

Азотный «диабет» Азовского моря

Природа — книга, которая читает сама себя.

А.П.Левич.
Человек и биосфера

Лучше всего, если бы читатель знал все, что содержится в этой книге, еще не начав читать ее!

Э.Пианка.
Эволюционная экология

В.Г.Ильичев, В.Л.Семин

Азовское море разные народы называли по-разному; древние греки, например, именовали его Мейотическим озером. Не потому ли, что оно внутриконтинентальное, или из-за небольших размеров? В самом деле, площадь зеркала моря невелика — 39 тыс. км². По глубине оно тоже не бьет рекордов: в среднем она составляет около 7 м, а максимальная лишь в два раза больше. Крупных впадающих рек всего две — Дон и Кубань, остальные мелкие. И соленость ниже, чем в других морях (за исключением Балтийского): примерно 10‰, а в приустьевых частях и того меньше — около 5‰. Зато органических веществ в Азовском море в 5–6 раз больше по сравнению с другими морскими водоемами.

Еще недавно, в первой половине XX в., рыбы здесь было много и разной. Добывали осетровых, леща, судака, тарань, шемаю, бычка, сельдь, хамсу, тюльку и др. Удельная рыбопродуктивность составляла 8 т под квадратным метром, что было в полтора раза больше, чем в Северном море, в шесть превышала этот показатель в Каспийском, в восемь — в Балтийском и почти в 25 — в Черном [1]. Столь высокая продуктивность обуславливалась несколькими



Виталий Григорьевич Ильичев, кандидат физико-математических наук, доктор технических наук, главный научный сотрудник Южного научного центра РАН. Область научных интересов — математическое моделирование, исследование устойчивости и адаптации экологических систем.



Виталий Леонидович Семин, младший научный сотрудник того же центра. Научные интересы связаны с изучением бентоса, планктона в Азовском море и его экологией.

причинами. В первую очередь — **значительным речным стоком**: примерно 41 км³/год (при объеме моря около 320 км³). По сути вся морская вода обновлялась за восемь лет. За счет поступления из Дона и Кубани азота, фосфора и других биогенных элементов ими обогащалась азовская экосистема. Благодаря **мелководности** довольно быстро включались в биоло-

гический круговорот и биогенные вещества, находящиеся в донных отложениях. **Низкая соленость** вод (примерно 10‰) благоприятствовала обитанию солоноватоводных видов рыбы почти по всей акватории.

Положение изменилось отнюдь не в лучшую сторону после сооружения Цимлянского водохранилища (1953) на Дону и Краснодарского (1975) — на

© Ильичев В.Г., Семин В.Л., 2006

Кубани. Общий объем речного стока в Азовское море сократился до 28 км³/год. Зато увеличился приток черноморских вод, поэтому соленость в нем повысилась до 12–13‰, а в маловодные годы и до 15–17. Изменилось также и содержание биогенных элементов в донском стоке: азота — выросло, а фосфора — упало. После этого в Азовском море другим стало отношение N/P. Прежде этот показатель был равен примерно 10, а в 1970–1980-х годах достиг ~20.

Соотношение запасов азота и фосфора в море — важный экологический показатель, мера стабильности экосистемы. Когда оно близко к отношению N/P в клетках водорослей — первичных продуцентов органического вещества, — то в биологическом круговороте активно работают, как минимум, две обратные связи: по азоту и по фосфору. Если же один из элементов почему-либо значительно накапливается, именно по нему ослабляется действие обратной связи, и тогда рост водорослей регулируется только содержанием в среде другого элемента. Установлено, что сокращение числа (избытка) активных обратных связей может привести к дестабилизации водной экосистемы [2].

