

Сахалинский научно-исследовательский институт
рыбного хозяйства и океанографии
(СахНИРО)



ПРИБРЕЖНОЕ РЫБОЛОВСТВО – XXI ВЕК

МАТЕРИАЛЫ
МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
19-21 сентября 2001 г.

Труды СахНИРО
Том 3

Часть 1



Южно-Сахалинск
Сахалинское книжное издательство
2002

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРИГОДОВОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ И ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОДУКТИВНОСТИ МОРСКИХ АКВАТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ КАСПИЙСКОГО МОРЯ)¹

*Стыгар О. В., Леонов А. В.,
Институт океанологии Российской Академии наук,
г. Москва*

Математическая модель трансформации соединений N, P и Si, включающая также растворенный органический C (DOC) и растворенный кислород (O₂), использовалась для исследования внутригодовой динамики биогенных веществ и условий их биотрансформации сообществом микроорганизмов (бактерио-, фито- и зоопланктон). Среднедолгосрочные данные по температуре, освещенности, прозрачности вод и по содержанию биогенных веществ в основных притоках (Волга, Урал, Терек, Сулак, Самур, Кура) моря использовались в качестве входных данных для моделирования изменчивости концентраций органических и минеральных фракций соединений биогенных элементов (C, N, Si, P) и показателей продуктивности микроорганизмов в десяти акваториях Каспийского моря. Анализ полученных данных моделирования проведен с учетом того, что указанные химические и биологические компоненты наиболее важны в формировании сырьевой базы экосистемы моря. Проведен анализ внутригодовой изменчивости отношений N_{min}/DIP в акваториях моря и в речном стоке, которые свидетельствуют о лимитировании первичной продукции P в зоне влияния стока Волги, P и N в зонах влияния стока Урала и Терека и в основном N в средней и южной частях моря.

A mathematical model of transformation of the compounds N, P, and Si, also including the dissolved organic C (DOC) and dissolved oxygen (O₂), was used for studying the intra-annual dynamics of biogenic matters and conditions for their biotransformation with the community of microorganisms (bacterio-, phyto-, and zooplankton). The average long-term data on temperature, illuminance, water transparency, and content of biogenic matters in the main in-flows (the Volga, Ural, Terek, Sulak, Samur, Kura) of the sea were used as input data for modelling a changeability in organic and mineral fractions of compounds of the biogenic elements (C, N, Si, P) and indices of the microorganism productivity on ten areas of the Caspian Sea. Analysis of the obtained data at modelling has been conducted taking into account that the indicated chemical and biological components are the most important in forming a raw material of the sea ecosystem. The intra-annual changeability in the relation N_{min}/DIP in the sea area and river runoff providing the limitation of primary production P in a zone of influence of the Volga runoff, P and N in zones of influence of the Ural and Terek runoffs, and mainly N in the middle and southern parts of the sea has been analyzed.

Каспийское море – пример водоема, имеющего важнейшее экономическое значение по своему биопотенциалу и использованию природных ресурсов. Его экосистема в последние годы была подвержена серьезным глобальным и локальным воздействиям, что выразилось в возросшей активности использования морских ресурсов (в частности, рыбных запасов и полезных ископаемых – нефти и газа на шельфовых участках моря). В связи с возможными нарушениями сложившегося экологического равновесия и баланса биогенных веществ в прибрежных акваториях моря вследствие изменений уровня режима и активной разработки шельфовых месторождений нефти и газа необходимы целенаправленные экологические исследования условий трансформации химических биогенных компонентов экосистемы и показателей продуктивности микроорганизмов, участвующих в трансформации этих веществ, как важнейших составляющих сырьевой базы морской экосистемы и особенно для характеристики современного состояния экосистемы моря и оценки перспектив его изме-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (гранты 97-05-64160, 00-05-64166).

нения при усилении антропогенного воздействия. Такие исследования необходимы еще и потому, что среди наименее изученных проблем до недавнего времени для экосистемы Каспийского моря оставались вопросы формирования продукции фитопланктона, распределения и активности микрофлоры водной среды и донных отложений (Салманов, 1999). В современных условиях также возрастает угроза нефтяного загрязнения акваторий моря вследствие активизации разработок месторождений нефти и газа на шельфовых участках моря, что неизбежно приведет к ухудшению экологического состояния моря и к потенциальному подрыву его биопотенциала.

Возрастание биогенной нагрузки на морские акватории и особенно в прибрежных зонах моря может происходить за счет усиления роли речного стока, сбросов сточных вод из крупных городов либо при аварийных разливах нефти. Морская экосистема чутко реагирует на изменения биогенной нагрузки (в ней меняются внутренние потоки соединений биогенных элементов, условия их биотрансформации и, в частности, потребления биогенных веществ, выделения продуктов метаболизма микроорганизмами, их отмирания, трофические взаимодействия микроорганизмов, меняется также интенсивность и направленность пространственного переноса компонентов водными массами внутри водной экосистемы). Содержание в воде биогенных веществ определяет скорости трансформации загрязняющих веществ (в частности, нефтепродуктов) (Atlas, Bartha, 1972).

Понимание всей совокупности процессов, происходящих в водной среде вследствие изменения биогенной нагрузки, может быть достигнуто при использовании математических моделей, воспроизводящих спектр наиболее важных химико-биологических взаимодействий компонентов водной среды и показателей состояния морской экосистемы. В данной работе представлены результаты анализа условий биотрансформации биогенных веществ сообществом микроорганизмов в экосистеме Каспийского моря с помощью инструмента водноэкологических исследований – апробированной имитационной модели (Леонов, Сапожников, 1997, 2000).

Эта модель рассматривает внутренние потоки и трансформацию растворенных органических и минеральных компонентов N (DON, NH₄, NO₂, NO₃), P (DOP, DIP) и Si (DOSi, DISi), а также растворенного органического C (DOC) и взвешенных компонентов – детрита (ND, PD, SiD) при участии живого вещества – биомасс гетеротрофных бактерий (B), трех групп фитопланктона – диатомовых (F1), зеленых (F2) и сине-зеленых (F3) водорослей, двух функциональных групп зоопланктона – растительноядного (Z1) и хищного (Z2). Биомассы гетеротрофных бактерий вычисляются в единицах C (BC), Si (BSi), N (BN) и P (BP); диатомовых водорослей и растительноядного зоопланктона – в единицах Si (F1Si, Z1Si), N (F1N, Z1N) и P (F1P, Z1P); зеленых и сине-зеленых водорослей, а также хищного зоопланктона – в единицах N (F2N, F3N, Z2N) и P (F2P, F3P, Z2P).

Модель основана на классическом законе сохранения массы веществ – соединений биогенных элементов, их распределения и перераспределения в морской среде в химических компонентах и в живом веществе. Активность микроорганизмов в процессах биотрансформации веществ определяется важнейшими характеристиками состояния водной среды (температура, освещенность, прозрачность). Показатели водного режима определяют особенности развития в течение года гидродинамических процессов в водоеме и специфику горизонтального и вертикального переноса веществ, распределения химических и биологических компонентов в морской экосистеме. Весь водоем подразделяется на десять акваторий – по четыре в северной и средней части и две – в южной части Каспийского моря (рис. 1).



Рис. 1. Подразделение Каспийского моря на акватории 1–10 (стрелки 1, 2 показывают направления переноса пресных и морских вод соответственно)

Система уравнений модели описывает изменения и распределение концентраций химико-биологических компонентов в акваториях моря. Основными процессами, определяющими изменение концентраций веществ, служат: взаимодействия химических и биологических характеристик водной среды, в результате которых осуществляется биотрансформация присутствующих в воде химических веществ; биогенная нагрузка (поступление питательных веществ с речным стоком, атмосферными осадками и из донных отложений) и перераспределение химических веществ и биомасс микроорганизмов по акваториям моря водным потоком. Биотрансформация химических веществ развивается в водной среде в результате активности гидробионтов – потребления ими растворенного и взвешенного вещества для увеличения своей биомассы, выделения веществ при метаболических обменных процессах и за счет отмирания биомассы гидробионтов. Общая структура уравнений модели с формализацией важнейших химико-биологических процессов трансформации биогенных веществ обсуждается в работе (Леонов, Сапожников, 1997).

Основная цель работы – воспроизвести с помощью математической модели комплекс химико-биологических и гидрологических процессов, а также количественно оценить реакцию экосистемы Каспийского моря на внутригодовые изменения природных условий – показателей температурного, водного режима и характеристик речного стока, а также антропогенных воздействий (загрязнение, биогенная нагрузка). Математическая модель отражает практически весь спектр процессов, важных

для изучения взаимодействий химических и биологических характеристик морской экосистемы.

При изучении этих взаимодействий важно выявить роль изменчивости концентраций биогенных веществ в развитии биомасс гидробионтов. Одно из направлений анализа связывается с изучением условий лимитирования биогенными веществами условий формирования биопродуктивности микроорганизмов. Эту информацию можно выявить при анализе изменений концентраций соединений P (особенно DIP), N (минеральных компонентов – NH_4 , NO_3) и Si (DISi) параллельно с анализом изменчивости расчетных значений биомасс микроорганизмов и с оценкой значений их продукции для разных акваторий моря.

Вычисления с помощью модели проводились с шагом 0,1 сут. методом Рунге-Кутты-4 для календарного года (с 1 января по 31 декабря). Расчеты проводились по среднесезонным характеристикам состояния водной среды (температура, освещенность, прозрачность воды, показатели речного стока и расходы воды на границах между акваториями) (Леонов, Сапожников, 1997, 2000; Леонов, Стыгар, 1999).

