

Моделирование

Динамика вод СЗЧМ характеризуется значительной пространственно-временной изменчивостью, обусловленной преобладанием ветровой составляющей в формировании циркуляции вод. Наличие в СЗЧМ приустьевых областей четырех крупных рек — Дуная, Днестра, Южного Буга и Днестра, со значительными сезонными колебаниями стока оказывает существенное влияние на формирование термогалинной структуры вод и определяет плотностную составляющую течений.

Исследования изменчивости гидрологических характеристик, динамики вод СЗЧМ и ее импактных зон всегда были одним из приоритетных направлений исследований ОФ ИнБЮМ. Во второй половине 1960-х годов по данной проблеме вышел цикл монографий, в которых обобщены материалы многолетних наблюдений и научных исследований (Виноградов и др., 1966; Толмазин и др., 1969; Большаков, 1970; Розенгурт, 1974).

Начиная со второй половины 1980-х годов быстрое развитие компьютерных средств позволило перейти от инструментальных методов исследования течений и упрощенных диагностических расчетов их отдельных составляющих к комплексному системному анализу трехмерной пространственной структуры течений в СЗЧМ и ее изменчивости, в зависимости от определяющих природных факторов, с использованием численных нестационарных гидродинамических моделей (Блатов и др., 1984; Климок и др., 1989; Лонин, 1990; Белов, Филиппов, 1991; Иванов и др., 1995).

Ввиду специфики решаемых научных задач в ОФ ИнБЮМ основное внимание уделялось прикладным аспектам использования гидродинамических моделей, дополненных блоком переноса пассивной примеси, для решения конкретных задач морского природопользования. В частности, моделирование течений, переноса и рассеяния загрязняющих веществ выполнялось при

оценке экологического воздействия на морскую среду хозяйственной деятельности портов Усть-Дунайск, Южный, Херсон, Ильичевск, Керчь, Одесского нефтяного терминала (Лонин, Тучковенко, 1995; Лонин и др., 1996; Тучковенко, 2002). Разработанная в ОФ ИнБЮМ численная гидродинамическая модель (Лонин, Тучковенко, 1999; Коморин, Тучковенко, 2002) используется в оперативной практике Гидрометцентра Черного и Азовского морей для прогноза опасных сгонно-нагонных колебаний уровня моря в портах СЗЧМ.

В конце 1990-х годов в рамках научного сотрудничества с Центром океанографических и гидрографических исследований Колумбии в ОФ ИнБЮМ была разработана серия численных математических моделей качества вод шельфовых морских экосистем тропических широт, которые успешно использовались для решения прикладных задач (Тучковенко, 2001; Тучковенко, Calero, 2001; Lonin, Tuchkovenko, 2001, 2003). С 2001 г. на основе накопленного опыта в создании и использовании подобного рода моделей и информации, полученной в ходе экологического мониторинга акватории Одесского региона СЗЧМ (1988—1999), начата разработка комплексной трехмерной модели качества вод шельфовых морских экосистем умеренных широт. Модель состоит из трех блоков (подмоделей):

- трехмерная гидродинамическая модель, описывающая динамику вод, адвективный перенос и турбулентную диффузию примеси в морской среде при различных гидрометеорологических условиях с учетом морфологических особенностей бассейна (батиметрии, конфигурации берегов) и речного стока;
- блок самоочищения вод от загрязняющих веществ, которые не свойственны морской среде, т. е. поступают в экосистему из внешних, как правило антропогенных, источников;
- блок эвтрофикации и кислородного режима вод, в котором описаны естественные химико-биологические процессы, определяющие баланс веществ и энергии в экосистеме, степень трофности и сапробности ее вод.

5.1. Гидродинамический блок модели качества морских вод

Гидродинамический блок разработан на основе известной модели Хесса МЕССА (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment) (Hess, 1985) для эстуарных зон. Она дополнена блоком переноса неконсервативной примеси, построенным с использованием транспортных конечно-разностных схем. Эта модель позволяет рассчитывать трехмерную термогалинную структуру вод, интенсивность турбулентного обмена, а также ветровые (дрейфовые и компенсационные), плотностные, стоковые и приливные течения в эстуариях, заливах, лиманах и на мелководном континентальном шельфе.

Характерная особенность данной модели — возможность одновременно производить расчеты динамики вод и распространения примеси на акватории сопряженных водных объектов как сеточного, так и подсеточного масштаба. В данном случае под водными объектами сеточного масштаба по-

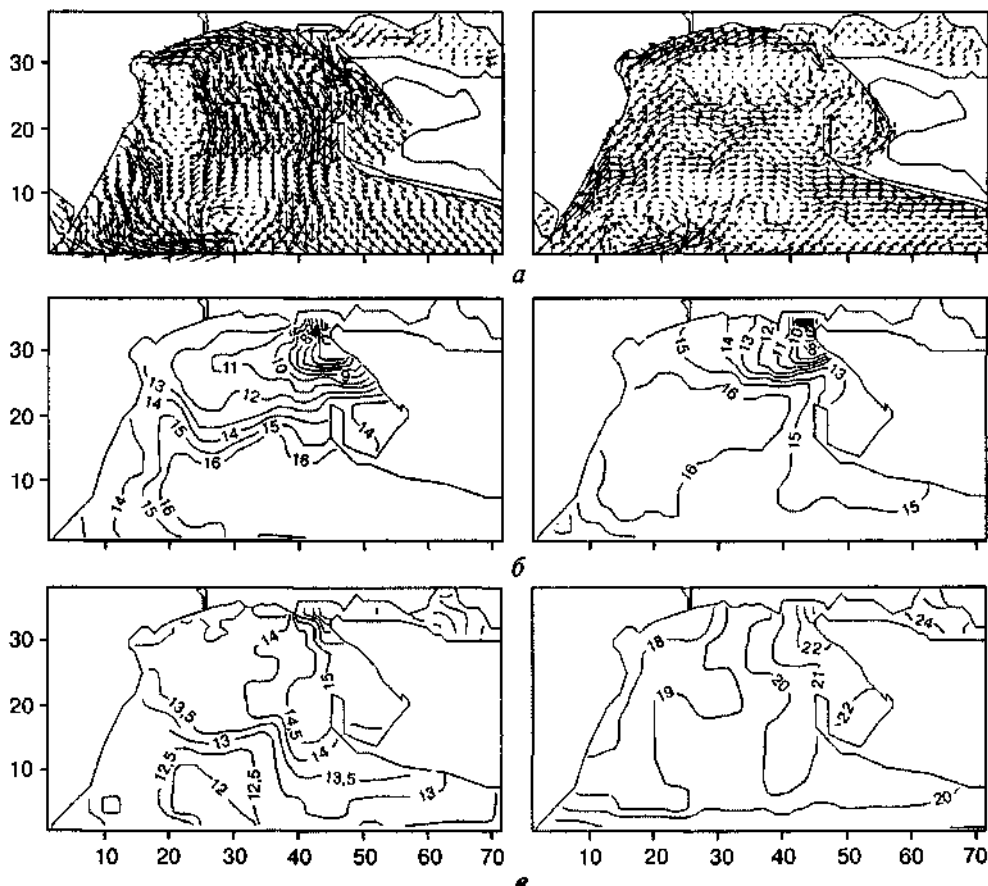


РИС. 1.5.1. Рассчитанные по модели поля векторов поверхностных течений (а), солёности (б) и температуры (е) поверхностного слоя воды:
слева — 20 мая; справа — 20 июля

нимаются заливы, бухты, лиманы, участки морского шельфа, пространственные размеры которых существенно превышают шаг расчетной сетки численной модели. Подсеточными называются водные объекты, одна из горизонтальных геометрических характеристик которых значительно меньше шага расчетной сетки (например, узкие реки, каналы, проливы).

Указанное свойство модели имеет большое значение для корректного описания динамики вод в устьевых областях рек Дунай, Днепр, Днестр, Южный Буг, а также циркуляции вод как в самих лиманах, где есть узкости (например, Сухой лиман), так и водообмена между ними и СЗЧМ через узкие проливы.

Математическая структура гидродинамической модели и результаты ее адаптации к условиям Днепровско-Бугского приустьевых участка СЗЧМ, в состав которого входит Одесский район, подробно описаны в работах (Тучковенко, 2002, 2003).

Программная реализация модели позволяет рассчитывать суммарные течения, а также выделять отдельно их ветровую, термогалинную и стоковую составляющие. С заданной временной дискретностью в ходе счета модель усваивает новую информацию о скорости и направлении ветра, температуре воздуха, расходах рек, температуре, солености и содержании примеси в речных водах; термогалинной стратификации, уровне моря и фоновых концентрациях примеси в отдельных точках морской границы. Между вводимыми дискретными значениями выполняется линейная интерполяция: для метеорологических и речных параметров — во времени; для значений уровня моря, вертикального распределения температуры, солености воды и фоновой концентрации примеси на открытых границах — в пространстве и во времени.

На рис. 1.5.1, 1.5.2 приведены результаты расчетов формирования термогалинной структуры и изменчивости циркуляции вод в весенне-летний период в Одесском и Днепровско-Бугском районах СЗЧМ. Расчетная область аппроксимирована пространственной сеткой 72 x 38 узлов с шагом 2000 м. Расчет велся начиная со второй декады марта с усвоением данных ежесрочных 6-часовых наблюдений за температурой воздуха (условия 1986 г.) и среднесуточных значений скорости и направления ветра (условия 1981 г.), полученных на ГМС Одесса-порт, а также информации об изменчивости термогалинной структуры вод на открытой морской границе, задаваемой по данным работы (Виноградов и др., 1966). Средний за период расчета расход р. Днепр полагался равным $1520 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$, р. Южный Буг — 80 и р. Днестр — $240 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$.

Объединение химико-биологической части модели с гидродинамической в единую модель качества вод осуществляется на основе уравнения переноса

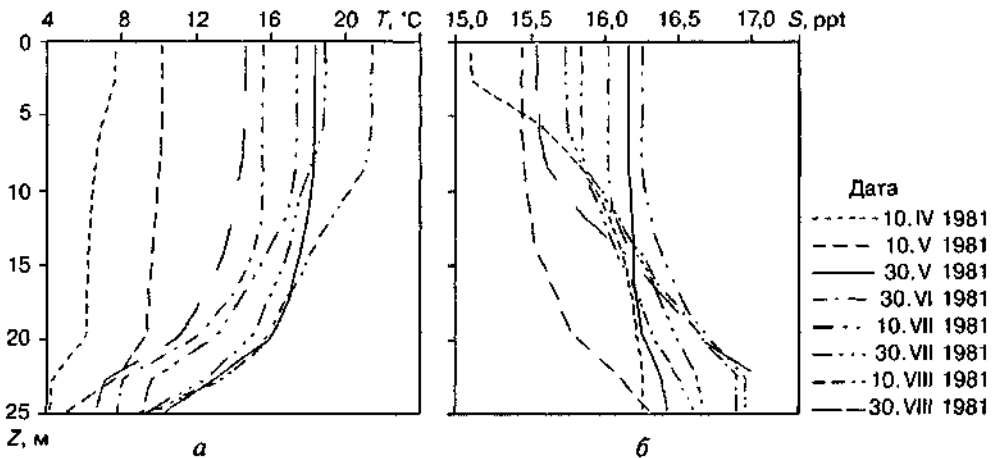


РИС. 1.5.2. Изменчивость вертикального распределения температуры (а) и солености (б) воды в Одесском регионе СЗЧМ при расчетах с усвоением метеоинформации по данным ГМС «Одесса»



неконсервативной примеси:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(u C_i - D_h \frac{\partial C_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v C_i - D_h \frac{\partial C_i}{\partial y} \right) + \\ & + \frac{\partial}{\partial z} \left((w + w_{kc}) C_i - D_v \frac{\partial C_i}{\partial z} \right) = F_i(C, x, y, z, t) + Q_i(x, y, z, t). \end{aligned} \quad (5.1)$$

Здесь u, v, w — составляющие вектора скорости течения v ; t — время; C — вектор-функция переменных состояния экосистемы ($i = 1, 2, 3, \dots, N$), элементы $C_j(x, y, z, t)$ которой — концентрации (биомассы) моделируемых компонентов экосистемы или загрязняющих веществ; w_{kc} — скорость гравитационного осаждения примеси; D_h, D_z — коэффициенты горизонтальной и вертикальной диффузии примеси; $Q_j(x, y, z, t)$ — приток j -го вещества (примеси) из внешних, в том числе антропогенных, источников; $F_i(C, x, y, z, t)$ — функции неконсервативности, представляющие собой составленные на основе балансового подхода алгебраические суммы членов, которые описывают локальные потоки вещества между компонентами модели, обусловленные различными биохимическими реакциями и биологическими взаимодействиями, причем $F_i = \left. \frac{dC_i}{dt} \right|_{\text{local}}$.

Функции неконсервативности F_i в зависимости от типа рассматриваемых веществ определяются в блоках самоочищения или эвтрофикации. На каждом шаге по времени решается система уравнений переноса неконсервативных субстанций. Число уравнений типа (5.1), составляющих эту систему, соответствует количеству моделируемых компонент ОБ экосистемы или типов загрязняющих веществ.