Какой же механизм приводит к дисбалансу биогенных веществ? На этот счет есть несколько гипотез, основные из них — **химическая и биологическая**. Обе они опираются на анализ экологической подсистемы азот–фосфор–водоросли. Последние, будучи основой пищевой цепи, определяют и поведение всей экосистемы, а это позволяет игнорировать влияние более высоких трофических уровней. Попробуем пристальнее взглянуть на составляющие упомянутой подсистемы и начнем с экологических характеристик одноклеточных водорослей.

В Азовском море много разных водорослей, по массе же

преобладают диатомовые, пиропитовые и синезеленые (сохраним здесь это архаичное название вместо давно устоявшегося правильного — цианобактерии). У водорослей каждой из этих групп свои «требования» к среде обитания, к таким ее показателям, как соленость, температура. Внутриклеточное содержание азота и фосфора тоже отличается, но соотношение этих элементов ни у одних из перечисленных водорослей не превышает 10 (табл.1).

Ясно, что содержание веществ в рассматриваемой системе определяется взаимодействием внутренних и внешних факторов. К первым относятся потребление минеральных форм азота и фосфора водорослями и посмертное образование ими органических соединений (часть которых захоранивается в донных отложениях) этих же элементов. Внешние факторы — это поступление и вынос различных форм N и P с водами впадающих рек, Черного моря и с атмосферными осадками (табл.2). При нарушении объема речного стока существенно меняется только солевой режим, а температурные

вариации бывают довольно незначительными.

Одно из объяснений роста отношения N/P в Азовском море дает **химическая гипотеза**, предложенная А.М.Бронфманом с соавторами [1]. По мнению этих исследователей, в Цимлянском водохранилище из-за высокой летней температуры и медленного течения возникают оптимальные условия для развития синезеленых водорослей. Поскольку они способны усваивать атмосферный азот, то цимлянские воды дополнительно обогащаются его органическими соединениями, которые образуются при посмертном разложении этих организмов. Напротив, концентрация фосфора здесь несколько снижается, так как содержащее его вещества частично попадают в донные отложения. В итоге одновременно увеличивается количество азота и уменьшается содержание фосфора сначала в самом водохранилище, а затем последовательно в водах Нижнего Дона и Азовского моря.

По **биологической гипотезе** рост отношения N/P объясняется иначе, хотя тоже с привлечением синезеленых водо-

Таблица 1

Экологические характеристики водорослей Азовского моря [3, 4]

Группа водорослей	Оптимальная соленость, ‰	Оптимальная температура, °C	Содержание в клетках, доли	
			Азот	Фосфор
Диатомовые	9	12–14	0.00525	0.00105
Пиропитовые	14	19–22	0.00750	0.00112
Синезеленые	6	22–24	0.01050	0.00120

Примечание. Содержание азота и фосфора дано в долях от сырой массы водорослей.

Таблица 2

Концентрация биогенных веществ (мг/м³) в элементах водно-го баланса Азовского моря [1]