Расчетная динамика концентраций соединений C, Si, N, P, а также биомасс микроорганизмов в поверхностном слое разных акваторий Каспийского моря (рис. 2–4), показывает, что сезонные колебания концентраций минеральных биогенных веществ и амплитуды этих колебаний меняются по акваториям моря. В целом это связывается с разными условиями поступления биогенных веществ в морскую среду, а также с их последующей трансформацией. Важнейшими биогенными источниками в северных мелководных акваториях Каспийского моря служат речной сток и седименты, а в средней и южной частях моря – горизонтальный перенос веществ водными массами из соседних акваторий и вертикальный обмен между нижележащими и поверхностными слоями. В глубоководных районах моря вертикальный обмен обеспечивает вынос из нижних слоев к поверхности существенных количеств биогенных веществ, и в соответствии с этим в этих районах их содержание может поддерживаться даже на более высоком уровне, чем в северных мелководных зонах моря.

В целом по акваториям моря содержание N_{\min} DIP и DISi высокое зимой и в начале весны. Подъем концентраций биогенных веществ в эти периоды объясняется тем, что поступление биогенов из внешних источников в море в целом выше их расходования (низкая утилизация гидробионтами при неблагоприятных условиях среды по температуре, освещенности, прозрачности). Летом содержание биогенов снижается до минимальных и характерных для разных акваторий моря значений (см. рис. 2–4).

Пределы колебаний в течение года концентраций 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 существенно. 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 развития биомасс микроорганизмов (наиболее интенсивно в северных акваториях). Летом активное развитие окислительной трансформации N (нитрификация) поддерживает в водной среде присутствие NO_2 (на уровне 2–5 мкг N/л в северных акваториях и 1–3 мкг N/л в средней и южной частях моря). Значимое потребление NO_3 в северных акваториях начинается в апреле, а в южных – в марте. К лету их запас истощается, причем раньше, чем запас DIP. Минимум NO_3 отмечается во всех акваториях моря в июне-сентябре, и это состояние обычно раньше достигается в северных мелководных районах. Содержание NO_3 в морской среде восстанавливается к концу года.

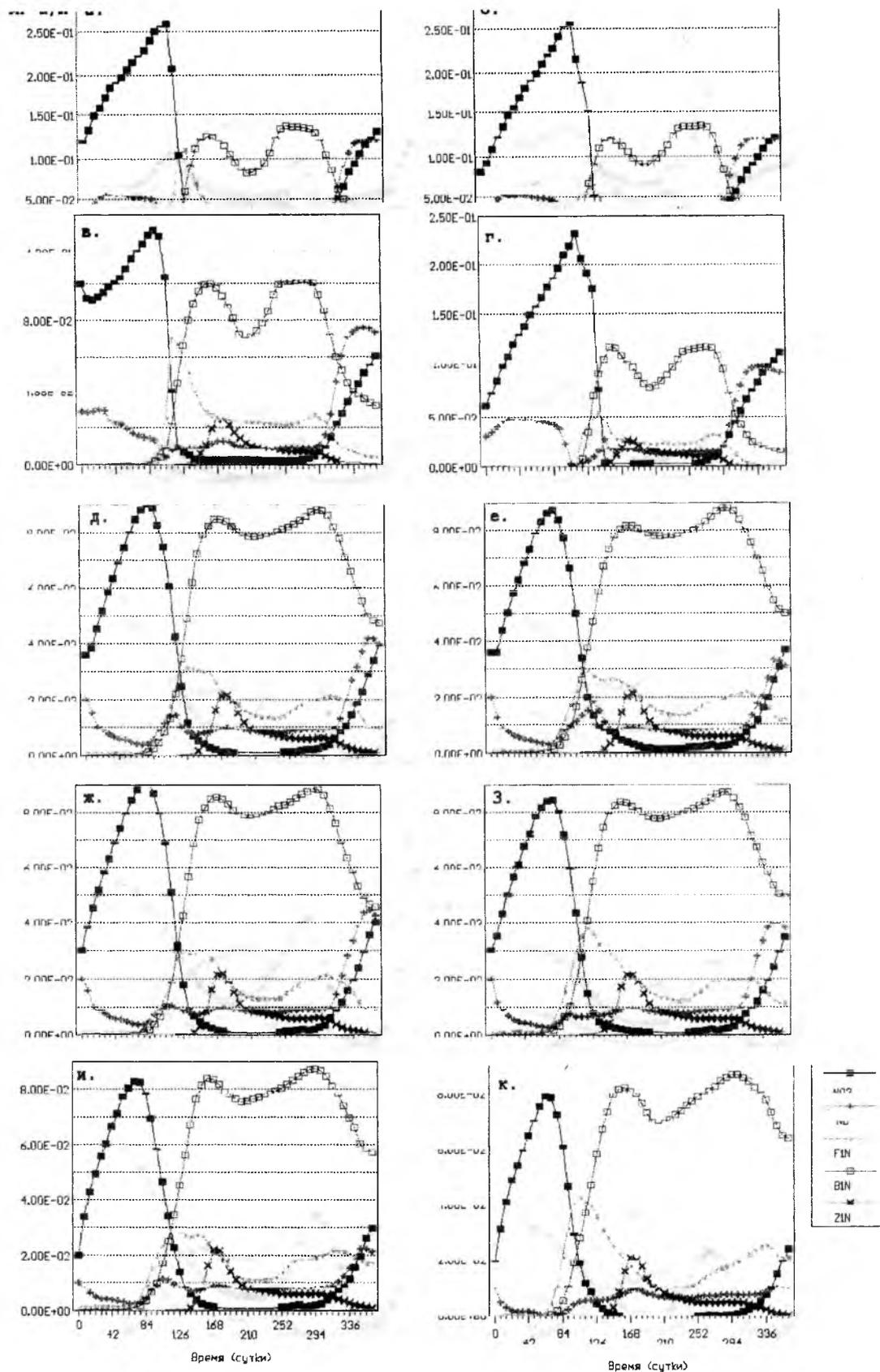


Рис. 2. (I). Расчетная динамика химических и биологических компонентов N в акваториях Каспийского моря (I – NO_3 , ND, F1N, B1N, Z1N – 1–5 соответственно; II – NH_4 , NO_2 , F2N, F3N, Z2N – 6–10 соответственно).

Здесь и на рис. 3, 4: а, в, д, ж, и – западные акватории моря 1, 4, 5, 7, 9; б, г, е, з, к – восточные акватории моря 2, 3, 6, 8, 10 соответственно

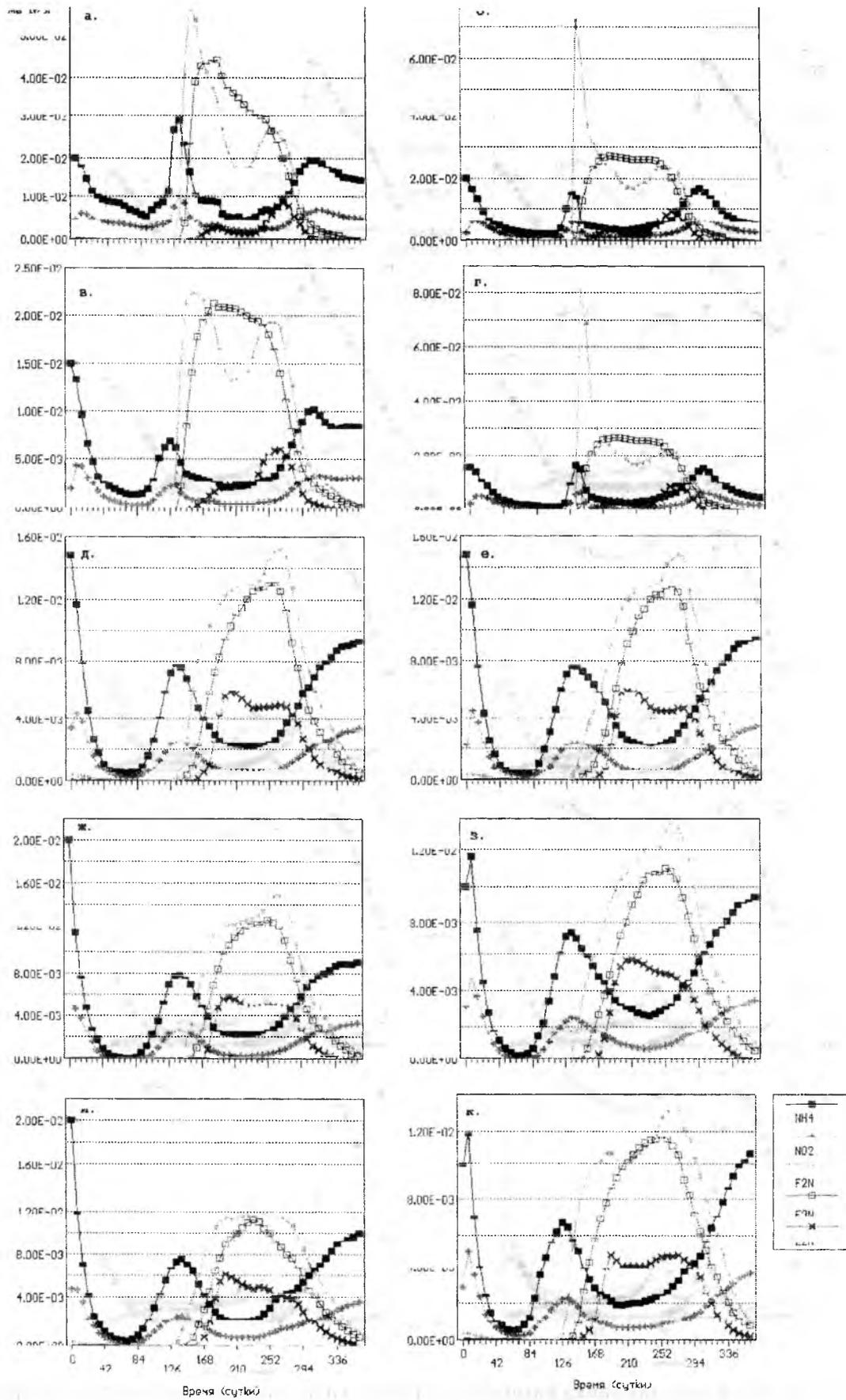


Рис. 2 (II)