Граничные условия для примеси в модели определяются следующим образом:

на поверхности моря

$$D_v \frac{\partial C}{\partial z} = Q_c^{\text{top}};$$

на дне

$$D_v \frac{\partial C}{\partial z} = Q_c^{\text{bot}};$$

на жидкой границе

$$\begin{aligned} C_{oi} &= C_i^*, & \text{если } \mathbf{vn} \leq 0, \\ \frac{\partial C_{oi}}{\partial t} &= -\mathbf{vn} \frac{\partial C_{oi}}{\partial \mathbf{n}}, & \text{если } \mathbf{vn} > 0; \end{aligned}$$

в точках впадения рек

$$C_i^R = C_i^{\text{top}} + (C_i^{\text{top}} - C_i^{\text{bot}}) (1 - \cos(\pi z / H));$$

в точках расположения антропогенных источников

$$\frac{\partial (HC_i)}{\partial t} = \frac{C_i^a Q_a}{\Delta L^2}$$

здесь (j_c) — поток примеси через водную поверхность; (j_c) — поток примеси через границу вода — донные отложения; $(L)_a$ — расход антропогенного источника; C^a — концентрация примеси в водах источника; $C_{\text{ш}}$ — концентрация /-и примеси на открытой морской границе; C^* — фоновая концентрация примеси, характерная для открытого моря; индекс «top» соответствует концентрации в поверхностном слое воды, индекс «bot» — в придонном слое; n — внешняя нормаль к открытой боковой границе; vn — проекция вектора скорости течений на внешнюю нормаль; ΔL — горизонтальный шаг расчетной сетки; H — глубина места.

Потоки Q_i^{top} , Q_i^{bot} для конкретных типов моделируемых веществ задаются в химико-биологическом блоке модели.

5.2. БЛОК САМООЧИЩЕНИЯ МОРСКИХ ВОД

Задача самоочищения вод от загрязняющих веществ (ЗВ) антропогенного происхождения корректна в случае локального характера источника загрязнения и при отсутствии в водной среде естественных значимых источников поступления ЗВ. Первое условие означает, что влияние источника загрязнения на качество вод и функционирование экосистемы прослеживается лишь в локальной области акватории, пространственные масштабы которой во много раз (на два-три порядка) меньше исследуемого бассейна. Пример ЗВ, удовлетворяющих второму условию, — нефть и нефтепродукты, СПАВ, тяжелые металлы (ртуть, свинец, цинк, кадмий и т. д.). Попадая в морскую среду, эти вещества вовлекаются в различного рода физические, химические, биологические и смешанные процессы, в результате чего трансформируются в пассивные по отношению к биотическим компонентам экосистемы химические элементы и соединения либо выводятся из водной среды. К рассматриваемому типу ЗВ относится и один из наиболее опасных для человека биологических загрязнителей — патогенные бактерии, которые, попадая в морскую среду, подвергаются биодеградации.

В первом приближении при построении блока самоочищения вод от неконсервативных загрязняющих веществ и патогенной микрофлоры предполагают, что деструкция ЗВ в результате их физико-химической и (или) биохимической трансформации описывается кинетическим уравнением реакции 1-го порядка:

$$F_i = \frac{dC_i}{dt} \Big|_{\text{local}} = -K_{cl} C_i,$$

где F_i — функция неконсервативности примеси (ЗВ) в уравнении (5.1); C_i — концентрация /-го ЗВ в морской воде; K_{cl} — коэффициент неконсервативности (деструкции) ЗВ, представляющий собой удельную скорость его

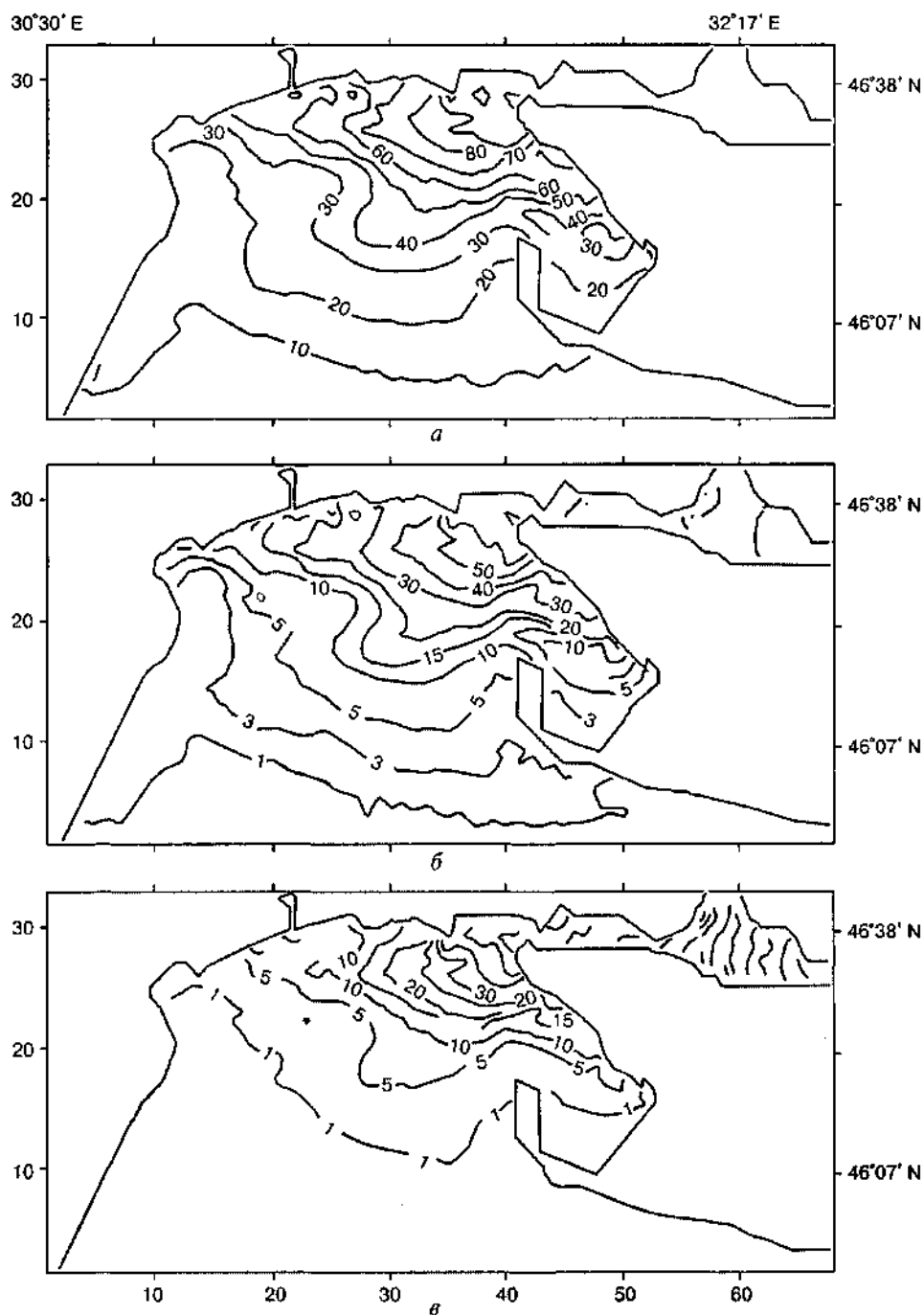


РИС. 1.5.3. Распределение загрязняющих веществ нейтральной плавучести, поступающих со стоком рек Днепр и Южный Буг.

Коэффициент неконсервативности, сут⁻¹: а — $K_c = 0,005$; б — $K_c = 0,05$; в — $K_c = 0,1$

трансформации в результате совокупного действия химических, физико- и биохимических процессов, без детализации их вкладов.

Коэффициент K_m — функция свойств среды (температуры, солености воды, рН и т. п.), при наличии необходимой информации может быть представлен в мультипликативной форме. Его значение для конкретных типов ЗВ берут из литературных источников либо определяют эмпирическим путем с использованием зависимости вида

$$K_{ci} = (t - t')^{-1} \ln \frac{C_i^0}{C_i}, \quad (5.3)$$

где C^0 — начальная концентрация загрязняющего вещества /; $C/$ — его концентрация через время /; t' — время, в течение которого практически не происходит изменения концентрации C_i^0 (время адаптации микроорганизмов).

В общем случае о применимости кинетического уравнения 1-го порядка для описания процессов деструкции ЗВ в морской среде свидетельствует наличие прямолинейной связи между логарифмической функцией концентрации загрязняющего вещества $\lg C_i(t)$ и временем t .

При выполнении экспертных оценок использование модели качества вод, химико-биологический блок которой построен по принципу самоочищения, целесообразно в случае функционирования одного или нескольких источников загрязнения, когда необходимо:

- определить масштабы зоны, в которой уровень загрязнения превышает предельно допустимую концентрацию (ПДК);
- оценить возможность превышения ПДК ЗВ в некоторой точке (или районе) акватории при различных гидрометеорологических условиях и характеристиках сброса загрязненных вод из источников;
- оценить вклады различных источников в формирование уровня загрязнения в некоторой локальной точке (или районе) акватории с целью нормирования их сбросов и т. п.

На рис. 1.5.3 приведены результаты расчетов по модели самоочищения для растворенных ЗВ с различной устойчивостью к процессам физико-химической и биохимической деструкции. В качестве источника загрязнения рассматривался сток рек Днепр и Южный Буг в весенний период. Концентрация ЗВ в речных водах принималась равной 100 условным единицам (процентам). Фоновые концентрации ЗВ в начальный момент времени и на открытой морской границе полагались равными 10^{-12} усл. ед. Расчет проводился при метеоусловиях 1986 г. с 10 марта по 20 мая, когда пресный сток из Днепроовско-Буге кого лимана достигает максимальных значений.

Полученные результаты характеризуют скорость убывания концентраций различных типов ЗВ по мере удаления от источников, ожидаемый уровень и масштабы загрязнения исследуемой акватории. Из расчетов следует, что концентрации ЗВ, поступающих с речным стоком Днепра и Южного Буга и стойких к биохимической деструкции (интегральный коэффи-



циент деструкции K_c 0,005—0,05 сут⁻¹), в поверхностном слое вод Одесского региона составят в среднем 3—20 % концентраций в источниках загрязнения. К этому типу ЗВ относятся, например, ДДТ, СПАВ, стойкие фракции нефтепродуктов (Процессы самоочищения, 1983; Родзиллер, 1984). Концентрации биологически «мягких» ЗВ (например, фенолов, патогенных бактерий) с коэффициентом деструкции 0,1 сут⁻¹ и выше, в водах Одесского региона составляют 1 % и менее их содержания в речных водах. При возрастании K_c до 0,5 сут⁻¹ область загрязнения локализуется вблизи устьев рек в лимане.

5.3. Математическая структура блока эвтрофикации

Математическая структура блока эвтрофикации построена на основе синтеза известных теоретических (Моделирование..., 1979, 1987) и прикладных моделей качества вод (Ambrose и др., 1993; Cerco et al., 1997). Фосфорный и азотный циклы в модели рассматриваются отдельно, что позволяет учесть различия в скоростях минерализации органического азота и фосфора, а также в стехиометрическом соотношении содержаний азота и фосфора в автотонном и аллотонном (в частности, поступающем из антропогенных источников) органическом веществе. Объединение этих циклов в единую модель производится на основе уравнения динамики фитопланктона, описывающего первичное продуцирование органического вещества фитопланктоном в процессе фотосинтеза, а также пополнение запасов мертвого органического вещества (в единицах фосфора и азота) в результате процессов дыхания, естественной смертности и выедания фитопланктона.

Блок эвтрофикации включает в себя описание динамики следующих характеристик качества вод шельфовой экосистемы: фитопланктон — B_p ; фосфаты — $C_{P_{04}}$; азот аммония — C_{NH_4} ; азот нитратов — C_{NO_3} ; растворенный органический фосфор — C_{DOP} и азот — C_{DON} ; взвешенный органический фосфор — C_{POP} и азот — C_{PON} ; детритная — B^{\wedge} и растворенная — B^{**} формы кислородного эквивалента косного органического вещества (ВПК, перманганатная окисляемость); растворенный кислород — C_{O_2} . Азот нитритов включен в состав нитратов. Рассчитывается также показатель БПК₅. Диаграмма связей между компонентами экосистемы представлена на рис. 1.5.4.

Система уравнений блока эвтрофикации для локальной точки пространства записывается следующим образом.