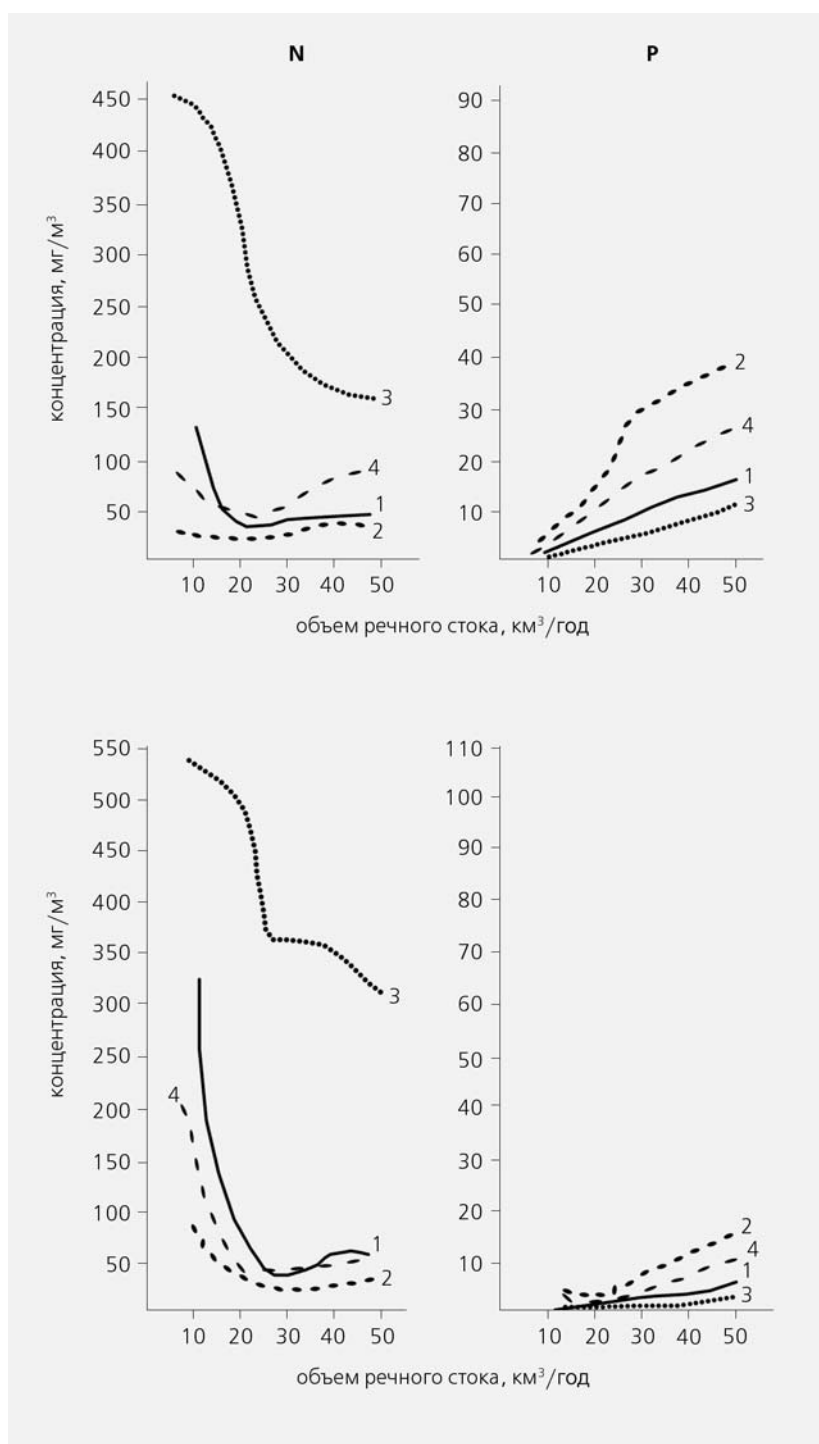
Биогенный элемент	Дон	Кубань	Атмосферные осадки	Черное море
Общий N	2000–3000	1900	1400	350
Общий P	200–300	200	45	27
N/P	6.6–15	9.5	31	13

рослей, но уже в Азовском море, а не в водохранилище. Основная она на других особенностях их питания. По этой гипотезе, рост солености, порожденный сокращением объема донского стока, приводит к уменьшению биомассы синезеленых. А так как они потребляют самое большое количество азота по сравнению с другими водорослями, то из-за снижения численности (биомассы) синезеленых азот используется в меньшем количестве, чем обычно. Отсюда и его монотонный рост в море.