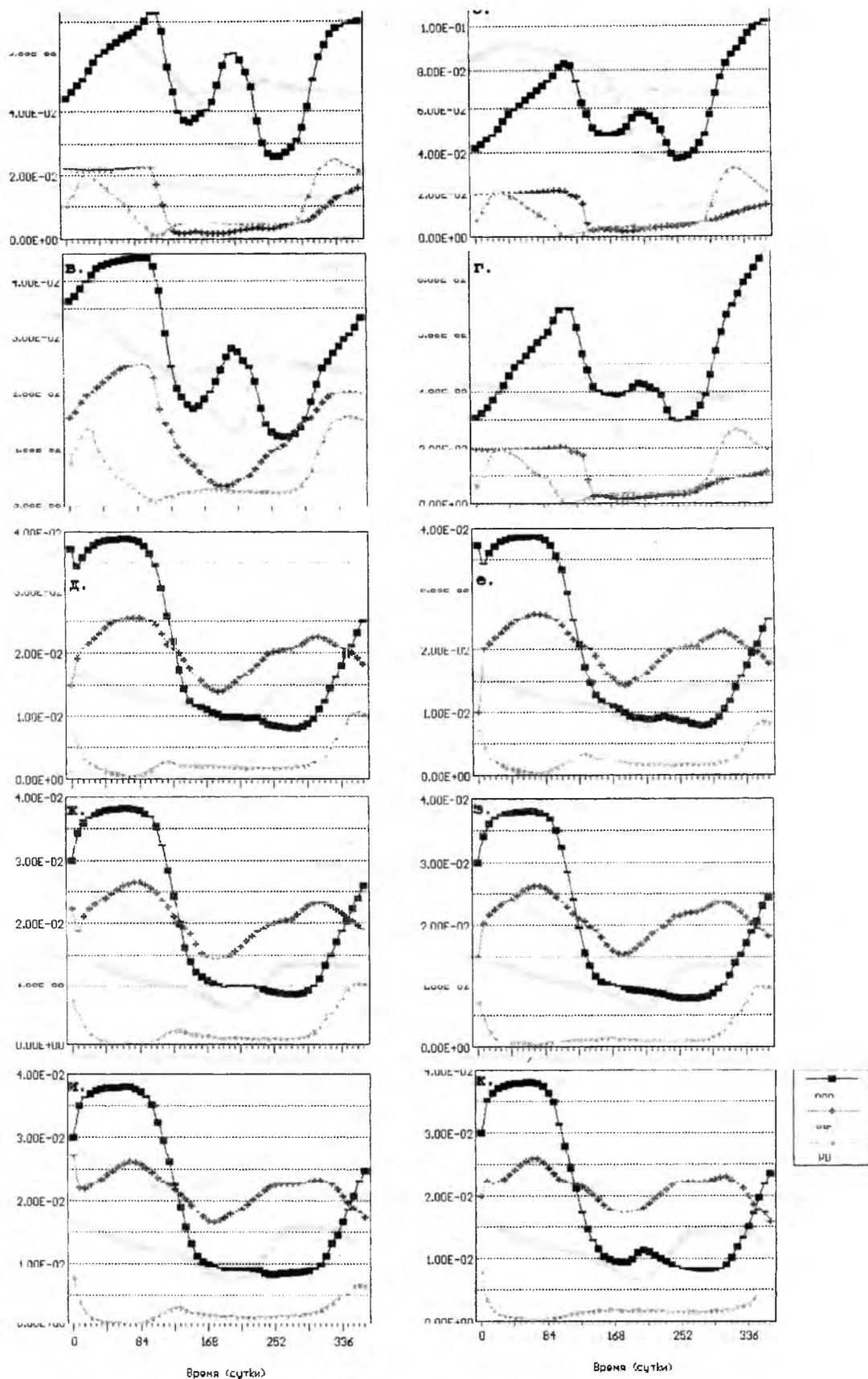


Рис. 3. Расчетная динамика соединений P в акваториях Каспийского моря (1–3 – DOP, DIP и PD соответственно)

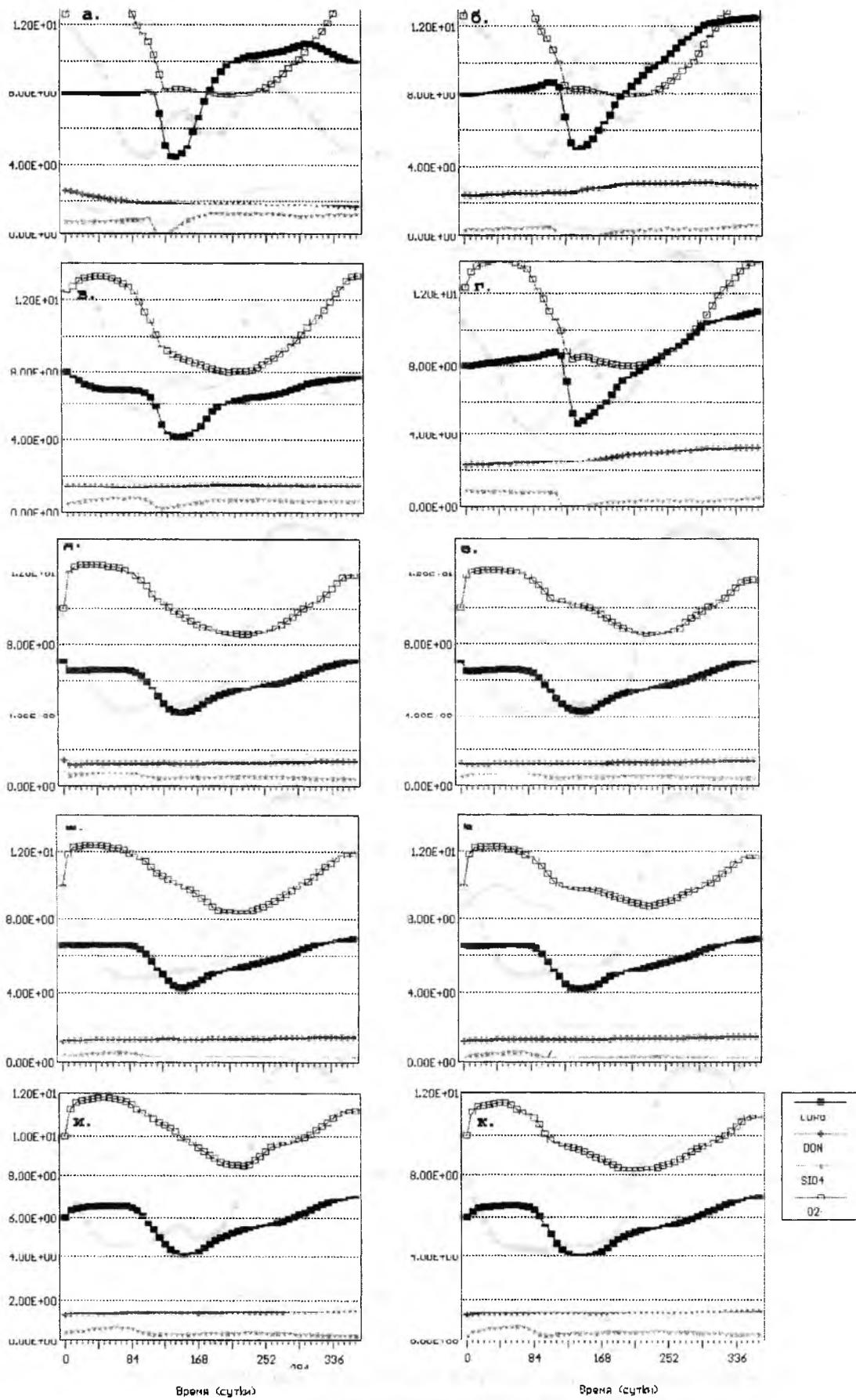


Рис. 4. Расчетная динамика C_{org} , DON, DIS_i и O_2 (1–4 соответственно) в акваториях Каспийского моря

Диапазон изменений концентраций $DISi$ в акваториях 1–10 составляет 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. Четкие 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 (вследствие поступления $DISi$ с речным стоком и за счет процессов внутренней циркуляции водных масс).

Расчетные колебания 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.

Внутригодовые изменения концентрации БВ отражаются моделью вполне реалистично: в северных акваториях накопленный за зиму запас минеральных компонентов (нитратов и фосфатов) активно расходуется весной развивающимся фитопланктоном; в средней и южной частях моря интенсивного снижения концентрации фосфатов весной не происходит, очевидно, из-за недостаточного присутствия в воде соединений N. Более полное использование фитопланктоном P происходит только при достаточно высоком содержании минеральных форм N. Стимулирующий продукцию фитопланктона эффект вызывает не один биогенный элемент (P, N или Si), а их сочетание. Особенно характерно это для случаев, когда соединения биогенных элементов присутствуют в малом количестве (Россолимо, 1977), что типично для пресноводных олиготрофных водоемов, а также незагрязненных морских акваторий. Изменения в течение года концентраций органических компонентов свидетельствуют об интенсивном развитии продукционно-деструкционных процессов, особенно в северной части моря. В целом расчетная картина сезонных изменений концентраций биогенных веществ соответствует имеющимся среднесезонным данным по изменчивости биогенных компонентов в разных акваториях моря (табл. 1) (Монографический справочник..., 1996).