Фитопланктон, г С • м⁻³:

$$\left. \frac{dB_f}{dt} \right|_{local} = (\sigma_f - \varphi_f - \mu_f) B_f, \quad (5.4)$$

где σ_f — удельная скорость роста, сут⁻¹; φ_f — удельная скорость метаболизма (дыхания), сут⁻¹; μ_f — удельная скорость выедания и естественной смертно-

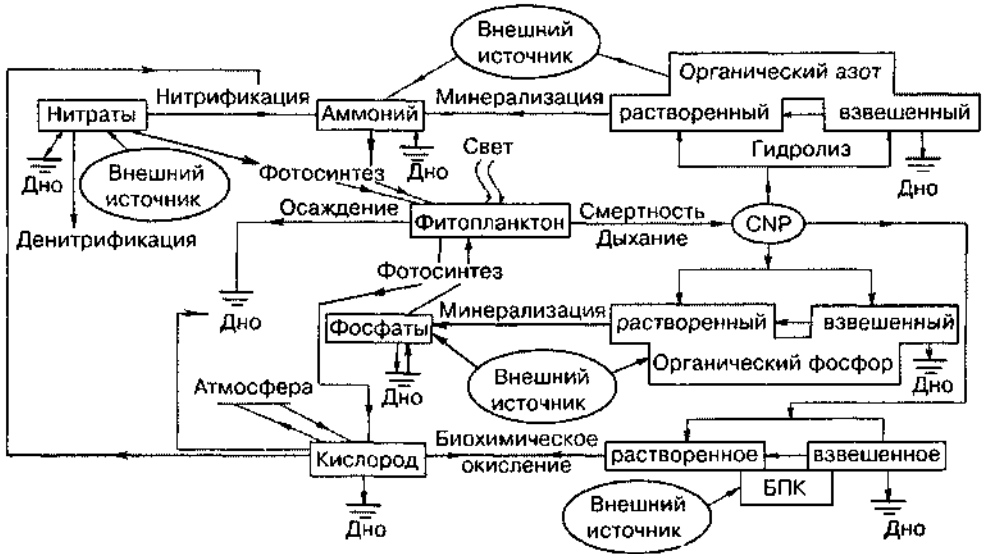


Рис. 1.5.4. Диаграмма связей между элементами блока эвтрофикации в модели качества вод СЗЧМ

сти фитопланктона, сут^{-1} , которые задаются в виде функциональных зависимостей вида:

$$\sigma_f = V_f^{\max} f_1(I) f_2(C_N, C_{PO_4}) f_3(T), \quad (5.5)$$

где
$$f_1(I) = \frac{1}{\Delta z} \int_{z_i}^{z_{i+1}} f_z(I_z) dz = \frac{2,718 f_d}{\Delta z \alpha} [\exp(-R_{z_i}) - \exp(-R_{z_{i+1}})]; \quad (5.5.a)$$

$$R_0 = \frac{I_0}{I_{\text{opt}}}, R_{z_i} = R_0 \exp(-\alpha z_i), \Delta z = z_{i+1} - z_i;$$

$$f_z(I_z) = \frac{I_z}{I_{\text{opt}}} \exp\left(1 - \frac{I_z}{I_{\text{opt}}}\right), \quad I_z = I_0 \exp(-\alpha z);$$

$$f_2(C_N, C_{PO_4}) = \min\left\{\frac{C_N}{\Pi_N + C_N}, \frac{C_{PO_4}}{\Pi_{PO_4} + C_{PO_4}}\right\}; \quad (5.5.6)$$

$$f_3(T) = \begin{cases} e^{-s_1(T-T_m)^2}, & \text{если } T \leq T_m, \\ e^{-s_2(T_m-T)^2}, & \text{если } T > T_m; \end{cases} \quad (5.5.в)$$

$$\varphi_f = \varphi_r e^{s_{\varphi}(T-T_r)}; \quad (5.6)$$



$$\mu_f = \mu_r e^{\epsilon_{\mu}(T-T_r)} \quad (5.7)$$

Здесь V_f^{max} — максимальная удельная скорость роста фитопланктона, сут⁻¹; I_0 — средний за световой день поток ФАР, проникающий через поверхность моря, Вт · м⁻²; $I_{оп}$ — оптимальная для фотосинтеза освещенность, Вт · м⁻²; f_d — доля светового дня в сутках ($0 < f_d < 1$); I_z — освещенность на глубине z , Вт · м⁻²; a — интегральный коэффициент ослабления освещенности с глубиной; $C_N = C_{N_{\text{NH}_4}} + C_{N_{\text{NO}}}$; n_N , Π_{PO_4} — константы полунасыщения процесса утилизации фитопланктоном минеральных форм азота и фосфора соответственно, мг · дм⁻³; T — температура морской воды, °С; T_n — оптимальная для роста водорослей температура воды, °С; ϵ_{μ} , q_2 — коэффициенты, определяющие характер влияния температуры на рост водорослей в диапазонах выше и ниже T_n ; ϕ_f — удельная скорость метаболизма водорослей при температуре T_n сут⁻¹; q_{ϕ} — коэффициент влияния температуры на скорость метаболизма; ψ_f — удельная скорость выедания и гибели фитопланктона при температуре T_n сут⁻¹; q^{\wedge} — коэффициент влияния температуры на скорость выедания и смертности водорослей.

Фосфор Фосфатов, г Р м⁻³:

$$\left. \frac{dC_{\text{PO}_4}}{dt} \right|_{\text{local}} = (\phi_f \alpha_p + \mu_f g_{\text{P}_1} - \sigma_f) \beta_{\text{P/C}} B_f + K_{\text{PO}_4} C_{\text{DOP}}, \quad (5.8)$$

где a_p — доля фосфатов в метаболических выделениях водорослей ($0 < a_p < 1$); g_{P_1} — доля фосфатов, продуцируемая в результате выедания и смертности фитопланктона ($0 < g_{\text{P}_1} < 1$); β — коэффициент, выражающий стехиометрическое соотношение между углеродом и фосфором в органическом веществе, г Р · г⁻¹ С; K_{PO_4} — удельная скорость минерализации растворенного органического фосфора, сут⁻¹, определяемая выражением

$$K_{\text{PO}_4} = K_{\text{PO}_4}^{20} \left(\frac{B_f}{\Pi_c + B_f} \right) \theta_{\text{PC}}^{(T-20)},$$

где K_{PO_4} — удельная скорость минерализации растворенного органического фосфора при 20 °С, сут⁻¹; θ_{PC} — температурный коэффициент; Π_c — константа полунасыщения, определяющая лимитирующее влияние биомассы фитопланктона на регенерацию минерального фосфора и азота, г С · м⁻³.

Азот аммония, г N м⁻³:

$$\left. \frac{dC_{\text{NH}_4}}{dt} \right|_{\text{local}} = (\phi_f \alpha_N + \mu_f g_{\text{N}_1} - \chi \sigma_f) \beta_{\text{N/C}} B_f + K_{\text{NH}_4} C_{\text{DON}} - \nu_{12} C_{\text{NH}_4}, \quad (5.9)$$

где a_N — доля аммонийного азота в метаболических выделениях водорослей; g_N — доля аммонийного азота, продуцируемая в результате выедания

и смертности фитопланктона; % — доля минерального азота, потребляемая фитопланктоном в форме аммония, определяемая по формуле

$$\chi = C_{\text{NH}_4} \frac{C_{\text{NO}_3}}{(\Pi_{\text{N}} + C_{\text{NH}_4})(\Pi_{\text{N}} + C_{\text{NO}_3})} + C_{\text{NH}_4} \frac{\Pi_{\text{N}}}{(C_{\text{NH}_4} + C_{\text{NO}_3})(\Pi_{\text{N}} + C_{\text{NO}_3})};$$

Π_{N}/C — стехиометрическое соотношение между азотом и углеродом в органическом веществе, $\text{г N} \cdot \text{г}^{-1} \text{C}$; A'_{NH_4} — удельная скорость минерализации органического азота, сут^{-1} , определяемая как $K_{\text{NH}_4} = K_{\text{NH}_4}^{20} \left(\frac{B_f}{\Pi_C + B_f} \right) \theta_{\text{NC}}^{(T-20)}$, где

$K_{\text{NH}_4}^{20}$ — удельная скорость минерализации органического азота при температуре воды 20°C , сут^{-1} ; θ_{NC} — температурный коэффициент; v_{12} — удельная скорость нитрификации, сут^{-1} , описываемая выражением $v_{12} = v_{12}^{20} \varepsilon_{\text{ing}} \theta_{\text{N/T}}^{(T-20)}$, где v_{12}^{20} — удельная скорость нитрификации при температуре 20°C , сут^{-1} ;

$\theta_{\text{N/T}}$ — температурный коэффициент; $\varepsilon_{\text{ing}} = \frac{C_{\text{O}_2}}{\Pi_{\text{O}_2} + C_{\text{O}_2}}$ — множитель, учитывающий лимитирующее влияние содержания в воде растворенного кислорода на процесс нитрификации, Π_0 — константа полунасыщения процесса в отношении наличной концентрации кислорода, $\text{г O}_2 \cdot \text{м}^{-3}$.

Азот нитратов, $\text{г N} \cdot \text{м}^{-3}$:

$$\left. \frac{dC_{\text{NO}_3}}{dt} \right|_{\text{local}} = (\chi - 1) \sigma_f \beta_{\text{N/C}} B_f + v_{12} C_{\text{NH}_4} - v_{\text{NO}_3} C_{\text{NO}_3}, \quad (5.10)$$

где v_{NO_3} — удельная скорость денитрификации, сут^{-1} , рассчитываемая по формуле $v_{\text{NO}_3} = v_{\text{NO}_3}^{20} \frac{\Pi_{\text{DN}}}{\Pi_{\text{DN}} + C_{\text{O}_2}} \theta_{\text{DN}}^{(T-20)}$, где $v_{\text{NO}_3}^{20}$ — удельная скорость денитрификации при температуре 20°C , сут^{-1} ; θ_{DN} — температурный коэффициент; Π_{DN} — константа полунасыщения, учитывающая лимитирующее влияние содержания растворенного кислорода на процесс денитрификации, $\text{г O}_2 \cdot \text{м}^{-3}$.

Растворенный органический фосфор, $\text{г P} \cdot \text{м}^{-3}$:

$$\left. \frac{dC_{\text{DOP}}}{dt} \right|_{\text{local}} = (\varphi_f (1 - \alpha_p) + \mu_f g_{P_2}) \beta_{\text{P/C}} B_f + \delta_p C_{\text{POP}} - K_{\text{PO}_4} C_{\text{DOP}}. \quad (5.11)$$

Здесь g_p — доля растворенного органического фосфора, поступающая в результате выедания и смертности фитопланктона; δ_p — удельная скорость гидролиза лабильного взвешенного органического фосфора, зависящая от температуры воды: $\delta_p = \delta_p^{20} \theta_{\text{par}}^{(T-20)}$, где δ_p^{20} — скорость гидролиза при температуре 20°C , θ_{par} — температурный коэффициент.



Лабильный взвешенный органический фосфор, $\text{г Р} \cdot \text{м}^{-3}$:

$$\left. \frac{dC_{\text{POP}}}{dt} \right|_{\text{local}} = \mu_f g_{P_3} \beta_{P/C} B_f - \delta_P C_{\text{POP}}, \quad (5.12)$$

где $g_{P\%}$ — доля лабильного взвешенного фосфора, продуцируемая в результате выедания и смертности фитопланктона. Заметим, что $g_{P_f} + g_{P_i} + g_p < 1$, поскольку в модели рассматривается только лабильная часть мертвого органического вещества.

Растворенный органический азот, $\text{г N} \cdot \text{м}^{-3}$:

$$\left. \frac{dC_{\text{DON}}}{dt} \right|_{\text{local}} = (\varphi_f (1 - \alpha_N) + \mu_f g_{N_2}) \beta_{N/C} B_f + \delta_N C_{\text{PON}} - K_{\text{NH}_4} C_{\text{DON}}, \quad (5.13)$$

где g_u — доля растворенного органического азота, поступающая в результате выедания и смертности фитопланктона; S_N — удельная скорость гидролиза лабильного взвешенного органического азота, сут^{-1} , определяемая по аналогии с фосфорным циклом.

Лабильный взвешенный органический азот, $\text{г N} \cdot \text{м}^{-3}$:

$$\left. \frac{dC_{\text{PON}}}{dt} \right|_{\text{local}} = \mu_f g_{N_3} \beta_{N/C} B_f - \delta_N C_{\text{PON}}, \quad (5.14)$$

где g_N — доля лабильного взвешенного азота, продуцируемая в результате выедания и смертности фитопланктона.

Растворенная часть БПК (биохимического потребления кислорода), $\text{г O}_2 \cdot \text{м}^{-3}$, рассматриваемая в модели как кислородный эквивалент растворенного органического углерода:

$$\begin{aligned} \left. \frac{dB_{\text{org}}^{\text{dis}}}{dt} \right|_{\text{local}} &= (\alpha_c \varphi_f + \mu_f g_{C_2}) \beta_{O_2/C} B_f + \delta_c B_{\text{org}}^{\text{det}} - K_{\text{BOD}} B_{\text{org}}^{\text{dis}} - \\ &- \beta_{O_2/DN} \nu_{\text{NO}_3} C_{\text{NO}_3}. \end{aligned} \quad (5.15)$$

Здесь a_c — доля растворенного органического вещества в метаболических выделениях водорослей; g_c — доля растворенного органического углерода, поступающая в результате выедания и смертности фитопланктона; $b_c = 8f_0f^{20}$ — удельная скорость растворения лабильного взвешенного органического углерода, сут^{-1} ; $5f$ — удельная скорость растворения при температуре 20°C ; 0_c — температурный коэффициент процесса; K_{BOD} — удельная скорость биохимического окисления органического вещества, сут^{-1} , рассчитываемая к $K_{\text{BOD}} = K_{\text{BOD}}^{20} \theta_{\text{BOD}}^{(T-20)} \epsilon_{\text{in}_g}$, где K_{BOD}^{20} — а я скорость биохимического окисления органического вещества при $T = 20^\circ\text{C}$, сут^{-1} ; θ_{BOD} — температурный коэффициент; $\beta_{O_2/DN}$ — кислородный эквивалент

использования органического углерода в ходе реакции денитрификации, $\text{г O}_2 \cdot \text{г}^{-1} \text{N}$.