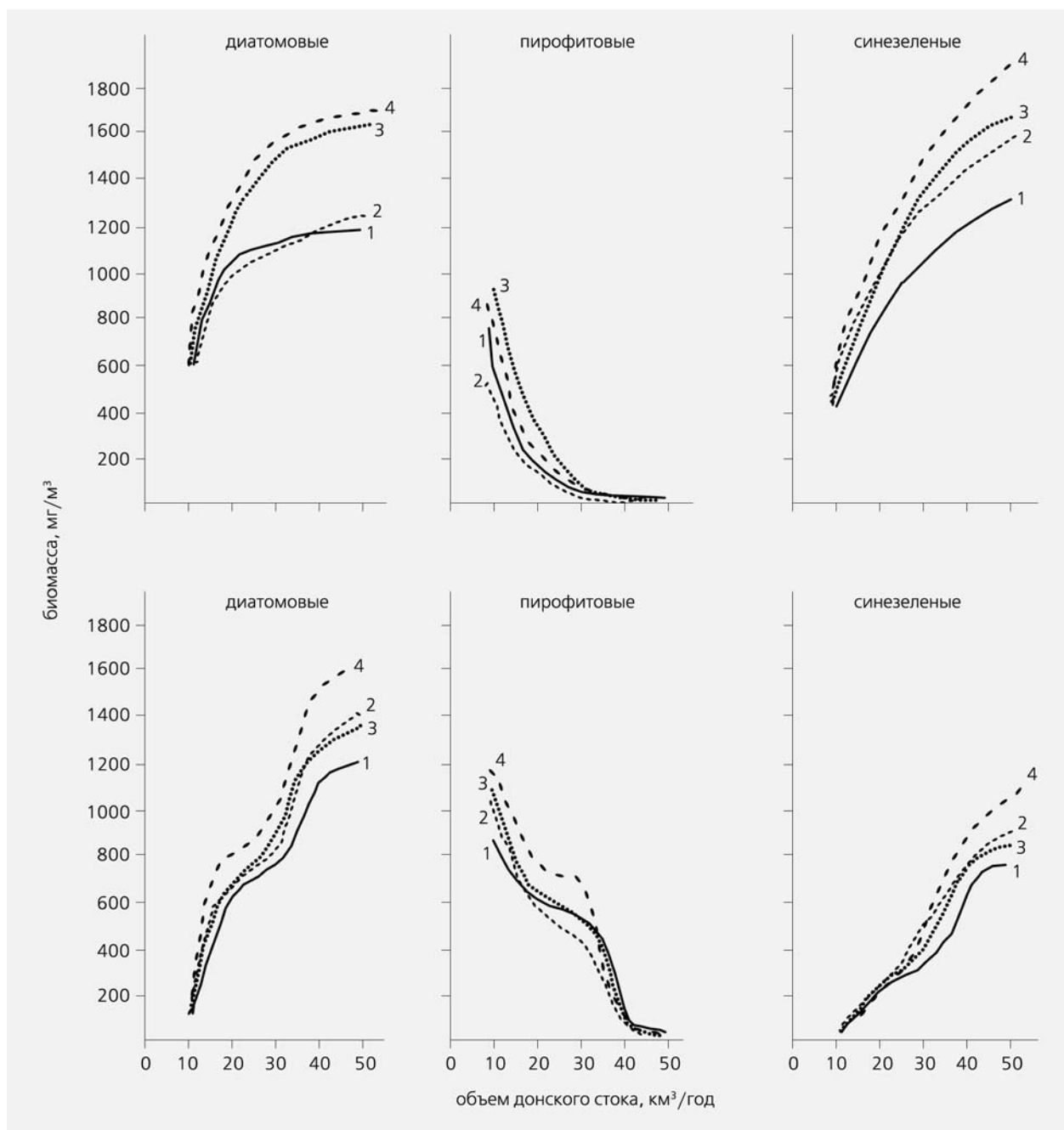
Какая-то из этих гипотез, построенных на разных основаниях, должна быть, видимо, правильной. Какая же? Чтобы разобраться в этом, можно построить компьютерную модель, описывающую основные процессы в системе азот—фосфор—водоросли, и в модельных экспериментах оценить каждую из них. Подобные модели создавались еще в конце 70-х годов и даже были опубликованы отдельной книгой [5].