Влияние биогенных веществ на продукцию микроорганизмов исследуется по результатам моделирования на основе анализа условий биотрансформации соединений N и P в каждой акватории Каспийского моря, учета основных внутренних потоков соединений указанных элементов и соотношений концентраций N и P (минеральных, органических, растворенных, общих). Для всего года оценивается динамика процессов биотрансформации веществ и влияние их изменчивости на биопродуктивность микроорганизмов сообщества. Содержание компонентов P и N по акваториям Каспийского моря колеблется в течение года в достаточно широких пределах (см. рис. 2–4). По соотношению концентраций разных биогенных веществ (соединений P, N, Si) обычно судят о сбалансированности условий формирования биопродукции. Например, в небольших озерах по оцениваемым величинам N/P для зимнего периода судят о динамике условий биогенного лимитирования фитопланктона в течение года (Chiaudani, Vighi, 1975). Отношение концентраций минеральных компонентов P, N, Si в морских водах практически неизменно (Виноградов, 1967), а существенные их колебания, как правило, отмечаются в поверхностном деятельном слое и зависят они от развивающихся в водной среде биохимических процессов (в частности, потребления биогенов планктоном, разложения остатков растений и организмов, метаболических выделений микроорганизмов). Факторы среды обитания (температура, освещенность,

Таблица 1

**Концентрации соединений биогенных элементов и кислорода в акваториях 1-10
Каспийского моря для разных сезонов**

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Зима (XII, I, II)										
NH ₄ , мкгN/л	50-150	50-150	50-80	30-100	20-50	20-40	20-50	20-40	3-10	Окт.30
N ₀₂ , мкгN/л	1-7	2			2-5	2-3	3-7	2-4	2-8	2-4
N ₀₃ , мкгN/л	20-140	60		20-50	30					
DIP, мкгP/л	8-20	5-10	8-20	15-18	10-30	20-30	10-30	5-10	15-40	10-30
DISi, мкгSi/л	300-1100	500	200-600	400-500	200-900	200-600	400-800	100-400	400-600	200-400
O ₂ , мгO ₂ /л							10.79	10.74	9.39	10.09
Весна (III-V)										
NH ₄ , мкгN/л	100-150	60-150	30-50	40-90	30	30				
N ₀₂ , мкгN/л	3-7	3-6	>2	2-3	>2	>2	1-4	1-3	1-4	1-2
N ₀₃ , мкгN/л	80-200	50-80	20-50	20-50						
DIP, мкгP/л	7-15	7-13	5-10	7-10	20-45	20-45	15-45	10-30	10-20	5-25
DISi, мкгSi/л	500-1600	900-1400	500-1120	300-800	300-500	400-600	200-400	200-400	400-600	
O ₂ , мгO ₂ /л	10,5-11,9	11,2-11,7	10,7-11,8	10,3-11,7			11.4	11.5	10.7	10
Лето (VI-VIII)										
NH ₄ , мкгN/л	50-200	20-50	20-50	20-50						
N ₀₂ , мкгN/л	5-20	5-10	2-5	4-8	2-5	>2	2-5	2-3	1-5	1-3
N ₀₃ , мкгN/л	20-200	20-50	0-20	10-20	17.5					
DIP, мкгP/л	10-20	10-25	5-10	5-15	10-15	25-30	30-40	25-30	15-40	10-25
DISi, мкгSi/л	750-1500	1000-1500	300-750	250-700	650-700	200-600	200-400	200-400	200-400	200-400
O ₂ , мгO ₂ /л	8,9-9,0	8,0-8,8	7,8-8,7	7,9-8,5			8,6	7,9	7,9	7,9
Осень (IX - XI)										
NH ₄ , мкгN/л	50-100	50-70	20-50	50-100						
N ₀₂ , мкгN/л	2-8	2-3	1-2	2-3	2-6	>1	2-4	1-2	2-7	1-2
N ₀₃ , мкгN/л	50-300	20-100	-20	20-50						
DIP, мкгP/л	15-25	10-25	5-10	10-15	10-15	30-35	25-40	10-35	20-40	10-35
DISi, мкгSi/л	500-2800	1200-1500	750-1000	250-500	600-700	300-500	300-500	200-400	150-350	170-250
O ₂ , мгO ₂ /л	10,5-10,6	11,0-12,2	10,4-10,7	9,7-10,2			9,32	9,3	8,6	8,6

водный режим, речной сток) и состояния водной среды (прозрачность, содержание БВ) регулируют скорости и направленность биохимических процессов трансформации вещества.

Оцененные весовые отношения концентраций биогенных веществ (N_{\min}/DIP и $DISi/DIP$) и их распределение по акваториям моря в целом согласуются с имеющимися в литературе данными (Семенов, 1984). Значения $DISi/DIP$ в акватории 1 выше, чем в других акваториях. Среднемесячные значения отношений $DISi/DIP$ в январе–марте в акваториях 1 и 3 меняются в пределах 37–42, а в других акваториях они находятся в пределах 24,7–29,8. В последующие месяцы величина этого отношения возрастает и достигает максимума в июле (811, 171–184 и 25,4–31, соответственно в акваториях 1, 2–4 и 5–10). К декабрю отношение $DISi/DIP$ снижается (в акваториях 1–4 до 28–82, а в акваториях 5–10 – до 19,7–20,5).

Весовое отношение $DISi/N_{\min}$ в акваториях 1–2 в январе–марте находится в пределах 2,9–4,7, а в акваториях 3–4 и 5–10 оно выше (4,2–7,9 и 8,1–10,4 соответственно). В последующие месяцы отношение $DISi/N_{\min}$ сначала возрастает и в августе достигает максимума (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 снижается и к декабрю падает (до 6,2–8,8; 3,9–9,4 и 10,3–14,3, соответственно в акваториях 1–2, 3–4 и 5–10).

Отношение N_{\min}/DIP в январе–марте в водах акваторий 1–3 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 отношение N_{\min}/DIP снижается: в акватории 1 до 4–4,6 (август–сентябрь), а в акваториях 2 и 3 – соответственно до 1,9–2,6 и 2,8–3,8 (июнь–сентябрь). К декабрю отношение N_{\min}/DIP возрастает в этих акваториях до 8,6–10,3. В акватории 4 отношение N_{\min}/DIP от января–марта к августу–сентябрю равномерно снижается (от 4,8–5,9 до 0,6–0,8), а к декабрю возрастает (до 3). Такая же тенденция выявлена для акваторий 5–10: наибольшие значения отмечены в январе–марте (2,4–3,4), а наименьшие – в июне–июле (0,2–0,3), в последующие месяцы это отношение возрастает (до 1,6–2 в декабре).

Анализ показал, что в Каспийском море имеется общая тенденция снижения среднемесячных весовых отношений $DISi/DIP$ и N_{\min}/DIP , а также увеличения отношения $DISi/N_{\min}$, от северных акваторий к южным. В северной части моря отношения $DISi/DIP$, $DISi/N_{\min}$ и N_{\min}/DIP в течение года различаются в западных и восточных акваториях. Указанные отношения 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 в величинах этого отношения 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 это отношение 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_{min}/DIP меняются в течение года в небольшом интервале. Здесь также невелики различия в величинах указанных отношений между западными и восточными акваториями.

Установленные особенности распределения отношений концентраций $DISi/DIP$, $DISi/N_{min}$ и N_{min}/DIP по акваториям моря свидетельствуют о неэквивалентном поступлении биогенных веществ в морскую среду из внешних источников. Поэтому выявлены отличия в тенденциях пространственной и временной изменчивости отношений концентраций биогенных веществ. Такой вывод очевиден, если учесть данные опытов с добавками в морскую воду минеральных веществ: при добавках DIP обнаруживались значительные изменения во времени скорости потребления P фитопланктоном и в величинах отношения концентраций $DISi/DIP$; при добавках DIP и $DISi$ существенно меняются скорости потребления указанных веществ, а отношение $DISi/DIP$ меняется в небольшом интервале (Sommer, 1985).

«Нормальные» атомные значения N/P меняются в водной среде от 10 до 16 (Максимова, 1974); среднее значение $N/P=15$, и оно близко к таковому в клетках фитопланктона (соответствует значению весового отношения $N/P=7,2$) (Redfield, 1958). По соотношению концентраций минеральных фракций N/P обычно судят о том, какой из биогенных элементов служит потенциальным лимитантом процессов первичного продуцирования органического вещества в водной среде: при весовом отношении $N/P < 7$ лимитантом является 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 первичной продукции органического вещества лимитируются как P , так и N . В остальных акваториях моря процессы развития планктонного сообщества лимитируются преимущественно N .

Условия биогенного лимитирования биопродуктивности меняются во времени и в пространстве и в других морях. Так, в водах Рижского зал. Балтийского моря в продуктивный сезон соотношение минеральных $N/P > 20$ (лимитирующий элемент P), а в граничащих с заливом водах собственно Балтики и Финского зал. в основном N лимитирует развитие процессов первичной продукции (в зимнее время $N/P \sim 9$) (Tamminen, Seppala, 1999). Экспериментами установлено, что в летне-осенний период развитие фитопланктона в прибрежных водах Черного моря лимитируется как нитратами, так и фосфатами, причем в сентябре дефицит по P выражен сильнее, чем по N (Ведерников и др., 1980).

Отношение взвешенных компонентов N/P , учитывающих концентрации детрита и биомассы микроорганизмов, меняется по акваториям моря практически в одних пределах и колеблется от 3 до 5, а в период начала весеннего цветения фитопланктона в акваториях 1-3 оно возрастает до 10, а в акваториях 4-10 - до 7. В южных акваториях цветение фитопланктона из-за более высоких температур воды наступает по крайней мере на месяц раньше. Соответственно и пик отношения взвешенных компонентов N/P фиксируется в более ранние сроки. Расчетные оценки отношений взвешенных компонентов N/P в Каспийском море в продуктивный сезон близки оцененным для вод Рижского зал. (летом оно здесь в пределах 8-8,4) (Tamminen, Seppala, 1999).

Установлены значительные отличия по акваториям моря отношений концентраций N_{tot}/P_{tot} . В водах акваторий 1-2 зимой это отношение равно 35, в акваториях 3, 4-8 оно оценено равным 42 и 24 - 26 соответственно. К началу весеннего цветения диа-

томовых в водах акваторий 1–2 отношений концентраций N_{tot}/P_{tot} снижается до 25, а в летне-осенний период оно меняется в пределах 15–20. В акватории 3 оно снижается до 30, а в акваториях 4–8 – до 20–21. В акваториях 9–10 N_{tot}/P_{tot} в течение года меняется мало и составляет 20–21.