Детритная часть БПК, $\text{г O}_2 \cdot \text{м}^{-3}$:

$$\left. \frac{dB_{\text{org}}^{\text{det}}}{dt} \right|_{\text{local}} = \mu_f g_{C_3} \beta_{\text{O}_2/C} B_f - \delta_c B_{\text{org}}^{\text{det}}, \quad (5.16)$$

где g_{C_3} — доля лабильной части взвешенного органического углерода, поступающая в результате выедания и смертности фитопланктона.

Растворенный кислород, $\text{г O}_2 \cdot \text{м}^{-3}$:

$$\left. \frac{dC_{\text{O}_2}}{dt} \right|_{\text{local}} = [\sigma_f (1,3 - 0,3\chi) - (1 - \alpha_c) \varphi_f] \beta_{\text{O}_2/C} B_f - K_{\text{BOD}} B_{\text{org}}^{\text{dis}} - v_{12} C_{\text{NH}_4} \beta_{\text{O}_2/\text{N}_f}, \quad (5.17)$$

где $\beta_{\text{O}_2/\text{N}_f}$ — кислородный эквивалент процесса нитрификации, $\text{г O}_2 \cdot \text{г}^{-1} \text{N}$.

БПК₅, $\text{г O}_2 \cdot \text{м}^{-3}$. Эта формальная по сути величина включена в модель, поскольку представляет собой один из самых распространенных гидрохимических показателей качества вод. Для ее оценки используется диагностическая формула

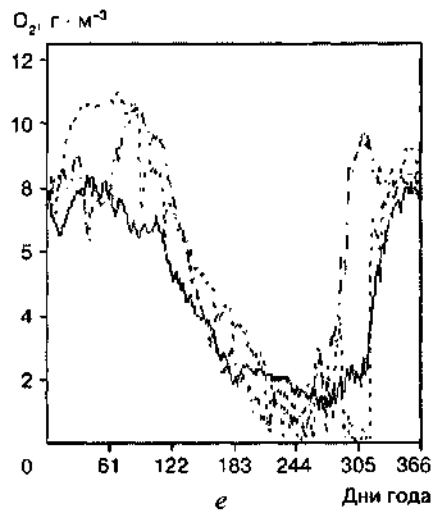
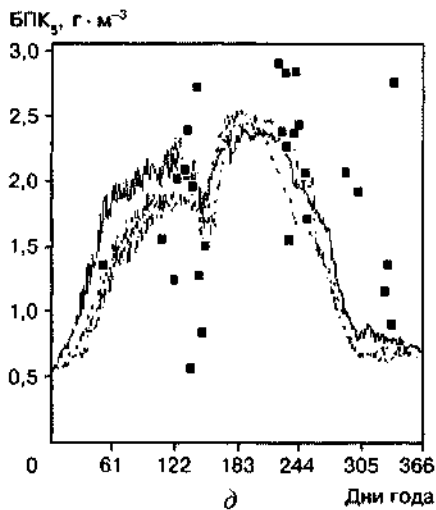
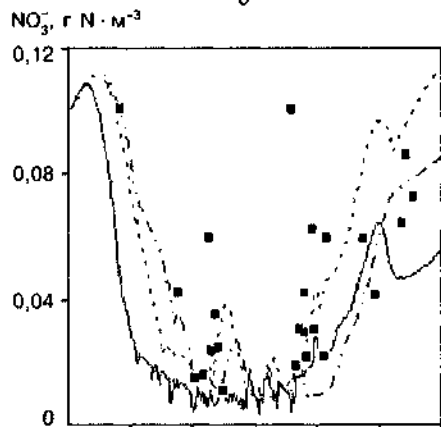
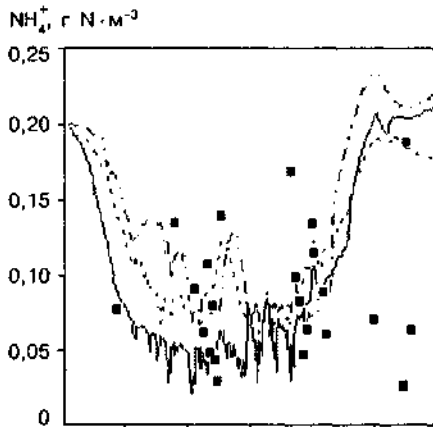
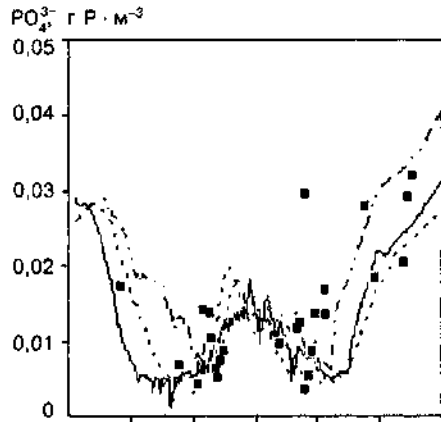
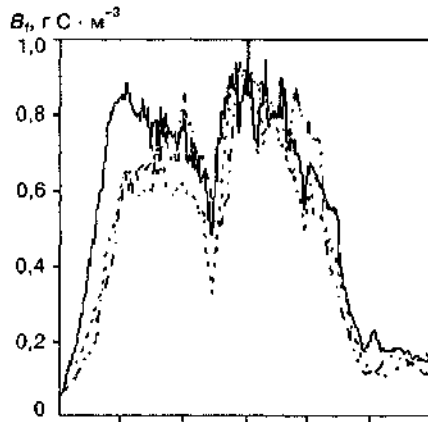
$$\text{BOD}_5 = B_{\text{org}}^{\text{dis}} \left(1 - e^{-5K_{\text{BOD}}^{\text{lab}}} \right) + \beta_{\text{O}_2/\text{N}_f} C_{\text{NH}_4} \left(1 - e^{-5v_{12}^{\text{lab}}} \right) + \beta_{\text{O}_2/C} B_f \left(1 - e^{-5\varphi_f^{\text{lab}}} \right),$$

где BOD_5 — величина БПК₅; $K_{\text{BOD}}^{\text{lab}}$, v_{12}^{lab} , φ_f^{lab} — удельные скорости процессов биохимического окисления органического вещества, нитрификации и дыхания фитопланктона в лабораторных условиях инкубации пробы.

В блоке эвтрофикации рассчитываются также потоки кислорода на верхней и нижней границах водной колонки и массообмен биогенными элементами между водой и донными отложениями, в соответствии с методами (Ляхин, 1980; Cerco et al., 1997).

Калибровка параметров блока эвтрофикации на основе данных природных наблюдений выполнялась первоначально в одномерном (по вертикали) варианте модели, когда исключались члены уравнений, описывающие горизонтальный турбулентный обмен и адвективный перенос, а также предполагалась независимость всех функций от горизонтальных координат. В такой постановке учитывается только дрейфовая составляющая скорости течений, которая используется для расчета коэффициентов вертикального турбулентного обмена и диффузии.

Основная задача калибровки заключалась в достижении соответствия порядков и характера внутригодовой изменчивости, получаемых по модели в фотическом слое и наблюдаемых значений моделируемых компонентов экосистемы. Эта цель достигалась путем коррекции, в допустимых пределах, первичных значений констант блока эвтрофикации, заданных на основе данных литературных источников.



— 1986 ···· 1983 - - - 1981

4 РИС. 1.5.5. Рассчитанный в одномерном варианте модели эвтрофикации годовой цикл биомассы фитопланктона (а), концентрации фосфатов (б), азота аммония (в), нитратов (г), БПК₅ (д) в поверхностном слое и растворенного кислорода (е) в придонном слое Одесского района СЗЧМ.

Квадратики — осредненные по пространству полигона наблюдаемые значения, полученные в период мониторинга 1988—1999 гг.

Предварительное использование одномерного варианта модели обусловлено тем, что при настройке параметров и калибровке модели он требует значительно меньших затрат машинного времени, чем трехмерный вариант, что позволяет провести большое количество численных экспериментов с различным сочетанием параметров модели и добиться требуемого характера изменчивости моделируемых показателей качества морских вод.

Отдельные результаты калибровки одномерного варианта модели, по данным экологического мониторинга ОФ ИнБЮМ (1989—1999) акватории Одесского региона СЗЧМ, приведены на рис. 1.5.5. Расчеты проводились для метеорологических условий 1981, 1983 и 1986 гг.

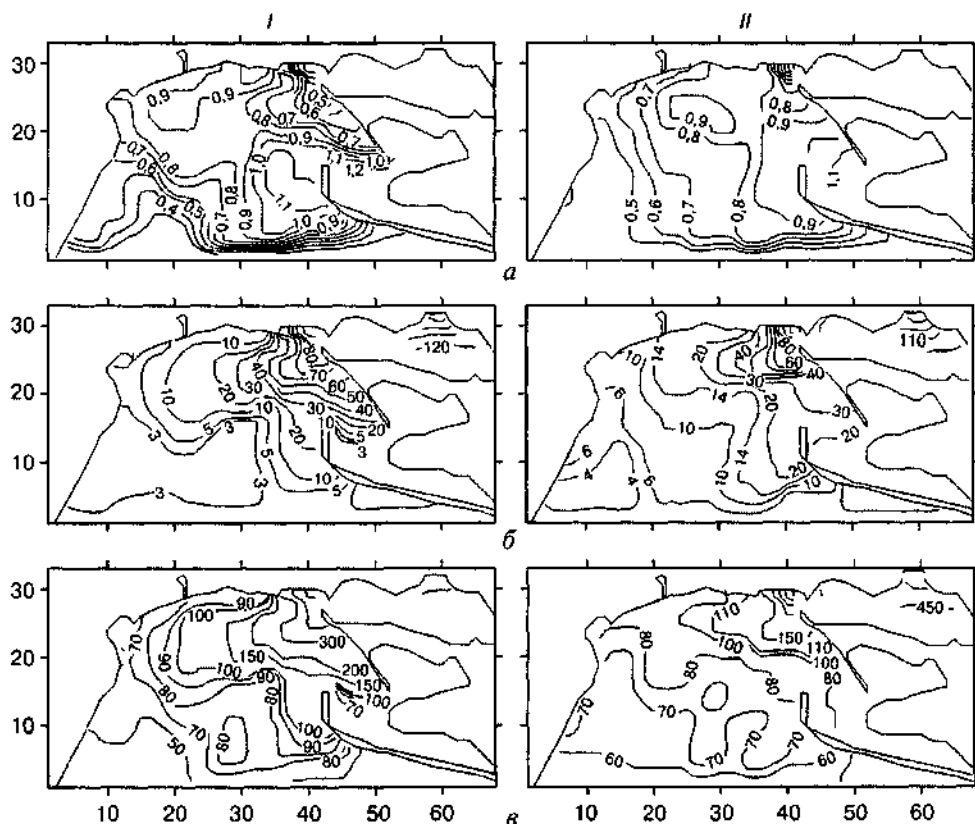


РИС. 1.5.6. Рассчитанное по модели для метеорологических условий 1986 г. пространственное распределение элементов экосистемы в поверхностном слое:

I — 4 мая; II — 25 июля; а — биомасса фитопланктона, $г С \cdot м^{-3}$; б — содержание фосфатов, $г Р \cdot м^{-3}$; в — содержание аммонийного азота, $г N \cdot м^{-3}$

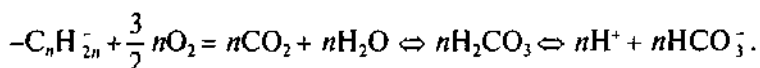


На рис. [5.6 приведены некоторые результаты моделирования изменчивости пространственного распределения фосфатов, аммонийного азота и биомассы фитопланктона в поверхностном слое Одесского и Днепроовско-Бугского районов СЗЧМ, полученные с помощью трехмерного варианта модели для гидрометеорологических условий 1986 г.

Описанная выше модель используется: а) для проверки научных гипотез и объяснения фактов, регистрируемых в ходе экологического мониторинга Одесского и Днепроовско-Бугского районов СЗЧМ, а также для установления и изучения причинно-следственных связей различных экологических процессов, наблюдаемых в этой акватории; б) в качестве инструмента для решения различного рода прикладных задач, связанных с прогнозированием продуктивности и управлением, в рамках возможного, качеством вод экосистемы Одесского региона СЗЧМ.

