Расходная часть баланса соединений P имеет несколько другую картину. В Северном Каспии седиментация PD является основным процессом, регулирующим запас соединений P в водной среде (51.9-76.9% общих потерь), потери на вынос соединений P водным потоком в пределах 23.1-48.1%.

Количества N и P, поступающие в воды различных районов Северного Каспия и расходующиеся здесь, в целом сбалансированы. Наибольшая сбалансированность характерна для соединений P. Для соединений N невязка баланса между отдельными районами

акватории может достигать 25-27%.

7. По результатам моделирования оценена интенсивность продукционно-деструкционных процессов и составлен баланс ОВ для вод Северного Каспия. Для всей его акватории расчетные значения годовой первичной продукции составили 8.8 - 17.7 (среднее 13.3) млн. т С. Полученное годовое значение близко величине первичной продукции 20-21 млн. т ОВ (или 10-10.5 млн. т С), оцененной для этого района по кислородным измерениям фотосинтетической активности фитопланктона. За год фитопланктон здесь потребляет 215.53 тыс. т Р и 773.59 тыс. т N.

Количество образованного в водах Северного Каспия автохтонного ОВ превышает выносимое со стоком Волги в 6 раз (в единицах С). При этом 38% количества ОВ, сформированного за год фитопланктоном (-5 млн. т С) разлагается в процессе бактериальной деструкции.

8. Расчет внутренних потоков БВ в процессе их биотрансформации (потребление, выделение веществ, отмирание гидробионтов) показал, что в Северном Каспии гидробионтами потребляется соответственно ~2500 тыс. т N, до 900 тыс. т Р и >6000 тыс. т Si. На долю бактерий приходится наибольшее потребление БВ (58.7-66% N, 64.6-70.3% P, 59.1-63.7% Si), фитопланктон потребляет 27-35% N, 21-27% P, 25-33% Si, а зоопланктон - 6-7% N, 7-9% P и 7-11% Si.

За счет метаболических процессов микроорганизмами в Северном Каспии создается >800 тыс. т N, до 300 тыс. т Р и ~2000 тыс. т Si. Это количество образующихся БВ, как правило, превышает их поступление в морскую среду с речным стоком.

При отмирании гидробионтов в Северном Каспии образуется до 1500 тыс. т N, >500 тыс. т Р и 4000 тыс. т Si. Значительный вклад в детрит вносят бактерии (41.6-50% ND, 54-61% PD, и 45-49% SiD). На долю фитопланктона приходится 41-50% ND, 28-36% PD и 36-45% SiD. Зоопланктон образует 7-9% общей массы ND, 8-10% PD и 9-13% SiD.

Суммарное годовое поступление ОВ (автохтонного и аллохтонного) в Северном Каспии составляет ~6000 тыс. т N и >900 тыс. т Р. Соотношение сформированного (автохтонного) и привнесенного (аллохтонного) ОВ,  $N_{org} : P_{org}$ , в среднем здесь составляет 6:1.

9. Рассчитанные на модели годовая динамика концентраций БВ, их соотношения, внутренние потоки компонентов и продукция ОВ адекватно отражают природные процессы и условия евтрофирования вод разных акваторий Каспийского моря.

Соотношение  $N_{tot} : P_{tot}$  в расходной составляющей баланса БВ в различных акваториях Северного Каспия составляет в среднем 15.6:1. Среднее соотношение DON:DOP равно 65.5:1, а  $N_{min} : DIP$  - 9.3:1. Соотношение детритных компонентов ND:PD в расходной части баланса БВ равно в среднем 4.6:1, а  $N_{biomass} : P_{biomass}$  - 3.3:1. Компоненты  $N_{part}$  и  $P_{part}$  в расходной части соотносятся здесь в среднем как 4:1.