Так как речной сток является наиболее важным источником биогенных веществ для экосистемы Каспийского моря, то изменение соотношений концентраций минеральных веществ в речном стоке и в море должно быть взаимосвязано. Оцененное по среднемноголетним данным (расходы речных вод и содержание в каждый месяц концентраций биогенных веществ в главных реках-притоках) поступление биогенов в акватории 1, 2, 4, 5, 7 и 9 соответственно со стоком Волги, Урала, Терека, Сулака, Самура и Куры показано в табл. 2. Так как авторам неизвестны концентрации органических компонентов N и P в воде Куры, то их вынос в море со стоком Куры не оценивался.

Таким образом, ежегодно с речным стоком в море 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. Минеральные компоненты N в речном стоке на 55,7% представлены NH_4 , на 42,3% – NO_3 , на 2% – NO_2 . От 71,2 до 95,9% годового выноса биогенов в Каспийское море обеспечивается стоком Волги; а с водами Урала, Терека, Сулака, Самура и Куры выносятся 0,8–15,9%, 0,1–18,1, 0,1–4,7, 0–1 и 0,5–10,4% соответственно. В целом речной биогенный сток в Каспийское море характеризуется следующими соотношениями биогенных компонентов: ND/PD=7,3:1, N_{dis}/P_{dis} =15,6:1, N_{tot}/P_{tot} =9,6:1, DISi: N_{min} :DIP=140,4:24,4:1, DOC:DON:DOP=126,0:7,3:1.

Среднемноголетние ежемесячные концентрации DIP меняются в воде Волги в пределах 12,5–22,0 (среднее за год 17,5) мкг P/л; в воде Урала – 13,6–32,5 (22,9); Терека – 4–60 (17,6); Сулака – 9–25 (18,2); Самура – 9–24 (13,8); Куры – 21,5–36,6 (28,5) мкг P/л. Среднемноголетние изменения концентрации N_{min} в разные месяцы в воде Волги составляют 0,193–0,709 (0,420) мг N/л; в воде Урала – 0,178–0,542 (0,367); Терека – 0,104–0,456 (0,271); Сулака – 1,023–2,255 (1,613); Самура – 0,290–1,070 (0,597); Куры – 0,043–0,181 (0,133) мг N/л. Среднемноголетние концентрации DISi в разные месяцы меняются в воде Волги в пределах 1,971–3,804 (среднее 2,614) мг Si/л; в воде Урала – 1–5,133 (3,361); Терека – 3,45–6,23 (5,12); Сулака – 2–2,716 (2,439); Самура – 2,66–4,8 (3,689); Куры – 0,821–2,166 (1,358) мг Si/л. Таким образом, оцененные по многолетним данным среднегодовые концентрации DIP, N_{min} и DISi наибольшие соответственно в воде Куры, Сулака и Терека; воды Самура характеризует наименьшее среднегодовое содержание DIP; а в водах Куры ниже, чем в других притоках, среднегодовые концентрации N_{min} и DISi.

Воды притоков имеют характерные диапазоны изменения соотношений минеральных компонентов. 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

Таблица 2

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

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

(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 составляют 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.

Полученные соотношения минеральных биогенных компонентов в реках-притоках сопоставлялись с таковыми в морских акваториях, в которые реки впадают. На рис. 5 показаны изменения ежемесячных значений N_{min}/DIP в реках (с индексом r) и в морских акваториях (с индексом s). Для морских акваторий использовались полученные с помощью модели расчетные (дискретность 1,5 сут.) данные, которые осреднялись для каждого месяца. Как видно, только характеристики вод Сулака и Самура, водный сток которых незначителен, непосредственно не связаны с отношениями N_{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_{min}/DIP в речных и морских водах ($r=0,834$). Однако между отношениями концентраций $DISi/N_{min}$, а также $DISi/DIP$ в речном стоке и в водах морских акваторий значимых связей не выявлено.

Биогенные вещества - основа формирования биопродуктивности водоемов. Поэтому для рассматриваемых в модели микроорганизмов оценивались значения их

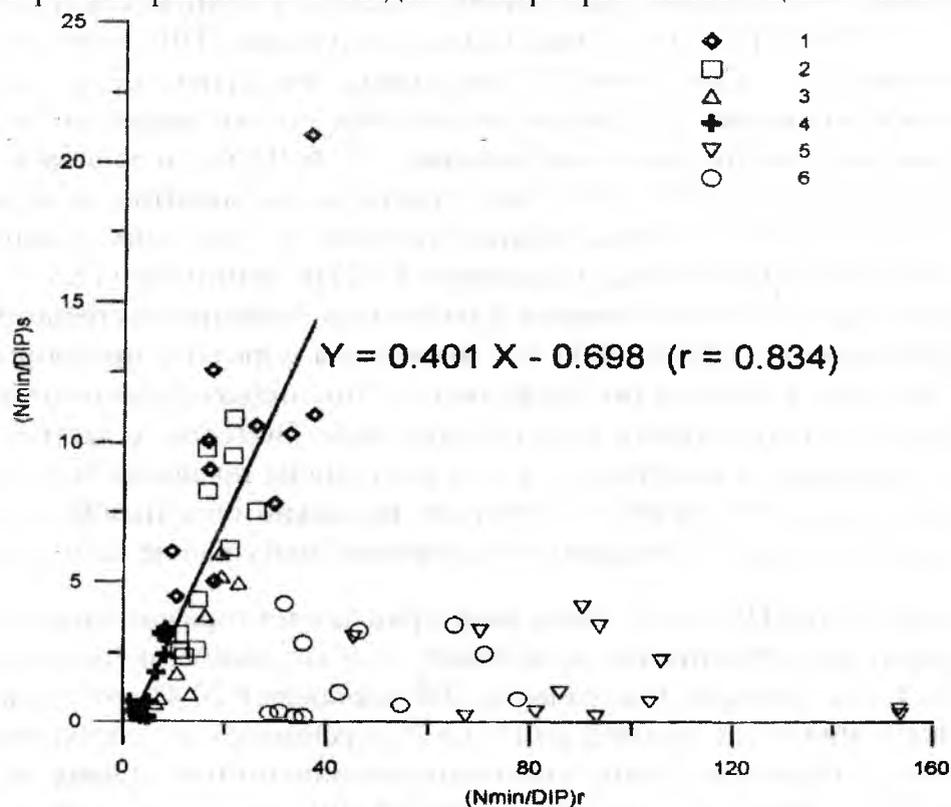


Рис. 5. Взаимосвязь соотношений концентраций минеральных N и P в Волге, Урале, Тереке, Куре, Сулаке и Самуре (1-6 соответственно) и в акваториях моря, в которые эти реки впадают

биопродукции на основе рассчитываемых с помощью модели внутренних потоков веществ (в единицах C, Si, N, P). В расчетах учитывались все важнейшие факторы среды обитания, определяющие условия формирования биопродуктивности (температура, освещенность, содержание потребляемых микроорганизмами биогенов и их поступление в водную среду из разных источников), основные процессы образования и перераспределения химических и биологических компонентов по акваториям моря. Значения биопродукции вычислялись для каждого шага по времени, путем суммирования этих значений оценивалась продукция для каждого месяца и в целом за год. Расчетные годовые значения продукции микроорганизмов для акваторий 1–10 показаны в табл. 3, а их соотношения – в табл. 4.

Значения продукции микроорганизмов 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 акваториях. Лишь в западной акватории 4 они несколько ниже, чем в восточной акватории 3, что связано с высокой эффективностью выноса биогенов и биомасс микроорганизмов водным потоком из акватории 4 в среднюю часть моря (см. табл. 3). Оцененные весовые отношения годовых значений биопродукции (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 (см. табл. 4). Подобный эффект, очевидно, отражает различные условия поступления и изменения в соотношении концентраций биогенов по акваториям моря.

Расчетные ежемесячные значения продукции трех групп фитопланктона (ПФ1, ПФ2, ПФ3) в акваториях 1–10 были сопоставлены со значениями внутренних потоков поступления основного для фитопланктона фосфорного субстрата DIP [R_{DIP} , г P/(м³ мес.)]. В целом в акватории 1–10 из внешних источников, а также за счет процессов биотрансформации и внутренней циркуляции вещества в водную среду поступает в форме DIP 0,322–0,565 г P/(м³ год). Наибольшее поступление DIP происходит в акватории 1, а наименьшее – в акватории 3. При расчете суммарного поступления DIP в акватории моря учитывались следующие внутренние потоки вещества: 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%).

Полученные данные моделирования и расчетные значения внутренних потоков вещества подтверждают существенную для экосистемы моря роль микроорганизмов в круговороте биогенных веществ (их рециклинге). Этот процесс обеспечивает многократную оборачиваемость веществ и восполняет запас биогенов (в частности DIP) в водной среде. Например, в акватории 1 за год внутренние процессы биотрансформации пополняют запасы DIP на 88,9%, тогда как волжский сток (наиболее значимый для моря внешний источник биогенов) обеспечивает поступление за год лишь 5,1% DIP.

Поступление за год DIP в отдельные акватории за счет горизонтального переноса из соседних акваторий практически компенсируется его выносом (исключение есть для акватории 4, где «чистое» поступление DIP составляет 20,4% от суммарного за год, а также акватории 9, где годовой вынос на 7% превышает его поступление). Вертикальный перенос вещества служит значимым источником пополнения запасов DIP в поверхностном слое глубоководных акваторий (5–10), причем он наиболее существенен в акватории 6 (41,3%).