5.4. Моделирование процессов самоочищения шельфовых вод от нефтепродуктов

В приустьевых и Одесском районах СЗЧМ наблюдаются стабильно высокие концентрации нефтепродуктов, которые могут в несколько раз превышать уровень ПДК (см. гл. 4). Потому актуальными представляются прогнозирование уровня загрязнения морской среды нефтепродуктами и оценка их предельно допустимого сброса в конкретной акватории. Для этого с использованием методов экспериментального моделирования необходимо определить скорость самоочищения морских вод от нефтепродуктов, обусловленную процессами физико-химической и биохимической деструкции последних (Израэль, 1979; Бронфман, Хлебников, 1985; Поликарпов, Егоров, 1986; Тархова, 2000; Михайлова, 2002). Превращение нефтяных углеводородов (НУВ) в конечные продукты их распада происходит по схеме



Константа скорости распада нефтепродуктов K_{ci} (коэффициент неконсервативности в формуле (5.2)) в первом приближении может быть определена традиционным методом (Рябинин, 1976; Номикос, 1978; Поликарпов, Егоров, 1986) по убыванию их концентрации в объеме модельных емкостей с использованием уравнения (5.3). Однако можно показать (Бронфман, Хлебников, 1985; Савин, 1998), что превращение любой смеси веществ (в том числе сырой нефти и нефтепродуктов) не подчиняется кинетическому закону реакции 1-го порядка. Причем, как показали результаты экспериментов, проведенных с водами СЗЧМ, значения K_{ch} рассчитанные по уравнению (5.3), уменьшаются со временем / и тем быстрее, чем шире разброс значений концентрации индивидуальных углеводородов, а также чем больше в смеси легкоокисляющихся веществ. К концу экспозиции значения удельной скорости распада дизельного топлива уменьшаются в 5–7 раз по сравнению с начальными значениями. В результате обобщения данных модельных экспериментов с дизельным топливом была найдена зависимость K_{ci} от време-

ни экспозиции, которая, по сути, связывает удельную скорость распада нефтепродуктов с временем их пребывания в морской воде:

$$K_{ci}(t) = \frac{1,19}{(1,19 + 0,43t)^2}. \quad (5.18)$$

Применительно к многокомпонентным смесям полученное уравнение дополняет традиционное уравнение 1-го порядка, что позволяет более корректно описать кинетику деградации нефтепродуктов в исследуемой акватории.

Установленный характер зависимости K_{ci} от длительности нахождения нефтепродуктов в море связан с тем, что наиболее лабильные углеводороды, входящие в их состав, подвергаются окислению уже в первые дни их контакта с морской средой. Со временем удельный вес более консервативных составляющих возрастает и скорость деструкции, соответственно, падает.

Известно, что точность определения концентрации нефтепродуктов в водной среде существенно зависит от их состава, степени деструкции, фонового содержания углеводородов естественного происхождения, а также от физико-химических параметров среды (Лейте, 1975; Коренман, 1977). Поэтому для объективной оценки скорости самоочищения конкретной акватории от НУВ была предпринята попытка снижения погрешности в рассчитываемых значениях кинетических характеристик путем привлечения дополнительных параметров процесса, определяемых независимыми методами и изменяющихся вместе с изменением концентрации нефтепродуктов. Исходя из приведенной схемы химического процесса распада НУВ, наиболее приемлем в этом отношении контроль убывания концентрации кислорода и изменений величины рН (Савин, 1998). Однако чтобы контролировать скорость распада внесенных нефтепродуктов по интенсивности биохимического потребления кислорода и генерации ионов водорода, необходимо учесть вклад в изменение этих характеристик других веществ, находящихся в морской воде, путем параллельной постановки контрольных экспериментов без добавок НУВ. Чтобы содержание кислорода и значения рН в течение всего эксперимента оставались функцией концентрации углеводородов, необходимо проведение модельных опытов в закрытых системах, в темноте и при достаточном насыщении моделей кислородом. При выполнении этих условий интегральный показатель скорости распада нефтепродуктов можно рассчитать по формуле

$$\bar{K}_{ci} = \frac{K_{ci} + K[O]k_1 + K[H^+]k_2}{3}, \quad (5.19)$$

где K_{ci} , $K[O]$, $K[H^+]$ — константы скорости распада НУВ, потребления кислорода и генерации ионов водорода соответственно; k_1 и k_2 — коэффициенты, зависящие от стехиометрии процессов окисления НУВ (рассчитываются из условия выполнения равенств $K_{ci} = K[O]k_1$ и $K_{ci} = K[H^+]k_2$). Рассчитав k_1 и k_2 как среднестатистические параметры, присущие целому региону, удельные скорости распада нефтепродуктов заданных районов можно найти по изменению содержаний НУВ, кислорода и ионов водорода с помощью уравнения (5.19).

Технические трудности определения концентрации нефтепродуктов в экспериментах, проводимых на борту судна, часто не позволяют своевре-



менно контролировать процесс распада НУВ прямым измерением их концентрации. В этом случае, используя указанную методику, с помощью уравнения

$$K_{cl} = \frac{K[O]k_1 + K[H^*]k_2}{2} \quad (5.20)$$

можно адекватно рассчитать показатель скорости распада нефтепродуктов по изменению концентрации кислорода и значений рН .

Полученный экспериментальным путем массив информации использовался для выяснения характера и особенностей зависимости удельных скоростей распада нефтепродуктов от гидрохимических характеристик морской среды: солености, содержания кислорода и биогенных веществ. Выбор указанных гидрохимических параметров обусловлен не только их очевидной значимостью в процессе деструкции НУВ, но и тем, что именно они претерпевают значительные антропогенные изменения, опосредованно вызывающие соответствующие изменения потенциальной способности морских вод к самоочищению.

Статистическая обработка результатов экспериментов показала, что при достаточно четкой связи показателей скорости распада НУВ и скорости потребления кислорода на их окисление кинетические кривые концентрации кислорода в моделях с внесенным дизельным топливом значительно различаются в зависимости от химико-биологических характеристик вод разных районов моря.

Представляется возможным разделить мезотрофные (открытые) и эвтрофированные (взморья рек, Одесский регион) районы моря.

В мезотрофных водах процесс биохимического окисления НУВ лимитируется пониженным содержанием биогенных веществ. Характерны низкий уровень и незначительное различие ВПК в контрольных модельных емкостях и в емкостях с НУВ. Удельная скорость распада нефтепродуктов здесь минимальная.

В эвтрофных водах значения ВПК в контроле и в склянках с добавкой НУВ изменяются в широких пределах в зависимости от соотношения общей численности гетеротрофных и нефтеокисляющих бактерий. В случае высокой концентрации автохтонного органического вещества микробные ценозы в качестве субстрата используют преимущественно легкоокисляющееся автохтонное органическое вещество, а не НУВ. Поэтому скорость деструкции нефтепродуктов, как правило, мала. Однако относительно низкая концентрация органического вещества при высокой обеспеченности биогенными веществами способствует росту скорости деструкции нефтепродуктов.

С учетом изложенного можно полагать, что зависимость констант скорости распада нефтепродуктов от исходной концентрации кислорода должна описываться вогнутой кривой с минимумом в области значений кислорода, характерных для открытых слабозагрязненных мезо- или олиготрофных зон моря. Указанное предположение подтверждается зависимостью $K_{cl} - /[O_2]$ построенной с использованием всего массива экспериментальных данных, обработанных по методу, предложенному в работе (Бронфман, Макарова, 1973). Сущность метода состоит в выделении некоторого числа

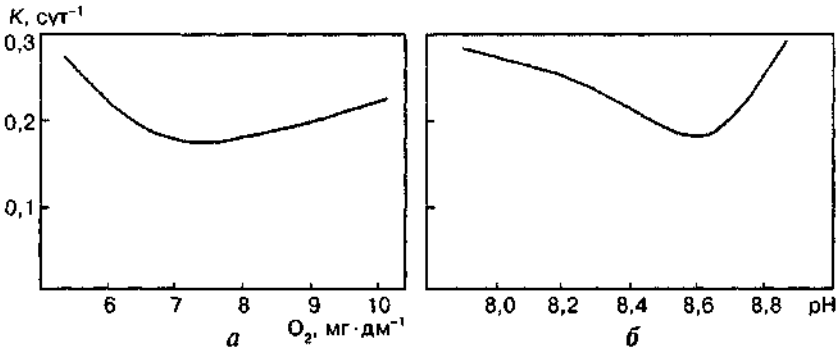


РИС. 1.5.7. Зависимость показателей скорости распада дизельного топлива от содержания кислорода (а) и ионов водорода (б) в водах СЗЧМ

диапазонов концентрации кислорода, группировке и последующем осреднении внутри них соответствующих экспериментальных значений K_{cl} . Зависимости $K_d = f[O_2]$, построенные по данным, осредненным для СЗЧМ, представлены на рис. 1.5.7, а. Малые величины K_{cl} характерны для зон с концентрацией кислорода 7,5–8,0 мг · дм⁻³. Показательно, что аналогичный минимум характерен и для зависимости $\hat{K}_{cl} = K_{cl}/[pH]$ в области значений рН 8,4–8,6 (рис. 1.5.7, б).

Приведенные зависимости отражают типичные для поверхностных слоев моря кислородные условия. Однако в придонном слое концентрация кислорода может снижаться до 1–2 мг · дм⁻³ и ниже. С целью изучения влияния гипоксии на интенсивность процессов самоочищения были выполнены специальные эксперименты, позволяющие проследить изменение удельной скорости распада дизельного топлива в широком диапазоне концентраций кислорода.

Результаты опытов (рис. Г.5.8) свидетельствуют о выраженном снижении значений K_d при уменьшении концентрации O_2 , причем наиболее резко скорость распада дизельного топлива уменьшается начиная с концентрации O_2 менее 2,0–2,5 мг · дм⁻³.

Таким образом, в глубинных и придонных горизонтах с повышенной вероятностью гипоксии в теплый период года можно ожидать значительное замедление процессов распада НУВ. По данным (Бронфман и др., 1985), при прочих равных условиях деструкция нефтепродуктов при дефиците кислорода происходит от 1,5 до 6 раз медленнее, чем при достаточной аэрации.

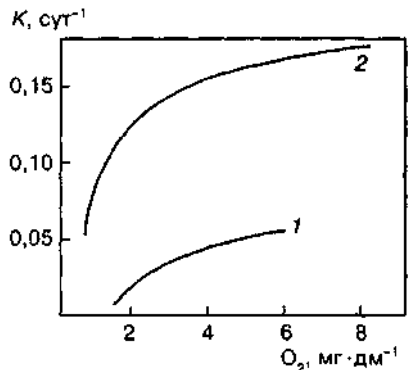


РИС. 1.5.8. Зависимость показателей скорости распада дизельного топлива от исходной концентрации кислорода в закрытых моделях с водой мезотрофных открытых районов северо-западной части Черного моря (1) и эвтрофной водой Днепровско-Буге кого приустьевом взморья (2)



Среди факторов, регулирующих активность биохимической деструкции НУВ, несомненно, следует назвать обеспеченность самоочищающейся системы биогенными веществами, и прежде всего соединениями азота и фосфора. Обработка результатов модельных экспериментов с группировкой и осреднением данных по методу (Бронфман, Макарова, 1973) позволила установить эмпирические зависимости скорости распада дизельного топлива от содержания общего азота N_{061U} и фосфора $P_{06ш}$ в водах СЗЧМ:

$$K_d = 0,12 + 0,37 \cdot 10^{-2} P_{06ш} \quad (z = 0,92 \text{ при концентрации } P_{06ш} \text{ от } 10 \text{ до } 100 \text{ мг} \cdot \text{м}^3),$$

$$K_d = 0,08 + 0,25 \cdot 10^{-3} N_{06ш} \quad (z = 0,84 \text{ при концентрации } N_{06ш} \text{ от } 100 \text{ до } 1200 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}), \text{ где } \gamma \text{ — коэффициент корреляции.}$$

Отметим, что в отдельных, сильно эвтрофированных зонах рассматриваемых акваторий с высоким содержанием автохтонного органического вещества интенсивность самоочищения оказывается значительно сниженной даже при условии достаточной обеспеченности азот- и фосфорсодержащими соединениями. Так, на Днепровско-Бугском приустьевом взморье при $BPK_5 = 6 \text{ мг} \cdot \text{дм}^{-3}$ и содержании $N_{06ш}$ и $P_{06ш}$ соответственно 800 и 23 $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$ величина K_d не превышала $0,06 \text{ сут}^{-1}$.

Очевидно, что, в отличие от океанических вод с примерно одинаковой соленостью, влияние последней на потенциальную способность водных масс к самоочищению в наибольшей степени может быть выявлено в пределах морских акваторий, находящихся под влиянием речного стока. В этом отношении, как и по биогенным веществам, СЗЧМ представляет собой показательный объект исследования. В период проведения модельных экспериментов соленость здесь изменялась в пределах от 1 до 18 ‰, что позволило установить характер зависимости показателя скорости распада НУВ от этого фактора:

$$K_{сн} = 0,86 / \sqrt{S} - 0,0057(S - 2), \quad (5.21)$$

где S — соленость вод.

Вместе с тем следует подчеркнуть, что описываемое зависимостью (5.21) снижение интенсивности самоочищения с ростом солености вод в основном отражает не столько непосредственное влияние солености, сколько более высокую активность процессов самоочищения в богатых биогенными веществами, насыщенных жизнью и характеризующихся активным эвтрофным метаболизмом солоноватых приустьевых водах по сравнению с водами открытых районов моря. Таким образом, в данном случае соленость следует рассматривать как интегральный показатель, отражающий активность процессов самоочищения в отношении НУВ.