Для проверки химической гипотезы в модельном анализе исследовался отклик упомянутой системы на изменения двух параметров объема донского стока и содержания в нем азота и фосфора. Рассматривались при этом четыре варианта концентраций N и P: 2000 и 200; 2000 и 300; 3000 и 200; 3000 и 300 мг/м³. Объем (*v*) донского стока варьировался от 50 до 10 км³/год. В этом случае соленость (*S*) изменялась от 5 до 17‰.

Оказалось, что при сокращении стока концентрация минерального фосфора монотонно уменьшается, а азота сначала тоже убывает, но затем неожиданно начинает расти. Минимум азота приходится на объем, равный примерно 25 км³/год. Удивительно, что этот результат оставался неизменным при всех вариантах концентраций N и P в донской воде. Следовательно, не эти изменения влияют на вариации N и P в Азовском море, решающую роль играет уменьшение объема речного стока.



Расчетное содержание (в среднем за год) минеральных форм азота и фосфора в Таганрогском заливе (вверху) и в самом Азовском море при изменении объема донского стока и четырех вариантах концентраций (отмечены цифрами) N и P в стоке. Варианты концентраций: азот 2000 мг/м³, фосфор — 200 (1); 2000 и 300 (2); 3000 и 200 (3); 3000 и 300 (4). Видно, что при сокращении речного стока содержание азота сначала несколько убывает (за исключением третьего варианта концентрации) и в заливе, и в море, а затем резко повышается. Иначе дело обстоит с фосфором: его концентрации неуклонно падают, причем в заливе сильнее, чем в море.