Оцененные значения биопродуктивности гидробионтов в Каспийском море
(здесь и в табл. 4 числитель - западная акватория, знаменатель - восточная)

Таблица 3

Акватории	ПВ			ПФ1			ПФ2		ПФ3		ПЗ1			ПЗ2	
	тыс т Si	тыс т N	тыс т P	тыс т Si	тыс т N	тыс т P	тыс т N	тыс т P	тыс т N	тыс т P	тыс т N	тыс т P	тыс т Si	тыс т N	тыс т P
1	<u>707.6</u>	<u>785.0</u>	<u>302.1</u>	<u>1102.2</u>	<u>311.8</u>	<u>94.0</u>	<u>121.5</u>	<u>26.1</u>	<u>118.8</u>	<u>22.8</u>	<u>114.0</u>	<u>38.9</u>	<u>5.0</u>	<u>13.7</u>	<u>11.2</u>
2	419.1	522.2	175.6	559.7	138.5	41.8	86.6	17.7	52.3	9.8	76.4	27.4	3.8	11.3	9.5
4	<u>303.9</u>	<u>347.9</u>	<u>105.4</u>	<u>476.3</u>	<u>135.7</u>	<u>30.5</u>	<u>46.7</u>	<u>8.2</u>	<u>47.5</u>	<u>7.1</u>	<u>60.0</u>	<u>16.8</u>	<u>1.4</u>	<u>7.6</u>	<u>5.4</u>
3	434.4	539.6	152.1	667.9	150.1	41.2	96.1	19.1	59.8	10.3	78.0	26.2	3.1	11.1	9.6
5	<u>1475.9</u>	<u>6317.2</u>	<u>3774.8</u>	<u>3733.6</u>	<u>1201.0</u>	<u>283.3</u>	<u>489.8</u>	<u>79.8</u>	<u>367.8</u>	<u>41.0</u>	<u>608.7</u>	<u>172.6</u>	<u>13.6</u>	<u>170.3</u>	<u>103.8</u>
6	307.1	1079.8	901.9	1795.2	609.2	125.7	197.8	30.3	133.9	13.2	173.3	41.0	2.6	44.3	21.6
7	<u>4419.7</u>	<u>5591.2</u>	<u>1980.3</u>	<u>3873.9</u>	<u>1203.0</u>	<u>335.0</u>	<u>364.8</u>	<u>61.0</u>	<u>271.7</u>	<u>30.3</u>	<u>658.6</u>	<u>202.9</u>	<u>21.5</u>	<u>178.3</u>	<u>115.0</u>
8	2610.5	3017.4	863.2	4074.5	1244.6	248.0	407.8	62.0	234.8	21.2	527.3	122.9	7.1	148.6	76.3
9	<u>6828.4</u>	<u>9202.4</u>	<u>2962.2</u>	<u>5602.7</u>	<u>1830.3</u>	<u>444.7</u>	<u>555.8</u>	<u>93.0</u>	<u>381.2</u>	<u>38.3</u>	<u>1129.4</u>	<u>373.7</u>	<u>42.4</u>	<u>399.9</u>	<u>213.1</u>
10	1344.8	1644.4	442.4	2384.8	663.3	114.7	411.3	63.7	361.7	34.4	315.9	76.2	5.4	90.2	38.6

Таблица 4

Оцененные с помощью математического моделирования весовые соотношения значений годовой продукции гидробионтов в Каспийском море

Акватория	ПВс: ПВN : ПВsi: ПВр	ПФ1si:ПФ1N: ПФ1р	ПФ2N: ПФ2р	ПФ3N: ПФ3р	ПЗ1N: ПЗ1si:ПЗ1р	ПЗ2N: ПЗ2р
1	<u>9.1 : 2.6 : 2.3 : 1</u>	<u>11.7 : 3.3 : 1</u>	<u>4.7 : 1</u>	<u>5.2 : 1</u>	<u>2.9 : 0.1 : 1</u>	<u>1.2 : 1</u>
2	9.7 : 3.0 : 2.6 : 1	11.4 : 3.3 : 1	4.9 : 1	5.3 : 1	2.8 : 0.1 : 1	1.2 : 1
4	<u>11.6 : 3.3 : 2.9 : 1</u>	<u>15.6 : 4.5 : 1</u>	<u>5.7 : 1</u>	<u>6.7 : 1</u>	<u>3.6 : 0.1 : 1</u>	<u>1.4 : 1</u>
3	12.1 : 3.5 : 2.9 : 1	16.2 : 3.6 : 1	5.0 : 1	5.8 : 1	3.0 : 0.1 : 1	1.2 : 1
5	<u>9.2 : 4.3 : 2.6 : 1</u>	<u>13.1 : 4.2 : 1</u>	<u>6.1 : 1</u>	<u>9.0 : 1</u>	<u>3.5 : 0.1 : 1</u>	<u>1.6 : 1</u>
6	13.6 : 3.5 : 2.9 : 1	14.3 : 4.8 : 1	6.5 : 1	10.1 : 1	4.2 : 0.1 : 1	2.1 : 1
7	<u>7.8 : 2.8 : 2.2 : 1</u>	<u>11.6 : 3.6 : 1</u>	<u>6.0 : 1</u>	<u>9.0 : 1</u>	<u>3.2 : 0.1 : 1</u>	<u>1.6 : 1</u>
8	12.1 : 3.5 : 3.0 : 1	16.4 : 5.0 : 1	6.6 : 1	11.1 : 1	4.3 : 0.1 : 1	2.0 : 1
9	<u>7.9 : 3.1 : 2.3 : 1</u>	<u>12.6 : 4.1 : 1</u>	<u>6.0 : 1</u>	<u>10.0 : 1</u>	<u>3.0 : 0.1 : 1</u>	<u>1.9 : 1</u>
10	13.3 : 3.7 : 3.0 : 1	20.8 : 5.8 : 1	6.5 : 1	10.5 : 1	4.1 : 0.1 : 1	2.3 : 1

Суммарные величины ежемесячной первичной продукции для трех групп фитопланктона [$PF=PF1+PF2+PF3$, г P/(м³ мес.)] в акваториях 1–10 взаимосвязаны с годовым поступлением в эти акватории DIP [R_{DIP} , г P/(м³ мес.)]. Значения первичной продукции формируются в основном 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%. Вклад зеленых водорослей в ПФ составляет 18–25,6%, 14,7–22 и 14–28,4%, а сине-зеленых – 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 сине-зеленых (ПФ3) водорослей от R_{DIP} описываются преимущественно показательными функциями, характеризуемыми значениями коэффициентов детерминации $R^2=0,529-0,901$ и $0,293-0,889$ соответственно (табл. 5).

О состоянии водоема и качестве его водных ресурсов, а также об основных тенденциях развития процессов биотрансформации вещества в отдельных акваториях моря можно судить по сбалансированности продукционно-деструкционных процессов. В работе (Леонов, Сапожников, 2000) была оценена сбалансированность указанных процессов в наиболее продуктивных северных акваториях моря. По результатам выполненных расчетов подобный анализ в этой работе проведен для средней части моря (акваторий 5–8) с рассмотрением важнейших автохтонных и аллохтонных составляющих приходной и расходной частей баланса органических фракций N и P (табл. 6). В приходную часть баланса включены значения первичной продукции, поступления в акватории растворенных и взвешенных компонентов со стоком рек, с атмосферными осадками, с адвективным переносом из соседних акваторий, а также за счет биотрансформации (разложения детрита). Расходная часть включает потери органического вещества на продукцию зоопланктона, потребление бактериями, седиментацию взвешенного вещества, а также на вынос водным потоком растворенных и взвешенных компонентов в соседние акватории.

Таблица 5

Зависимости продукции диатомовых водорослей [г P/(м³ мес.)] от R_{DIP} [г P/(м³ мес.)] для акваторий северной, средней и южной частей моря

Часть моря	Западные акватории	Восточные акватории
Северная	Акватории 1, 4	Акватории 2, 3
	$PF1 = 0.987 R_{DIP} + 0.0021 (R^2 = 0.810)$	$PF1 = 0.737 R_{DIP} + 0.0023 (R^2 = 0.913)$
Средняя	Акватории 5, 7	Акватории 6, 8
	$PF1 = 1.657 R_{DIP} - 0.0145 (R^2 = 0.814)$	$PF1 = 1.059 R_{DIP} - 0.0199 (R^2 = 0.341)$
Южная	Акватория 9	Акватория 10
	$PF1 = 1.051 R_{DIP} - 0.0066 (R^2 = 0.848)$	$PF1 = 0.491 R_{DIP} - 0.0031 (R^2 = 0.593)$

Расчетный баланс аллохтонных и автохтонных потоков ОВ поверхностного слоя в средней части Каспийского моря (акватории 5-8) (числитель - для соединений N, знаменатель - для соединений P)