РАЗДЕЛ II

**Современное
состояние и тенденции
изменения
экосистемы:
биота**



*...не гибнет ничто,
как будто совсем погибая,
так как природа
всегда возрождает одно
из другого и ничему
не дает без смерти
другого родиться.*

Лукреций

Нейстон

Обнаружение нейстона на поверхности пелагиали Черного моря (Зайцев, 1960, 1961a) и последовавшие работы в этой области, которые впервые развернулись в ОФ ИнБЮМ, не только выявили ключевое значение нейстали и ее обитателей в морской экосистеме, но также послужили толчком для более углубленного изучения других краевых (контурных) биотопов моря.

Исследования развивались в двух основных направлениях. Одно из них — изучение звеньев пищевых цепей в нейстали и трофических уровней от бактерио- и фитонейстона до ихтионейстона. Другое направление — исследование абиотических и биотических особенностей нейстали Черного моря как специфического биотопа пелагиали. Данные, которые получили специалисты ОФ ИнБЮМ (Зайцев, 1961b, 1962) в других морях и океанах, использовались как сравнительные и на их основе были сделаны многие обобщения и выводы.

По примеру одесских ученых морские научные центры страны и мира определили биосферную роль нейстона как имманентного, структурного и функционального элемента экосистемы галосферы (Зайцев, 1970a).

Эволюционное возникновение нейстона с его ключевой ролью в жизни пелагиали и бентали было предопределено комплексом физико-химических процессов, протекающих на границе моря и атмосферы (Зайцев, 1970a, б; Айзатуллин и др., 1974). Запоздалое же знакомство биологов с морским нейстоном в значительной степени объясняется бытовавшим в литературе априорным убеждением о непригодности поверхности пелагиали для большинства живых существ и недооценкой способностей гидробионтов адаптироваться к жизни в самом открытом и незащищенном верхнем биотопе морской пелагиали.

О безжизненности поверхности океана говорилось уже в итогах первых крупных океанологических исследований, таких как кругосветная экспедиция на судне «Challenger» в 1872—1876 гг., опубликованных в 50 томах под редакцией известного английского океанографа и натуралиста Джона Меррея. В дневнике экспедиции имеется запись ее участника, естествоиспытателя Х.Н. Моузли, по поводу наблюдений на одной из глубоководных станций в центральной части Атлантического океана, недалеко от Саргассова моря: «Меррей и я отошли от судна на лодке; поверхность воды была лишена всякой животной жизни, но кишела Oscillatoriaceae (Trichodesmium). Не было водорослей (саргассовых. — Ю.З.). Лишь ночью в поверхностную сеть попали четыре живых Halobates». И далее: «Временами эти организмы (Trichodesmium. — Ю.З.) столь многочисленны, что окрашивают воду в красный цвет и достигают численности 80 000 клеток в одном литре».

Высказывания относительно бедности жизни на поверхности пелагиали повторялись и позднее, например в книге Р.С. Уимпенни (Wimpenny, 1966) «The Plankton of the Sea». Априорное мнение биологов о безжизненности поверхности морской пелагиали не изменилось и после описания Э. Науманном в 1917 г. пресноводного нейстона, который хотя и был признан новым классом сообществ, наравне с планктоном и бентосом (Зернов, 1934), считался исключительно пресноводным явлением, характерным только для небольших, защищенных от ветра водоемов, но никак не для озер или водохранилищ.

Дальнейшие наблюдения во многом повторяли эти замечания. До середины XX в. обитателями поверхности морской пелагиали считались только тепловодные плейстонные (полупогруженные) виды родов Physalia и Velella. С ними ассоциированы и другие виды беспозвоночных. Позднее, благодаря исследованиям А.И. Савилова (1956, 1958, 1963), стали известны сообщества плейстонных сифонофор физалии и парусника, характерные для открытых вод тропической и субтропической зон Тихого океана.

Поэтому выявление комплекса нейстонных организмов в приповерхностном микрослое пелагиали Черного моря (Зайцев, 1960), для которого характерны значительные сезонные колебания температуры воды и где плейстонные организмы отсутствуют, было в известной степени неожиданно и сначала могло казаться парадоксальным. Впоследствии выяснились объективные причины этого явления, и морской нейстон занял место ключевого элемента в представлениях о структуре и функционировании экосистемы галосферы (Полжарпов, Зайцев, 1969).

Исследования морского нейстона в ОФ ИнБЮМ, в отделе радиобиологии (г. Севастополь), а также в ряде зарубежных научных центров дали большой объем научной информации и сведений, ценных для практики, что позволило сформулировать основные положения новой области биологии и экологии моря — морской нейстонологии. Вначале это было сделано в обзорной статье журнала «Pelagos» на французском языке (Zaitsev, 1968), а затем в монографии «Морская нейстонология», опубликованной в киевском издательстве «Наукова думка» (Зайцев, 1970а). В следующем году эту книгу перевели на английский язык и опубликовали (без консультаций

с ее автором) в США и Израиле (Zaitsev, 1971). В рецензии на «Морскую нейстонологию» проф. А.С. Константинов (1971) отмечает, что книга выводит эту область гидробиологии на широкую научную арену в качестве самостоятельной биологической дисциплины. Исследования морского нейстона получили новый импульс, а в 1980 г. Ю.П. Зайцев, по приглашению правительственной организации Японии «Японское общество содействия развитию науки», читал лекции по морской нейстонологии в шести ведущих университетах страны. До этого такой спецкурс читали студентам-гидробиологам Одесского национального университета им. И.И. Мечникова.

Как и в других случаях, когда применялись оригинальные методы исследований, результаты изучения морского нейстона дали не только новые сведения об особенностях жизни на границе пелагиали и атмосферы, но подсказали также некоторые перспективные направления научного поиска в биологии и экологии моря. Основные результаты изучения морского нейстона и условий его существования ОФ ИнБЮМ после выхода в свет монографии «Биология северо-западной части Черного моря» (1967) коротко можно представить следующим образом.

1.1. Гидрохимические и биохимические исследования

Отбор проб воды из поверхностного микрослоя (ПМС) пелагиали толщиной менее 1 мм осуществляли с помощью ячеистого (сетчатого) экрана, по своей конструкции и принципу действия аналогичного «гипонейстонной площадке» (Зайцев, 1962). В литературе этот прибор называют также сеткой Гаррета, описавшего предложенную им методику сбора «сликообразующих материалов» с морской поверхности (Garret, 1965). Считается, что сетчатый экран отбирает верхний слой толщиной 100—150 мкм, включая морскую воду, взвешенные в ней частицы и пленку из поверхностно-активных веществ, которая обычно располагается на поверхности воды и может быть рассмотрена невооруженным глазом в виде «штилевых пятен», или «сликов».

В пробах, отобранных таким образом в СЗЧМ, Ю.И. Богатова и Г.П. Гаркавая обнаружили, что в подавляющем большинстве случаев в ПМС происходит накопление фосфатов, нитратов, кремния и органических веществ по сравнению с водой, полученной с помощью «поверхностного» батометра (табл. II.1.1).

Как видно из табл. II.1.1, содержание фосфатов в ПМС в 2—4, а нитратов — в 2—2,5 раза превышает таковое в воде из «поверхностного» батометра. Причем показано, что в районах, находящихся под прямым влиянием речного стока — основного поставщика биогенных веществ — количество соединений азота и фосфора в ПМС выше, чем в центральных водах северо-западной части моря. Существенно также то обстоятельство, что максимальные значения минеральных соединений азота, фосфора и кремния в ПМС обнаружены в 1978—1983 гг. Эти годы были периодом особенно отчетливого усиления синдрома антропогенной эвтрофикации в СЗЧМ, на что указывают также материалы биологических исследований.



Для биохимической оценки развития продукционно-деструкционных процессов у поверхности пелагиали В.К. Головенко использовала количественные показатели растворенных в воде и пене белков и нуклеиновых кислот, которые относятся к числу наиболее важных органических соединений, поступающих в водную среду в результате метаболизма гидробионтов и отражающих состояние планктона и нейстона (табл. II.1.2).

Из табл. II.1.2 видно (и этого следовало ожидать), что в пене приморских водоемов, по сравнению с водой из приповерхностного слоя, зафиксированы высокие концентрации растворенных органических веществ. Количественное содержание этих веществ в различных водоемах, в зависимости от их связи с морем и других обстоятельств, отличается, но во всех случаях определяются концентрации, на порядки величин более высокие, чем в воде. Это свидетельствует об интенсивной метаболической активности микроорганизмов пены. В море наблюдается аналогичная картина, но приморские водоемы выбраны в силу большей доступности получения нужных объемов пены в каждой точке. В лаборатории получали отстой пены в виде более или менее густой жидкости, а его количество измеряли в кубических сантиметрах (см³) и сопоставляли с равным объемом воды из приповерхностного слоя толщиной 0—5 см.

ТАБЛИЦА II. 1.1. Средние значения (мг • дм³) некоторых гидрохимических показателей пелагиали СЗЧМ в 1978—1987 гг. (по материалам Ю.И. Богатовой и Г.П. Гаркавой)

Горизонт	Ингредиент						
	PO [^]	p _{орг}	NOi	NOJ	N _{орг}	Si	ПО, мг О • дм ^{'''}
<i>Лето 1978 г. (рейс № 86)</i>							
ПМС (100 мкм) 0 м (батометр)	54,7		7,4	490,3		1183	—
	17,0		55,4	220,0	—	1864	
<i>Лето 1980 г. (рейс № 97)</i>							
ПМС (100 мкм) 0 м (батометр)	219,9	99,5	6,4	99,3	312	3814	11,0
	86,6	71,2	9,5	49,5	480	2091	4,1
<i>Лето 1982 г. (рейс № 109)</i>							
ПМС (100 мкм) 0 м (батометр)	100,0	74,7	5,1	50,8	520	5374	4,0
	26,1	19,9	2,7	16,6	373	1659	1,3
<i>Весна 1983 г. (рейс № 114)</i>							
ПМС (100 мкм) 0 м (батометр)	18,6	25,4	3,6	8,5	484	2618	3,7
	16,8	36,6	2,9	6,7	1214	2124	3,6
<i>Лето 1983 г. (рейс № 115)</i>							
ПМС (100 мкм) 0 м	75,3	45,8	6,2	21,7	280	2054	
	77,0	61,3	4,0	12,3	305	2358	—
<i>Лето 1987 г. (рейс № 128)</i>							
ПМС (100 мкм) 0 м (батометр)	34,4	9,0		17,0	785	330	
	13,6	22,5	2,6	6,1	405	200	

ТАБЛИЦА П. 1.2. Содержание белка и нуклеиновых кислот (мг • дм³) в различных приморских водоемах (по материалам В.К. Головенко)

Район	Белок		Нуклеиновые кислоты				НК/Б	
	0	Пена	0	Пена			0	Пена
				ДНК	РНК	Всего		
Тендровская лагуна 1	0,29	1080,0	0,55	550,0	440,0	990,0	19,0	0,9
Тендровская лагуна 2	0,18	560,0	0,16	630,0	560,0	1190,0	0,9	2,1
Кинбурнская лагуна	0,18	558,0	0,17	504,0	320,0	824,0	0,9	1,5
Днестровская лагуна	0,18	365,0	0,24	240,0	960,0	1200,0	1,3	33,0
Малый Аджалыкский лиман	0,17	322,0	0,22	139,0	88,0	227,0	1,3	0,7

Примечание. 0 — поверхностный слой воды, НК/Б — соотношение нуклеиновых кислот и белка.

Верхний (менее 5 см) слой воды содержал скопление мертвых и отмирающих одноклеточных водорослей и беспозвоночных. Так, Д.А. Нестерова (1968) нашла здесь на 20 % больше мертвых клеток диатомовой водоросли *Nitzschia seriata*, чем на глубине 0,25 см, а Л.М. Зеленская (1968, 1969) обнаружила в 2,5 раза больше трупов веслоногих ракообразных. У ветвистого рачка *Penilia avirostris* это соотношение было 4,3 : 1,0.

Установленное сосредоточение мертвого планктона у поверхности пелагиали получило название «антидождь трупов» (Зайцев, 1967).

1.2. Бактерионейстон

Определение условий развития нейстонных организмов также послужило толчком для специального изучения морской пены как среды обитания гидробионтов. Этот элемент морской экосистемы состоит из пузырьков газа и их оболочек, содержащих большое количество органических и минеральных веществ морского, наземного и атмосферного происхождения. Исследования (Чиликина, 1969, 1970; Цыбань и др., 1971) показали, что морская пена стимулирует развитие не только морских водорослей, беспозвоночных и рыб, но также наземных растений — пшеницы, ячменя и овса. Этим отчасти объясняется обилие сапрофитной микрофлоры пены, численность которой на 2—4 порядка величин превосходит численность бактерий в морской воде.

А.В. Цыбань (1969—1971) выявила и изучила морской бактерионейстон, который наряду с одноклеточными водорослями и морскими грибами составляет основание трофической пирамиды в приповерхностном микрослое моря, получившее название «нейсталь» (Константинов, 1986). Вопреки высказываниям авторитетных микробиологов, например Зо Бела, автора книги «Морская микробиология» (Zo Bell, 1946), о том, что в связи с интенсивной ультрафиолетовой радиацией солнца развитие бактерий в верхнем 10-сантиметровом слое пелагиали сильно затруднено, А.В. Цыбань обнаружила в слое 0—2 см на 1—3 порядка больше микроорганизмов, чем на

глубине 0,5 м. Эти бактерии отличаются более яркой пигментацией по сравнению с бактериопланктоном водной толщи и высокой биохимической активностью (Цыбань, 1969).