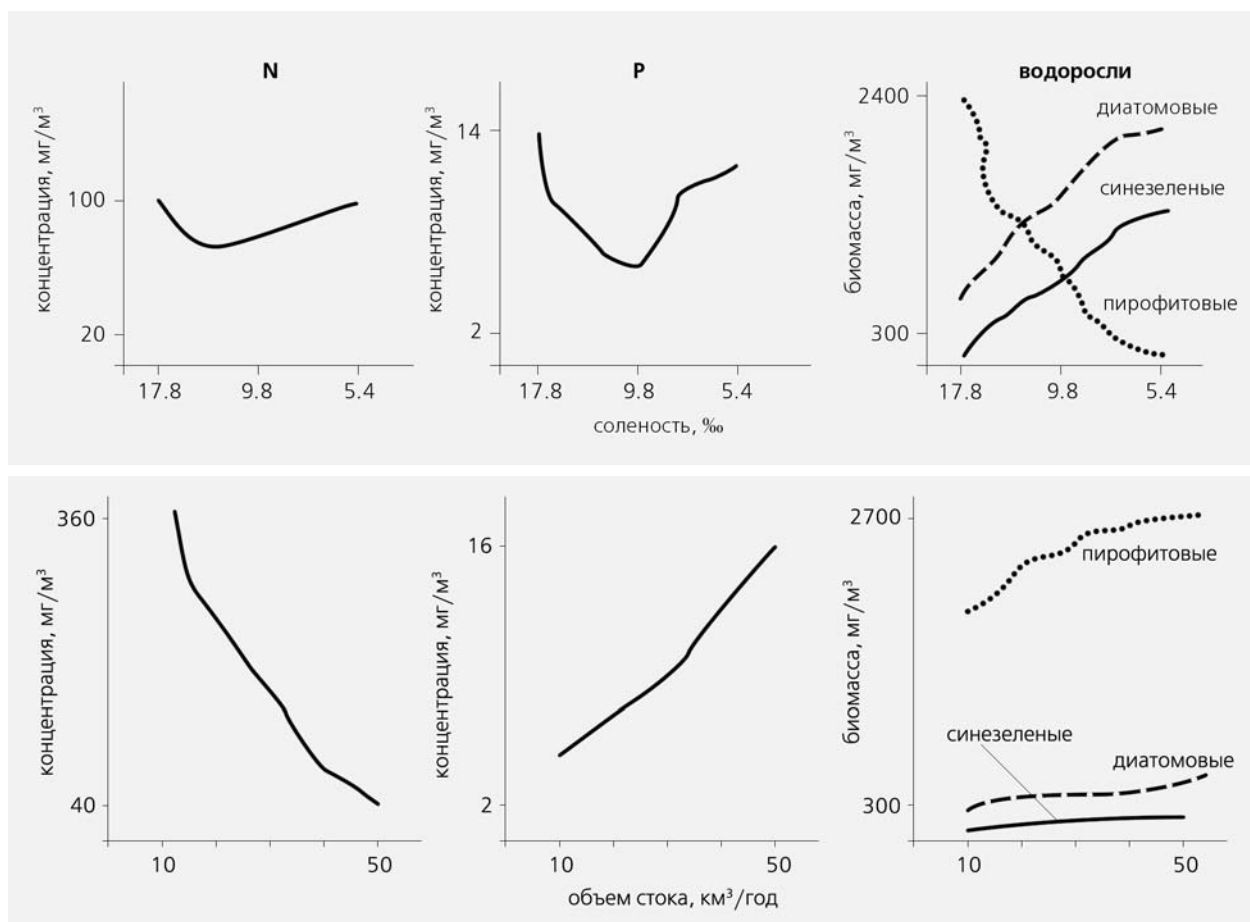


Рассчитанные биомассы (в среднем за год) диатомовых, пирофитовых и синезеленых водорослей Таганрогского залива (вверху) и самого Азовского моря при изменении объема и четырех вариантах концентраций (отмечены цифрами) N и P в донском стоке. Варианты концентраций те же, что на предыдущем графике. При уменьшении речного стока и в заливе, и в море снижается биомасса диатомовых и синезеленых водорослей, но пирофитовых возрастает.

Для проверки биологической гипотезы в модели положили одинаковыми потребности в азоте всех групп водорослей (диатомовых, пирофитовых, синезеленых). И в этом случае умень-

шение объема речного стока вызывает рост азота в азовских водах. Значит, одного падения биомассы синезеленых недостаточно, чтобы объяснить дисбаланс в содержании азота и фосфора.

По нашему мнению, возникновение дисбаланса можно объяснить одновременным действием двух факторов — биологического и гидрологического. Проще говоря, мы предлагаем



Содержание минеральных форм азота и фосфора под действием биологических (вверху) и гидрологических процессов, а также влияние каждого из них на биомассу основных групп водорослей в Азовском море. В обоих экспериментах при расчетах выбраны концентрации азота 2000 мг/м³, фосфора — 200 в донском стоке. В первом эксперименте соленость изменялась от 5.4 до 17.8‰, а объем донского стока был фиксирован на уровне 50 км³/год. На содержании азота биологические процессы в заданном интервале солености сказываются меньше, чем на концентрации фосфора. Развитие же трех основных групп водорослей сильно зависит от увеличения солености: биомасса пиррофитовых растет, а синезеленых и диатомовых — уменьшается. Во втором эксперименте донской сток варьировался от 50 до 10 км³/год, а соленость была фиксирована на уровне 17.8‰. Гидрологические процессы мало влияют на водоросли, зато на концентрациях азота и фосфора сказываются сильнее.

новую, биогидрологическую гипотезу. Под биологическим фактором мы имеем в виду перестройку состава водорослей из-за увеличения солености морской воды, а под гидрологическим — изменение массообмена. Заметим, что сокращение объема речного стока влияет и на биологические, и на гидрологические процессы.