Составляющие баланса	Параметр	5		6		7		8		Средний Каспий	
		тыс т год	%	тыс т год	%						
Приход: первичная продукция	ПФ1 _N	1201.03	18.2	609.20	5.3	1203.01	21.9	1244.56	8.8	4257.80	30.7
	ПФ1 _P	283.26	29.9	125.67	23.4	334.97	32.2	248.01	29.6	991.91	32.7
	ПФ2 _N	489.84	7.4	197.80	1.7	364.76	6.6	407.79	2.9	1460.19	10.5
	ПФ2 _P	79.82	8.4	30.31	5.6	60.97	5.9	61.99	7.4	233.09	7.7
	ПФ3 _N	367.76	5.6	133.94	1.2	271.69	5.0	234.80	1.6	1008.19	7.3
	ПФ3 _P	41.00	4.3	13.25	2.5	30.28	2.9	21.22	2.5	105.75	3.5
со стоком рек	DON	0.53	0.0	0.0	0.0	0.23	0.0	0.0	0.0	0.76	0.0
	DOP	0.01	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	0.0	0.02	0.0
	ND	0.41	0.0	0.0	0.0	0.01	0.0	0.0	0.0	0.42	0.0
	PD	0.05	0.0	0.0	0.0	0.04	0.0	0.0	0.0	0.09	0.0
с атмосферными осадками	DON	0.74	0.0	0.84	0.0	0.43	0.0	2.21	0.0	4.22	0.0
	DOP	0.01	0.0	0.01	0.0	0.01	0.0	0.03	0.0	0.06	0.0
	ND	0.15	0.0	0.17	0.0	0.09	0.0	0.44	0.0	0.85	0.0
	PD	0.01	0.0	0.01	0.0	0.01	0.0	0.03	0.0	0.06	0.0
с переносом из соседних аква- торий	DON	7294.09	110.4	5762.08	50.2	6076.65	110.6	4611.17	32.5	0.0	0.0
	DOP	96.70	10.2	65.69	12.2	78.46	7.6	54.18	6.5	0.0	0.0
	ND	61.46	0.9	45.12	0.4	49.56	0.9	26.37	0.2	0.0	0.0
	PD	11.68	1.2	8.13	1.5	9.66	0.9	5.25	0.6	0.0	0.0
с разложением детрита	ND	1869.14	28.3	561.05	4.8	2260.06	41.1	1201.26	8.4	5891.51	42.5
	PD	335.69	35.5	86.86	16.2	482.43	46.4	187.83	22.2	1092.81	36.0
с переносом по вертикали	DON	-4986.67	-75.5	3818.39	33.2	-4876.31	-88.8	6258.95	44.1	214.36	1.5
	DOP	57.00	6.0	152.01	28.3	23.38	2.2	227.16	27.1	459.55	15.2
	ND	306.72	4.6	357.18	3.1	143.36	2.6	212.46	1.5	1019.72	7.4
	PD	41.35	4.4	54.98	10.2	19.45	1.9	32.62	3.9	148.40	4.9
Всего:	N _{орг}	6605.6	100.0	11485.8	100.0	5493.54	100.0	14200.0	100.0	13858.0	100.0
	P _{орг}	946.58	100.0	536.92	100.0	1039.67	100.0	838.32	100.0	3031.74	100.0
Расход: продукция зоопланктона	ПЗ1 _N	608.70	6.5	173.32	2.3	658.55	8.3	527.15	6.7	1967.72	21.1
	ПЗ1 _P	172.63	16.7	40.96	12.4	202.88	15.3	122.80	18.1	539.27	17.7
	ПЗ2 _N	170.32	1.8	44.29	0.6	178.35	2.2	148.57	1.8	541.53	5.8
	ПЗ2 _P	103.82	10.0	21.63	6.6	115.04	8.7	76.32	11.3	316.81	10.4
потребление бактериями	DON+ND	2061.08	22.2	624.84	8.4	2666.94	33.5	1428.09	18.0	6780.95	72.6
	DOP+PD	661.16	64.1	173.36	52.6	943.38	71.2	403.19	59.4	2181.09	71.7
седimentация	ND	10.37	0.1	4.86	0.1	5.40	0.1	11.87	0.2	32.50	0.4
	PD	2.02	0.2	0.87	0.3	1.28	0.1	2.13	0.3	6.30	0.2
вынос в соседние акватории	DON	6390.58	68.8	6567.94	88.0	4425.05	55.6	5759.88	72.6	-	-
	DOP	82.23	8.0	84.23	25.5	57.39	4.3	65.69	9.7	-	-
	ND	51.54	0.6	49.76	0.6	24.40	0.3	44.64	0.6	-	-
	PD	10.05	1.0	8.81	2.6	5.78	0.4	8.01	1.2	-	-
вынос в Кара- Богаз-Гол	DON	-	-	-	-	-	-	8.28	0.1	8.28	0.1
	DOP	-	-	-	-	-	-	0.12	0.0	0.12	0.0
	ND	-	-	-	-	-	-	0.09	0.0	0.09	0.0
	PD	-	-	-	-	-	-	0.02	0.0	0.02	0.0
Всего:	N _{орг}	9292.59	100.0	7465.01	100.0	7958.69	100.0	7928.57	100.0	9331.07	100.0
	P _{орг}	1031.91	100.0	329.86	100.0	1325.75	100.0	678.28	100.0	3043.63	100.0
Баланс/Невязка:	N _{орг}	2686.99	28.9	4020.76	35.0	2465.15	31.0	6288.18	44.3	4526.95	20.5
	P _{орг}	85.33	8.3	207.06	38.6	286.08	21.6	160.32	19.1	11.87	0.4

Значимость процессов, образующих общий пул органического вещества, в северных акваториях моря различна (Леонов, Сапожников, 2000). В водах акватории 1 образование запаса органического вещества происходит в основном процессами первичной продукции и биотрансформации вещества. В водах акваторий 2–3, как и для всей северной части Каспия, формирование пула $N_{орг}$ происходит за счет процессов первичной продукции, адвективного переноса субстанций из соседних акваторий и биотрансформации веществ. В формировании пула $P_{орг}$ роль адвективного переноса незначительна. В акватории 4 образование пула $N_{орг}$ происходит в основном за счет адвективного переноса вещества, а $P_{орг}$ – за счет процессов первичной продукции и биотрансформации (Леонов, Сапожников, 2000). В акваториях 5–8 особенно значима в формировании пула органического вещества роль процессов адвективного переноса биогенных компонентов из соседних акваторий, первичной продукции и биотрансформации. В восточных акваториях в поддержании запасов органических веществ наиболее важны процессы вертикального обмена веществом с нижележащими слоями. В западных акваториях вертикальный перенос способствует выносу растворенных органических компонентов N и P в подповерхностные слои.

В расходной составляющей баланса органических веществ повсеместно наиболее значимы процессы потребления растворенных и взвешенных веществ бактериями (в западных акваториях процесс более активен). Адвективный вынос компонентов водным потоком в соседние акватории существен для формирования пула $N_{орг}$, а роль продукции зоопланктона для поддержания как пула $N_{орг}$, так и $P_{орг}$ второстепенна.

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 (Семенов, 1984). В водах средней части моря в акваториях 5–8 общее поступление автохтонного и аллохтонного вещества оценивается в 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).

Результаты моделирования показали, что в северных акваториях 1–4 образование органического вещества, включая поступление из внешних источников, превышает его потери на 4,1–27,6% по $N_{орг}$ и на 2,4–24,6% по $P_{орг}$. В целом для северного Каспия это превышение составляет 20,5% по $N_{орг}$ и 12,7% по $P_{орг}$ (Семенов, 1984). В водах средней части моря акватории по-разному обеспечиваются 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 поступление и 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. Расчеты общего баланса органических компонентов N и P для средней части моря (без учета роли горизонтального переноса биогенных веществ), однако, показали, что образование и поступление $P_{орг}$ практически сбалансировано его потерями (невязка всего 0,4%), а для $N_{орг}$ поступление на 20,5% выше его потерь (см. табл. 6).

ВЫВОДЫ

Условия трансформации соединений биогенных элементов (N, P, C, Si) в разных акваториях Каспийского моря охарактеризованы по годовой динамике концентраций органических веществ, их соотношениям, внутренним потокам компонентов и про-

дукции микроорганизмов. Анализ выполнен по результатам расчетов с помощью математической модели, в которой формализованы основные сложившиеся представления об особенностях развития процессов биотрансформации соединений биогенных элементов в морской среде и их биогидрохимическом круговороте в водной экосистеме. Подобный подход особенно перспективен при оценке и изучении последствий неизбежного загрязнения морской среды при освоении месторождений нефти и газа на шельфовых участках моря.

Анализ сезонных вариаций концентраций биогенных веществ обнаруживает их низкие концентрации летом, высокие – зимой и в начале весны. Оцененный по расчетам диапазон изменения концентраций биогенных веществ вполне реалистичен и соответствует имеющимся в литературе представлениям о сезонных их колебаниях в экосистеме Каспийского моря. В разных акваториях моря в течение года концентрации N_{\min} , DISi, DIP меняются в характерных диапазонах. Различия в значениях и соотношениях концентраций биогенных веществ выявлены для северных и южных, а в отдельных случаях – для западных и восточных акваторий моря. Они непосредственно связаны с изменением характеристик водной среды (температура, освещенность) и условиями поступления биогенных веществ в акватории моря (с речным стоком, при апвеллинге вод в восточных акваториях средней части моря).

Выявленные особенности распределения и разные тенденции пространственной и временной изменчивости весовых отношений концентраций DISi/DIP, DISi/ N_{\min} и N_{\min} /DIP свидетельствует о неэквивалентном поступлении биогенных веществ из внешних источников на разных участках моря. В целом отмечается общая тенденция снижения среднемесячных значений весовых отношений DISi/DIP и N_{\min} /DIP, а также увеличения DISi/ N_{\min} от северных акваторий к южным. Расчетные внутригодовые значения N_{\min} /DIP показывают, что в акватории 1 только весеннее развитие диатомовых лимитируется P, развитие здесь фитопланктона осенью (а в акваториях 2–3 в течение года) лимитируется одновременно и P, и N. В акваториях 4–10 процессы первичной продукции лимитируются в основном N (рис. 6).

Зимой в водах акваторий 1-2, 3 и 4-8 отношение $N_{\text{tot}}/P_{\text{tot}}$ составляют 35, 42 и 24–26 соответственно. В период весеннего цветения диатомовых в водах акваторий 1–2 отношение $N_{\text{tot}}/P_{\text{tot}}$ снижаются до 25, а в летне-осенний период они составляют 15–20. В акватории 3 значение $N_{\text{tot}}/P_{\text{tot}}$ снижается до 30, а в акваториях 4–8 – до 20–21. В акваториях 9–10 значения $N_{\text{tot}}/P_{\text{tot}}$ в течение года меняются мало и составляют 20–21.

С речным стоком в Каспийское море за год в среднем 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. Минеральные компоненты N в речном стоке представлены аммонием (55,7%), нитратами (42,3%), нитритами (2%). Сток Волги обеспечивает поступление в Каспий от 71,2 до 95,9% годового выноса биогенов. Вынос в море за год биогенов с водами Урала, Терека, Сулака, Самура и Куры оценивается соответственно 0,8–15,9%, 0,1–18,1, 0,1–4,7, 0–1 и 0,5–10,4%. Выявлены следующие соотношения биогенных компонент в речном стоке: 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_{\min} :DIP=140,4:24,4:1, DOC:DON:DOP=126,0:7,3:1.