Различия в значениях и соотношениях концентраций БВ выявлены для северных и южных, а также для западных и восточных акваторий моря. Они связаны с изменением характеристик водной среды (температура, освещенность) и условий поступления БВ в акватории моря (с речным стоком, при апвеллинге вод в восточных акваториях средней части моря). Весной в Северном Каспии активно расходуются запасы нитратов и фосфатов, накопленный за зиму. В средней и южной частях моря снижения концентраций фосфатов не происходит, очевидно, по причине недостатка в воде минеральных форм N.

Пространственно-временная изменчивость величин отношений  $DISi/DIP$ ,  $DISi/N_{min}$  и  $N_{min}/DIP$  свидетельствует о неэквивалентном поступлении БВ из внешних источников на различных участках морской акватории. Внутригодовые значения  $N_{min}/DIP$  показывают, что в Северном Каспии только весеннее развитие диатомовых лимитируется Р, развитие здесь фитопланктона осенью (а в восточных районах и в

течение года) лимитируе-тся одновременно и P, и N. В остальных районах моря (Средний и Южный Каспий) процессы продукции гидробионтов лимитируются в основном N. В целом отмечается общая тенденция снижения среднемесячных значений весовых отношений  $DISi/DIP$  и  $Nmin/DIP$ , а также увеличения  $DISi/Nmin$  от северных акваторий к южным.

Особенность евтрофирования вод Каспийского моря проявляется в том, что значения  $Ntot/Ptot$  существенно меняются по акваториям моря. Зимой в водах Северного и Среднего Каспия эти значения составляют 35-42 и 24 - 26 соответственно. В период весеннего цветения диатомовых в Северном Каспии значения  $Ntot/Ptot$  снижаются до 25-30, а в летне-осенний период они составляют 15-20. В Среднем и Южном Каспии в эти сезоны значения  $Ntot/Ptot$  не превышают 20-21.

Вычисленные годовые значения продукции гидробионтов в западных акваториях в целом выше (бактерий в 1.5-5.8, фитопланктона в 1.2-3.9, зоопланктона в 1.2-5.5 раза), чем в восточных. Отношения годовых значений продукции гидробионтов (в единицах C, Si, N, P) в западных и восточных акваториях меняются мало, однако обнаруживается тенденция возрастания отношений продукции от северных акваторий моря к южным.

Значения суммарной первичной продукции определяются преимущественно продукцией диатомовых: в северной части моря их доля в ПФ составляет 58.4-66.6, в средней части - 67.4-78.1, а в южной - 57.4-80.4%. Вклад зеленых водорослей в ПФ составляет 18-25.6%, 14.7-22 и 14-28.4%, а синезеленых - 14.1-15%; 6.4-10.6 и 5.7-14.3% соответственно в северных, средних и южных акваториях моря.

10. Общее поступление автохтонного и аллохтонного ОВ в Северном Каспии составляет 1034,41 - 2811.18 тыс. т N/год и 175.69 - 361.12 тыс. т P/год. В водах различных районов средней части моря общее поступление автохтонного и аллохтонного ОВ изменяется от 5493.5 до 14200.0 тыс. т N/год и 536.9 до 1039.7 тыс. т P/год.

В северных акваториях моря образование ОВ (включая поступление из внешних источников) превышает его потери (на 4.1 - 27.6% по Norg и на 2.4 - 24.6% по Porg), а в целом для Северного Каспия это превышение составляет 20.5% по Norg и в 12.7% по Porg. В западных акваториях Среднего Каспия потери Norg и Porg в целом выше (соответственно на 28.9-31 и 8.3-21.6%), чем их образование. В восточных акваториях картина обратная: здесь образование Norg и Porg в целом превышает (соответственно на 35-44.3 и 19.1-38.6%) их потери. Однако для всей средней части моря (без учета роли горизонтального переноса БВ) образование и поступление Porg практически сбалансировано его потерями (невязка всего 0.4%), а для Norg поступление на 20.5% выше его потерь.