Проанализируем нашу гипотезу тоже с помощью компьютерной модели и вычислительных экспериментов [6]. Сначала

выделим влияние каждого процесса в «чистом виде». Чтобы понять действие биологического фактора, оставим уровни азота и фосфора в донском стоке фиксированными, а будем медленно уменьшать его объем от 50 до 10 км³/год. Это вызывает увеличение солености Азовского моря, а в таком случае экологические преобразования определяются только сменой групп водорослей. За счет действия чисто биологических процессов содержание мине-

ральных форм азота и фосфора в море становится наименьшим при солености ~10–12‰, а среднегодовые биомассы основных групп водорослей оказываются примерно равными. Это легко понять: сезоны их развития различны, поэтому в течение года водоросли потребляют азот и фосфор равномерно и, значит, наиболее полно. В результате их концентрации становятся самыми низкими именно при солености ~10–12‰.

За счет действия «чисто» гидрологических процессов сокращение объема речного стока — самого богатого поставщика биогенных веществ — вызывает уменьшение концентраций азота и фосфора в Азовском море. Однако степень уменьшения концентраций соединений этих элементов разная, потому что сказывается вклад других источников биогенных веществ (см. табл.2): атмосферных осадков с отношением N/P ~30 и черноморских вод с N/P ~13. При такой дотации азота он слабо убывает в море, а фосфор сильно. Следовательно, при малом речном стоке фосфор становится лимитирующим элементом и ограничивает развитие водорослей. Азота при этом они потребляют меньше, чем в условиях нормального стока, и в результате «недопотребления» азота водорослями он «избыточно» накапливается.

Итак, по нашей гипотезе и результатам модельных экспериментов дисбаланс азота и фосфора в Азовском море возникает из-за сокращения объема донского стока. Когда он составляет от 50 до 25 км³/год, решающее значение имеют биологические факторы (перестройка состава водорослей). При дальнейшем уменьшении объема стока доминируют гидрологические процессы, увеличивающие долю элементов водного баланса (осадков и черноморских вод) с аномально высоким содержанием азота.

* * *

В начале 80-х годов прошлого века строились планы по реконструкции Азовского моря, чтобы восстановить его былую рыбопродуктивность. Рассматривались три дорогостоящих проекта: дотация речного стока, сооружение Керченского гидроузла и сужение гирла Таган-

рогского залива. Каждый из этих проектов имел свои достоинства и недостатки, и чтобы один из них реализовать, необходима была научная оценка экологических последствий осуществления данных планов. Однако последовавший затем социально-экономический кризис положил конец этим исследованиям.

После 1992 г. объем донского стока вырос — в основном за счет климатических преобразований (увеличения количества осадков, смены ветров и др.). Это благоприятно отразилось на продуктивности азовской экосистемы. Отметим, что хотя содержание азота и фосфора в донских водах почти не изменилось, в Азовском море постепенно снижается (нормализуется) отношение азот/фосфор [7, 8]. Это подтверждает нашу биогидрологическую гипотезу о причинах возникновения азотного «диабета». ■

Литература

1. Бронфман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д. Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. М., 1979.
2. Ильичев В.Г. // Гидробиол. журн. 1988. Т.24. №5. С.15—22.
3. Алдакимова А.Я. О некоторых закономерностях внутригодовой динамики фитопланктона Азовского моря // Биологические ресурсы Азовского моря. Ростов-на-Дону, 1976.
4. Сергеев Ю.Н., Колодочка Х.Д., Круммель Х.Д. и др. Моделирование процессов переноса и трансформации вещества в море. Л., 1979.
5. Ворович И.И., Горелов А.С., Горстко А.Б. и др. Рациональное использование водных ресурсов бассейна Азовского моря. Математические модели. М., 1981.
6. Ильичев В. Г. // Метеорология и гидрология. 1995. №1. С.56—64.
7. Матишов Г.Г., Гаргона Ю.М., Бердников С.В. и др. Закономерности экосистемных процессов. М., 2006.
8. Александрова З.В., Баскакова Т.Г., Ромова М.Г. Особенности гидрохимического режима и продуцирования первичного органического вещества в экосистеме в современный период // Гребневик в Азовском и Черном морях: биология и последствия вселения. Ростов-на-Дону, 2000. С.145—172.