Среднегодовые ежемесячные отношения N_{\min} /DIP в реках (Волга, Урал, Терек и Кура) и в морских акваториях, в которые эти реки впадают, обнаруживают высокую коррелированность ($R=0,834$). Для Сулака и Самура такая связь не установлена (очевидно, из-за незначительности стока). Между DISi/ N_{\min} , а также DISi/DIP в речном стоке и в морских акваториях значимых связей не выявлено.

Оцененные годовые значения продукции микроорганизмов в западных акваториях моря выше, чем в восточных акваториях – бактерий в 1,5–5,8; фитопланктона в

1,2-3,9; зоопланктона в 1,2-5,5 раз. Лишь в западной акватории 4, где высоки эффективность обменных процессов и вынос (биогенов и биомасс микроорганизмов) в среднюю часть моря, значения биопродукции в целом оказываются ниже, чем в восточной акватории 3. Отношения годовых значений продукции микроорганизмов (в единицах C, Si, N, P) в западных и восточных акваториях моря меняются мало, одна-

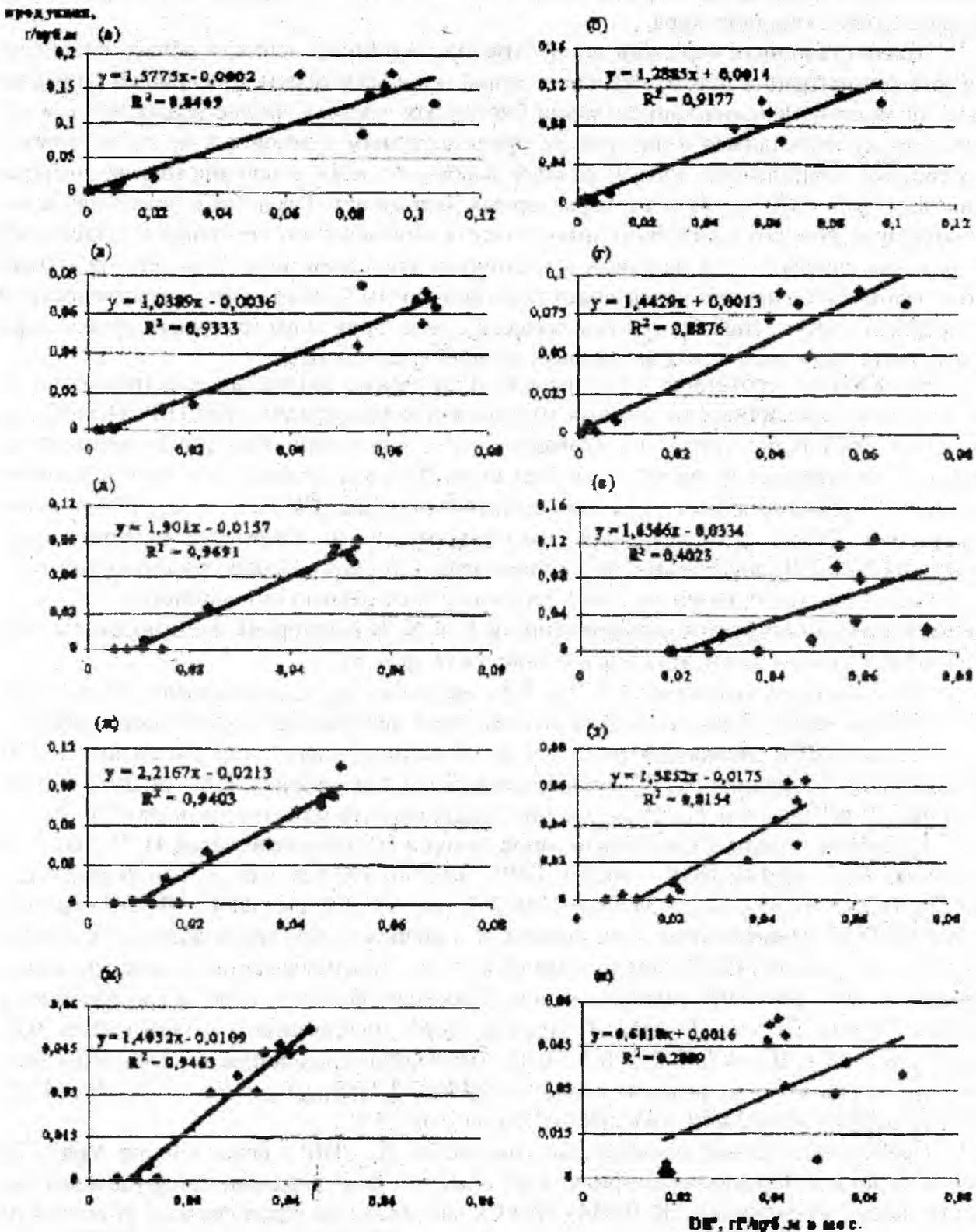


Рис. 6 Зависимость для акваторий 1-10 (а - к соответственно) ежемесячных значений суммарной первичной продукции от внутренних потоков поступлений DIP (а, в, д, ж, и - западные акватории моря 1,4, 5,7, 9; б, г, е, з, к - восточные акватории моря 2, 3, 6, 8,10 соответственно)

ко обнаруживается тенденция возрастания отношений продукции от северных акваторий моря к южным, что отражает различные условия поступления биогенов и изменения в их соотношениях по акваториям моря.

Суммарная первичная продукция (ПФ) определяется преимущественно продукцией диатомовых: в северной части моря (акватории 1–4) их доля в ПГ составляет 58,4–66,6%; в средней части (акватории 5–8) – 67,4–78,1%; в южной части (акватории 9–10) – 57,4–80,4%. Вклад зеленых водорослей в ПФ составляет 18–25,6%, 14,7–22 и 14–28,4%, а сине-зеленых – 14,1–15%; 6,4–10,6 и 5,7–14,3%, соответственно в северных, средних и южных акваториях моря.

Для акваторий в северной, средней и южной частях моря установлены линейные корреляционные связи между ежемесячными величинами продукции диатомовых (ПФ1 в единицах Р) и общего поступления в акватории основного субстрата DIP (RDIP). Для западных акваторий моря указанные связи характеризуются высокими коэффициентами детерминации ($R^2=0,810-0,848$), менее значимые связи получены для восточной акватории в средней части моря ($R^2=0,341$). Зависимости продукции зеленых и сине-зеленых водорослей от R_{DIP} описываются преимущественно показательными функциями, характеризующимися значениями коэффициентов детерминации $R^2=0,529-0,901$ и $0,293-0,889$ соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

- Ведерников В. И., Сергеева О. М., Коновалов Б. В.** Экспериментальное изучение зависимости скорости роста и фотосинтеза фитопланктона Черного моря от условий минерального питания. Сб. «Экосистемы пелагиали Черного моря». М.: Изд. Наука. 1980. С. 140–157.
- Виноградов А. П.** Введение в геохимию океана. М.: Наука. 1967. 215 с.
- Леонов А. В., Сапожников В. В.** Биогидрохимическая модель трансформации органогенных веществ и ее использование для расчета первичной продукции в экосистеме Охотского моря. Сб. Комплексные исследования экосистемы Охотского моря». М.: ВНИРО, 1997. С. 143–166.
- Леонов А. В., Сапожников В. В.** Анализ динамики концентраций органогенных веществ и скоростей продукционно-деструкционных процессов в водах северной части Каспийского моря. Океанология. 2000. Т. 40. № 1. С. 37–51.
- Леонов А. В., Стыгар О. В.** Сезонные изменения концентраций биогенных веществ и биопродуктивность вод северной части Каспийского моря. Водные ресурсы. 1999. Т. 26. № 6. С. 743–756.
- Максимова М. П.** Величины отношений N/P в водах Индийского океана. Океанология. 1974. Т. 14. № 5. С. 830–839.
- Монографический справочник Проект «Моря». Гидрометеорология и гидрохимия морей. Т. VI. Каспийское море. Вып. 2. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. С-Петербург: Гидрометеоиздат. 1996. 323 с.
- Россолимо Л. Л.** Изменения лимнических экосистем под воздействием антропогенного фактора. М.: Наука. 1977. 144 с.
- Салманов М. А.** Экология и биологическая продуктивность Каспийского моря. Баку: Полигр.-изд. центр «Исмаил». 1999. 400 с.
- Семенов Ю. Л.** Величины отношений N/P и Si/P в водах среднего и южного Каспия. Гидробиол. журн. 1984. Т. 20. № 3. С. 73–76.
- Atlas R. M., Bartha R.** Degradation and mineralization of petroleum in sea water: limitation by nitrogen and phosphorus/ *Biotechnology@Bioengineering*. 1972. V. 14. № 3. P. 309–319.
- Chiaudani G., Vighi M.** Dynamic of nutrient limitation in six small lakes. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 1975. V. 19. Pt.2. P. 1319–1324.
- Overbeck J.** Ecdosystem concept. In «Guidelines of lake management. Vol. 1. Principles of lake management». Ed. Jorgensen S. E., Vollenweider R. A. Otsu: ILEC. 1989. P. 19–36.
- Redfield A. C.** The biological control of chemical factors in the environment. *American Science*. 1958. V. 46. № 5. P. 205–222.
- Sommer U.** Comparison between steady state and non-steady competition: experiments with natural phytoplankton. *Limnol. Oceanogr.*, 1985. V. 30. № 2. P. 335–346.
- Tamminen T., Seppala J.** Nutrient pools, transformations, rates, and limitation in the Gulf of Riga, the Baltic Sea, during four successional stages. *J. of Marine Systems*. 1999. V. 23. № 1–3. P. 83–106.