Таким образом, результаты данной работы впервые позволили:

- получить количественные оценки внутригодовой совместной динамики: растворенных минеральных компонентов N ( $NH_4$ ,  $N0_2$ ,  $N0_3$ ), Si ( $DISi$ ) и P ( $DIP$ ); органических компонентов C (DOC), N (DON) и P (DOP); взвешенных детритных компонентов N (ND) и P (PD), а также растворенного  $O_2$  в 10-и акваториях Каспийского моря;
- оценить внутренние потоки соединений N и P, формирующиеся в экосистеме за счет процессов биотрансформации БВ и учитывающие основные функции гидробионтов (потребление веществ; выделение продуктов обмена, отмирание биомассы);
- рассчитать показатели биопродукции (для бактерий, диатомовых, зеленых и синезеленых водорослей, растительного и хищного зоопланктона) и показать их внутригодовая изменчивость;
- составить баланс аллохтонных и автохтонных потоков ОВ для акваторий Каспийского моря, оценить относительный вклад в нем составляющих, обеспечивающих

поступление (первичная продукция, вынос с речным стоком, атмосферными осадками, адвекция с соседних акваторий, разложение детрита) и потери (продукция зоопланктона, потребление бактериями, седиментация, вынос в соседние акватории) компонентов ОВ.

### **Список опубликованных работ по теме диссертации:**

1. Леонов А.В., Стыгар О.В. Сезонные изменения концентраций биогенных веществ и биопродуктивности вод северной части Каспийского моря. Вод. ресурсы, 1999. Т. 26. № 6. С. 743-756.

2. Леонов А.В., Стыгар О.В. Математическое моделирование процессов биотрансформации биогенных веществ для изучения условий евтрофирования вод поверхностного слоя Каспийского моря. Вод. ресурсы. 2001. Т. 28. № 5. С. 587-605.

3. Стыгар О.В., Леонов А.В. Математическое моделирование поведения экосистемы Каспийского моря. Тез. докл. Всерос. научной школы "Математические методы в экологии". Петрозаводск. 10-16 июня 2001 г. Петрозаводск. 2001 г. С. 106-108.

4. Стыгар О.В., Леонов А.В. Евтрофирование экосистемы Каспийского моря: исследование с помощью математического моделирования. Тез. докл. VIII съезда Гидробиологич. общества РАН. Калининград. 16-23 сентября 2001 г. Калининград. Т. 2. С. 208-209.

5. Стыгар О.В., Леонов А.В. Математическое моделирование внутригодовой изменчивости гидрохимических и гидробиологических показателей для характеристики продуктивности морских акваторий (на примере Каспийского моря). Материалы Международной научно-практической конференции "Прибрежное рыболовство - XXI век". 19-21 сентября 2001. Южно-Сахалинск. Тр. СахНИРО. 2002. Т. 3. С. 191- 213.

6. Чичерина О.В., Леонов А.В., Фашук Д.Я. Географо - экологический портрет Каспийского моря и современные тенденции изменения его экосистемы. Вод. ресурсы. 2004. т. 31. № 3. С. 299 -317.

7. Леонов А.В., Чичерина О.В. Роль микроорганизмов в трансформации соединений биогенных элементов в экосистеме Каспийского моря: оценка с помощью математического моделирования. Вод. ресурсы. 2004. т. 31. № 4. С. 436 - 450.

8. Leonov A.V., Chicherina O.V. Participation of Microorganisms in Transformation of Organogenic Compounds in the Caspian Sea Ecosystem: Assessment by means of Mathematical Modeling. Proc. VI Internat. Congress on Mathematical Modeling. 20-26 September 2004. Nizhnij Novgorod. Russia.

9. Фашук Д-Я., Чичерина О.В., Леонов А.В. Геоэкологические аспекты моделирования состояния морских экосистем. Известия АН. Серия географическая. 2005. № 2.









Подписано к печати 22.03.2005г.  
Формат 60x90 1/24 объем 1 п.л.  
Тираж 130 экз. Заказ № 201 АПР 2005  
Отпечатано ООО "Ново-Пресс"