В последующем ученые ОФ ИнБЮМ получили новые данные о бактерионейстоне СЗЧМ (Тешпнська, 1976; Нижегородова и др., 1981; Теплинская, 1981, 1983; Цыбань, Теплинская, 1982; Нижегородова, Нидзвецкая, 1985; Теплинская, Бондаренко, 1985).

Проанализировав взаимосвязи бактерий и одноклеточных водорослей в нейстали и пелагиали северо-западной части моря, Н.Г. Теплинская и ДА. Нестерова (1986) отметили, что наиболее четко отношения этих организмов прослеживаются в ГМС и пене — биотопах, содержащих их максимальное количество.

Показательно, что в дальнейшем, по мере усиления антропогенного загрязнения Черного моря веществами с поверхностно-активными свойствами, пена в значительной степени утратила способность стимулировать биологические процессы, а в некоторых случаях стала ингибировать развитие водных и наземных организмов. Это наблюдение соответствует общему снижению численности популяций морских организмов, связанных в своем развитии с нейсталью, но физико-химическая природа отношений в системе пена—живые организмы еще нуждается в изучении. Однако, судя по имеющимся данным, пена может служить чувствительным индикатором состояния морской экосистемы.

1.3. Фитонейстон

Используя сетчатый экран, Д.А. Нестерова (1969, 1980, 1986) обнаружила в ПМС пелагиали Черного моря постоянные скопления одноклеточных водорослей, на 1—3 порядка превышавшие численность этих организмов в водной толще. В составе фитонейстона могут преобладать диатомовые, например *Cerataulina pelagica*, перидиниевые, а также синезеленые водоросли, например *Gleocapsa limnetica*. Последний вид в толще воды не обнаружен.

В морской пене зафиксированы высокие концентрации не только мертвых, но и живых одноклеточных водорослей. Так, Д.А. Нестерова в зоне влияния стока Дуная обнаружила большое количество клеток массовой перидиниевой водоросли *Prorocentrum cordatum* в пересчете на 1 дм³ воды:

Отстой пены	9 100 000
ПМС, толщина 100 мкм	40 000
Вода, глубина 0,1 м	19 000

По материалам С.Е. Никоновой, численность цист микрофитов (преимущественно динофлагеллят) в отстое пены, собранной в прибрежной полосе Одесского залива в мае 2004 г., была на 2 порядка выше, чем в приповерхностном слое воды, а в отстое пены из Малого Аджалыкского, Большого Аджалыкского и Тилигульского лиманов, собранной в июле—сентябре 2003—2004 г., цист было в сотни и тысячи раз больше, чем в воде.

Общее количество клеток фитопланктона в ПМС пелагиали толщиной 100 мкм, как правило, заметно отличается от такового в воде, получаемой

на поверхности с ПОМОЩЬЮ батометра. На практике этот горизонт пелагиали обозначают как «О М», ХОТЯ ПОВЕРХНОСТНУЮ Пленку ОН не ВКЛЮЧАЕТ (табл. II. 1.3).

Вертикальное распределение некоторых массовых видов фитопланктона наглядно иллюстрирует факт их сосредоточения у поверхности пелашали (табл. II.1.4).

Как видно из табл. II.1.3, все виды отдают явное предпочтение ПМС, а *Chaetoceros insignis* и *Merismopedia minima* за его пределами вовсе не обнаруживаются. Можно высказать предположение, что в ПМС Черного моря встречаются и другие виды синезеленых водорослей, однако вследствие мелких размеров (эти микрофиты относятся к размерному классу пикопланктона) они не полностью учитываются при рутинной обработке проб фитопланктона. Во всяком случае в ПМС Атлантического океана виды рода *Tnchodesmium* присутствуют постоянно в количествах, тысячекратно превышающих таковые в слое (Hardy et al., 1997).

ТАБЛИЦА II. 1.3. Общая численность фитопланктона (кл. • дм⁻³) у поверхности пелагиали СЗЧМ (по материалам Д.А. Нестеровой)

Номер станции	Горизонт	
	ПМС (100 мкм)	0 м (батометр)
<i>Август—сентябрь 1982 г. (рейс № 10909)</i>		
11	80 479 200	36 724 000
32	101 400	323 800
46	2 258 400	2 064 000
50	564 278	580 000
53	2700	87 600
54	26 400	3 600
60	2 222 900 000	169 596 000
66	42 100	284 800
94	26 400	3400
102	422 300	441 700
103	97 800	86 000
<i>Апрель—июнь 1983 г. (рейс № 1144)</i>		
6	1 400 000	303 000
57	244 200	187 000
60	47 400	45 600
61a	106 600	287 600
61b	83 875	142 900
65	26 200	27 875
95	1000	52 900
96	26 300	375 100
97	27 300	51 272
98	8100	4100
99	151 350	82 000
100	70 150	46 625
101	39 625	56 000
106	4 738 750	8 404 800
109	9 916 000	5 952 000
и бис	1 630 000	11 204 000
28 бис	1 478 400	11 801 000
50 бис	4 500 000	2 340 000
61	26 250	1414 100

ТАБЛИЦА II. 1.4. Вертикальное распределение (кл. • дм⁻³) диатомовых и синезеленой водорослей СЗЧМ (по материалам Д.А. Нестеровой)

Горизонт	Диатомовые			Синезеленые
	<i>Cerataulina pelagica</i>	<i>Nitzshia closterium</i>	<i>Chaetoceros insignis</i>	<i>Merismopedia minima</i>
100 мкм	96 000 000	360 000	182 400	83 875
0—5 см	2 700 000	11 600	0	0
ЮМ"»	12 800	11 200	0	0
25 м	2400	11 200	0	0
35 м * ²⁾	800	0	0	0

*¹⁾ Для *Nitzshia closterium* — 17 м.

*²⁾ Для *Nitzshia closterium* — 50 м.

1.4. Хлорофилл в поверхностном микрослое пелагиали и нейстали

В связи с высокими концентрациями микроводорослей в ПМС не случайным представляется повышенное содержание хлорофилла «а» по сравнению даже со слоем 0—5 см (табл. II. 1.5).

Как показано в табл. II. 1.5, в подавляющем большинстве случаев (89 % станций) концентрация хлорофилла в ПМС в несколько раз, а в ряде случаев на порядок выше, чем в воде. Это указывает на сосредоточение активно фотосинтезирующих организмов у самой поверхности пелагиали.

ТАБЛИЦА II. 1.5. Концентрация (мг • м³) хлорофилла «а» (по материалам Е.М. Руснак)

Номер станции	ПМС (100 мкм)	Нейсталь (0-5 см)	Коэффициент накопления хлорофилла «а» в ПМС
<i>Август—сентябрь 1982 г. (рейс № 109)</i>			
11	44,4	8,5	5,2
32	9,6	6,2	1,5
46	10,1	3,5	2,9
50	2,3	0,6	3,8
66	0,4	0,1	4,0
94	0,2	0,1	2,0
102	0,2	0,1	2,0
<i>Октябрь—ноябрь 1982 г. (рейс №111)</i>			
10	22,7	12,8	1,8
11	22,0	15,8	1,4
12	4,3	4,4	0,9
33	20,0	14,2	1,4
59	6,7	5,0	1,3
60	5,0	3,9	1,3
61	17,8	2,0	8,9
99	2,0	0,4	5,0
100	1,2	2,2	0,5
<i>Апрель—июнь 1983 г. (рейс № 114)</i>			
6	1,2	1,0	1,2
11	33,0	28,0	1,2
28	6,1	2,6	2,3
50	4,0	2,8	1,4
57	0,2	1,1	0,2
58	0,2	0,2	1,0
61А	0,3	0	3,0
95	0,2	0,1	2,0
96	0,2	0,1	2,0
98	0,2	0,1	2,0
106	6,4	2,9	2,2
109	3,8	1,5	2,5

1.5. Миконейстон

Присутствие большого количества спор грибов в отстое морской пены тоже вполне объяснимо, по крайней мере в связи с питательными характеристиками этой среды. Такие исследования в ОФ ИнБЮМ проводила Л.М. Зелезинская (1979), она же Багрий-Шахматова (1983, 1988, 1989); в последние годы споры и мицелии грибов в пене и морской воде исследовала Н.И. Копытина (табл. II.1.6).

Из табл. II.1.6 видно, что численность спор грибов в пене на порядки величин выше, чем в поверхностном слое воды. Аналогичное соотношение, по данным Н.И. Копытиной, показывают мицелиальные клетки грибов, что дает основание для утверждения о реальности миконейстона как компонента морского нейстонного сообщества. Разница между морем (Одесский залив) и солеными лиманами в том, что в морской пене преобладают (более 70 % случаев) споры морских видов грибов, в первую очередь *S. maritima* и *Arenariomyces trifurcatus*, а в пене из соленых лиманов значительную долю (до 77 %) составляют наземные грибы из родов *Alternaria* (за исключением одного морского вида *Alternaria maritima*), *Stemphylium*, *Diplodia* и др. Пребывание спор грибов в составе пены — явление временное в связи с последующим переходом этих организмов в водную и наземную среды, где происходит их дальнейшее развитие.

Согласно экологической норме, сосредоточение большого количества спор и фрагментов мицелия грибов в пене представляет собой один из существенных факторов формирования высоких пищевых и энергетических характеристик этого специфического биотопа. Однако в настоящее время такое явление наблюдается не всегда. В собранных Н.И. Копытиной за 2002—

ТАБЛИЦА И. 1.6. Численность (N , 10^3 экз. • $дм^{-3}$) и биомасса (B , $мг \cdot дм^{-3}$) спор морских и наземных грибов в Одесском заливе и соленых лиманах: (по материалам Н.И. Копытиной)

Район	Дата	Споры грибов	Пена		Нейсталь (0—5 см)	
			N	B	N	B
Одесский залив	XI.2002	Морские	3890	5,7	9	0,012
		Наземные	1260	2,4	2	0,004
		Всего	5150	8,1	11	0,016
Малый Аджалыкский лиман	IX.2003	Морские	116	0,009	0	0
		Наземные	34 009	37,1	2,6	0,006
	Всего	34 125	37,11	2,6	0,006	
	VIII. 2004	Морские	1000	1,1	0,6	0,006
		Наземные	52 708	34,6	14,8	0,2
Тилигульский лиман	IX.2003	Всего	53 708	35,7	15,4	0,206
		Морские	1200	2,2	0,7	0,0008
	Наземные	13 900	21,1	14	0,03	
	Всего	15 100	32,3	14,7	0,031	

2004 г. образцах пены в 20 % случаев не были обнаружены диаспоры грибов, а также цисты водорослей и другие гидробионты, что может свидетельствовать об аккумуляции в пене и нейстали вредных для живых организмов веществ.

1.6. Эпинеuston и зоонейстон

Уточнено представление о структуре нейстона Черного моря, в котором наряду с качественно и количественно разнообразным и богатым гипонейстоном присутствует эпинеuston. Он состоит не только из обитателей морской пены (бактерий, одноклеточных водорослей и простейших, что было известно (Зайцев, 1970а)) и грибов, но также из насекомых вида *Clunio ponticus* (Зайцев, Нарчук, 1995). Это мелкое двукрылое с длиной тела 1,1—1,5 мм ведет водно-воздушный образ жизни: бескрылые самки и личинки живут в воде, а крылатые самцы — на ее поверхности, в основном в защищенных от ветра заливах и бухтах. Численность самцов достигает 300—500 экз. • м⁻². Было замечено, что ими питаются гипонейстонные личинки и мальки рыб, в частности атерины.

Использование оригинальных орудий сбора нейстона — многоярусных планктонно-нейстонных сетей (Зайцев, 1961) — показало, что многие виды беспозвоночных, которые в уловах обычных планктонных сетей встречались периодически и на этом основании относились к разряду редких, на самом деле являются массовыми обитателями нейстали. К их числу принадлежат в первую очередь виды семейства Pontellidae (Copepoda), а также личиночные стадии развития (зоа и мегалопа) десятиногих ракообразных. Это позволило глубже изучить биологию, экологию и распространение таких организмов.

На основании сборов нейстона в Черном и Средиземном морях был проанализирован видовой состав понтеллид в различных условиях обитания. В Средиземном море обнаружено 11 видов этого семейства, в Мраморном — 5, в Черном — 3, в Азовском море — 1 вид (Зайцев, Зелезинская, 1976). В нейстоне Каспийского моря понтеллиды не обнаружены (Зайцев, 1970а).

Сравнение морфологических характеристик 2 видов понтеллид — *Pontella mediterranea* и *Anomalocera patersoni* — установило, что их средиземноморская и черноморская популяции достоверно отличаются по многим морфологическим признакам. Эти различия обусловлены разными условиями обитания (Зайцев и др., 1979).

В результате большого количества измерений впервые определена индивидуальная биомасса *A. patersoni* и уточнена биомасса *P. mediterranea* из Черного моря (Зайцев и др., 1962).

На основании изучения проб нейстона Ю.Н. Макаров (1976) собрал личинки 11 видов крабов Черного моря и уточнил их морфологические характеристики.

В состав нейстона на ранних этапах онтогенеза входят представители практически всех жизненных форм гидробионтов. Поэтому по состоянию

нейстона, населяющего одну из наиболее характерных экологически критических зон моря (Зайцев, Поликарпов, 2002), можно с достаточной достоверностью судить о состоянии всей морской экосистемы и ее изменениях во времени. Этот факт подтверждает многолетний мониторинг зоонейстона СЗЧМ.

Материалом для анализа данных о развитии зоонейстона, полученных после опубликования монографии «Биология северо-западной части Черного моря» (1967), послужили пробы, собранные во время береговых исследований в Одесском заливе и экспедиций с борта исследовательских судов на протяжении 1970—1995 гг. Сбор проб осуществляли с помощью нейстонной либо двухъярусной планктонно-нейстонной сети (ПНС-2) конструкции Ю.П. Зайцева. Площадь входного отверстия сети $0,12 \text{ м}^2$, диаметр ячеек сетного полотна (газа мельничного) 100 мкм (Зайцев, 1970).

Количественные сборы более крупных и подвижных обитателей приповерхностного слоя моря, в частности эвгипонейстонных рачков семейства Pontellidae, а также медузы *Aurelia aurita* проводили с помощью полупогруженного мальково-нейстонного трала (МНТ) Ю.П. Зайцева (площадь входного отверстия с учетом облавливаемого слоя $0,2 \text{ м}^2$). Для выяснения особенностей пространственного распределения планктона сборы нейстона сопоставляли с результатами изучения зоопланктона, полученными с помощью сети Джеди вертикального лова со стандартного горизонта $0\text{—}10 \text{ м}$. Учет медуз в верхнем 10-метровом слое моря осуществляли с помощью иктиопланктонной сети вертикального лова ИКС-80 конструкции Т.С. Паса (площадь входного отверстия $0,5 \text{ м}^2$).

При изучении особенностей распределения медуз общий объем воды, облавливавшийся ИКС-80 на каждой станции, с учетом опускания сети на глубину Юм, составил 50 м^3 . При стандартных размерах МНТ (большая и малая оси эллипса равны 100 и 50 см), средней скорости циркуляции судна $2 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ и продолжительности лова 5 мин средний объем облавливаемой воды равнялся 156 м^3 . Данные характеристики учитывались при определении средней концентрации медуз на исследуемых станциях. Для этого указанными сетями было произведено 17 параллельных ловов на 17 станциях. В отобранных пробах учитывали общее количество пойманных медуз, измеряли диаметр их колокола (510 особей) и определяли сырую массу.

Всего за период исследований было обработано 917 проб зоонейстона, собранных на 834 станциях (табл. П. 1.7).

Изучение пространственного распределения нейстона полностью подтвердило ранее установленный факт количественного обеднения пелагического сообщества в приповерхностном слое в районе взаимодействия речных и морских вод (Зайцев, 1967). За редким исключением, морские планктонные беспозвоночные избегали поверхностного микрослоя в опресненном Приднепровско-Бугском приустьевом районе (табл. П. 1.8).

Кроме этого, был подтвержден и факт невысокой интенсивности развития организмов нейстона в прибрежной зоне моря, что отражалось как на уровне разнообразия таксономического состава, так и на общей численности. Изучение нейстона возле Одессы (полоса прибрежного мелководья шириной до 1 км) в тепловодный период — с июня по октябрь в 1980-х годах — по-



ТАБЛИЦА II. 17. Объем собранного материала по зоонейстону

Год	Дата	Судно	Номер рейса	Количество станций (проб)	Объект исследований
1970	VIII—IX	«Миклухо-Маклай»	47	67	Зоонейстон (0—5 см)
1974	15. VIII-29. IX	То же	63	66	То же
1978	11. VII-25. IX	»	86	57	»
				50	Зоопланктон (0—10 м)
1979	VI-VII	»	90	30	Зоонейстон (0—5 см)
				24	Зоопланктон (0—10 м)
1980	24. VI-07. VIII	»	97	24	Зоонейстон (0—5 см)
				53	МНТ — рачки семейства Pontellidae
				26	Зоопланктон (0—10 м)
	04. X-18. XI	»	101	49	МНТ — рачки семейства Pontellidae
1981	07-28. 11	«Гидронавт»	1/81	37	То же
	IV-X	Одесский залив *		3(16)	Зоонейстон (0—5 см; 5-25 см)
	20. V-9. VI	«Миклухо-Маклай»	103	24	МНТ — рачки семейства Pontellidae
1982	10. X-24. XI	То же	105	26	То же
	IV—VIII	Одесский залив *		2(14)	Зоонейстон (0—5 см; 5—25 см)
	29. VII-03. IX	«Миклухо-Маклай»	109	53	МНТ — рачки семейства Pontellidae
	07. X-21. XI	То же	111	40	То же
				29(46)	МНТ, ИКС - медузы Aurelia
1983	I—IV	Одесский залив *		2(26)	Зоонейстон (0—5 см; 5-25 см)
	IX-X	«Миклухо-Маклай»	116	24(36)	МНТ, ИКС - медузы Aurelia
1986	12. VII-17. VIII	То же	125	5(10)	Зоонейстон (0—5 см)
				36	Зоопланктон (0—10 м)
1991	07-30. IX	«Георгий Ушаков»	59-А	28	Зоонейстон (0—5 см)
1992	04-27. VII	«Эрнст Кренкель»	57	17	То же
1993	14. IX—10. X	«Виктор Бугаев»	157	26	»
1995	18. VII-01. VIII	«Профессор Водяницкий»	46	18	»
				18	Зоопланктон (0—10 м)

Примечание. НИС «Миклухэ-Маклай» (ОФ ИнБЮМ); РТС/ «Гидронавт» (Севастопольское специальное экспериментальное флота по подводным исследованиям); НИС «Георгий Ушаков», «Эрнст Кренкель», «Виктор Бугаев» (Украинский научный центр экологии моря); НИС «Профессор Водяницкий» (Институт биологии южных морей); МНТ — мальково-нейстонный трал; ИКС — икорная сеть. Звездочкой обозначены сборы нейстона в бассейнах гидротехнических сооружений Одесского залива (пляжи «Чкаловский», «Дельфин» и «Биосганция»).

казало, что несмотря на скопление зоопланктона в приповерхностном микрослое 0—5 см в 71 % случаев, ни один из обнаруженных в прибрежной зоне видов не показал достоверного преобладания в нейстале. Соот-

ТАБЛИЦА П. 1.8. Характеристика зоопланктона в нейстали и субнейстали Приднепровско-Бугского приустьевых района Черного моря в июле 1986 г. (по материалам Б.Г. Александрова и Л.Н. Полищука)

Таксон	Численность нейстона, экз. • \Gamma ²	Соотношение численности, н/с *
Rotatoria	7290 ± 1741	0,18
<i>Synchaeta</i> sp.	1118 ± 786	1118,00
<i>Brachionus</i> sp.	864 ± 334	0,07
<i>Asplanchna priodonta</i>	5244 ± 1160	0,16
<i>Filinia longiseta</i>	50 ± 27	36,20
Tintinnoinea	1 ± 0	0,60
Copepoda	15 922 ± 1528	0,30
<i>Heterocope caspia</i>	14 254 ± 1539	0,28
<i>Eurytemora affinis</i>	1518 ± 647	1,86
<i>Diaptomus</i> sp.	2 ± 2	2,40
<i>Acartia clausi</i>	148 ± 54	48,21
Cladoceera	606 ± 153	0,12
<i>Daphnia longispina</i>	5 ± 4	0,04
<i>Bosmina longirostris</i>	218 ± 117	218,00
<i>Podonevadne trigona</i>	331 ± 128	0,07
<i>Cornigerius maeoticus</i>	18 ± 9	1,08
<i>Cercopagis pengoi</i>	32 ± 10	0,11
<i>Leptodora kindii</i>	3 ± 1	0,21
<i>Pleopis polyphaemoides</i>	1 ± 0	0,00
Bivalvia, личинки	3964 ± 1574	0,16
Varia	1 ± 0	0,35
В с е г о	51 588 ± 6670	

* Соотношение численности нейстона субнейстали.

ношение численности планктона в нейстали и субнейстали составило $1,17 \pm 0,17$, а общая численность нейстона — 4800 ± 2600 экз. • м⁻³, что более чем в 5 раз ниже, чем в среднем для районов СЗЧМ, изучавшихся с борта исследовательских судов.

Основные тенденции многолетних изменений развития нейстона в тепловодный период прежде всего были связаны с последовательным сокращением общей численности пелагических беспозвоночных (экз. • м⁻³), развивавшимся поэтапно:

I 1961-1978 гг. - 46400 ± 3700 ,

II 1979-1980 гг. - 25200 ± 2000 ,

III 1991-1995 гг. - 7200 ± 1200 .

Более чем шестикратное снижение численности зоонейстона произошло за счет копепод, количество которых уменьшилось в 14 раз. Прежде всего это многочисленные ранее *Oithona minuta*, *Paracalanus parvus*, *Centropages ponticus* и наиболее характерные ракообразные нейстали — веслоногие рачки семейства Pontellidae. Еще одним структурным компонентом сообщества, сократившим свою численность, стали пелагические личинки донных беспозвоночных. Семикратное уменьшение количества меропланктона произошло главным образом за счет двустворчатых и брюхоногих моллюс-



ТАБЛИЦА II. 1.9. Многолетняя динамика количественног> развития беспозвоноч
Б.Г. Александрова

Таксон	Дата				
	IX-X 1961	VIII 1962	VII-VIII 1963	VII—VIII 1965	VIII—IX 1970
<i>Noctiluca scintillans</i>	1268	1223	4863	7833	24
<i>Synchaeta</i> sp.	0	0	0	50	63
Tintinoinea	9	?	9	9	488
<i>Oikopleura dioica</i>	2044	1096	665	250	1301
<i>Sagitta setosa</i>	1118	312	378	348	1190
Copepoda	22 487	25 767	16 485	13 170	43 295
<i>Pontella mediterranea</i>	9	?	?	?	619
<i>Anomalocera patersoni</i>	9	?	9	9	0
<i>Centropages ponticus</i>	39	2188	2251	2046	4749
<i>Oithona minuta</i>	13 309	15 687	6909	4629	35 156
<i>Acartia clausi</i>	972	836	2199	4622	1712
<i>Paracalanus parvus</i>	8167	7056	5126	1873	1059
Cladocera	1661	3262	8105	2410	6269
<i>Penilia avirostris</i>	1082	2458	6796	1730	4691
<i>Pleopis tergestina</i>	347	163	479	189	829
<i>Evadne spinifera</i>	232	641	830	491	723
<i>Pleopis polyphemoides</i>	?	9	9	9	26
Meroplankton	2995	6021	8301	11 012	16 788
Lameilibranchia, личинки	2633	4981	3777	9069	16 405
Gastropoda, личинки	72	77	568	1307	353
Polychaeta, личинки	184	156	181	221	13
Brzozoa, личинки	5	137	69	150	3
Cirripedia, личинки	101	670	3706	265	14
Decapoda, личинки	9	?	9	?	0
Pisces, икра	?	9	?	9	0
Varia	9	9	9	9	164
В с е г о	35 116	39 419	39 720	37 427	69 256

Примечание. (?) — отсутствие количественной информации об организ>лах выделенных групп, 0 — бес

ков, что, скорее всего, было связано с деградацией их родительских популяций в результате антропогенной эвтрофикации моря и ее последствий. Наконец, еще одним характерным показателем изменения трофических условий в нейстали стало практически полное исчезновение планктонного хищника *Sagitta setosa*, численность которой снизилась более чем в 50 раз.

Однако не все организмы отреагировали на эвтрофирование негативно. Наряду с интенсивным развитием ночесветки *Noctiluca scintillans* с миксотрофным питанием, являющейся индикатором эвтрофирования (Александров, Берлинский, 1982; Зайцев и др., 1988), в нейстали возросла численность личинок полихет, родительские особи которых предпочитают заиленное дно и выдерживают снижение содержания кислорода в придонном слое (табл. II. 1.9).

Характеризуя пространственное распределение нейстона в западной половине Черного моря, наравне с общей тенденцией снижения его количественных показателей развития вследствие эвтрофирования, следует от-

ных в нейстали СЗЧМ в тепловодный (июнь-октябрь) период (по материалам и Л.Н. Полищука)

VIII-IX 1974	VII-VIII 1978	VI-VII 1979	VI-VII 1980	IX 1991	VII 1992	IX-X 1993	VII-VIII 1995
10 273	16 559	13 232	16 646	5808	8	660	2135
55	19 167	1492	128	587	0	511	1126
1776	1099	201	13	16	2571	94	42
1319	445	462	201	19	379	251	22
1012	46	88	23	1	10	8	2
27 920	5482	7713	1504	1421	979	589	2856
102	242	7	3	0	0	0	0
0	26	0	2	0	25	0	0
253	28	63	34	27	56	0	0
20 901	1404	3712	588	0	0	3	37
4876	3557	3916	236	1359	822	568	2818
1788	225	15	641	35	76	18	1
3732	6098	1674	1302	172	3128	88	1139
3379	416	16	2	9	0	83	871
10	8	44	7	0	0	0	19
90	119	260	175	0	0	0	46
253	5555	1354	1118	163	3128	5	203
4080	4570	2243	2030	1008	346	166	2483
2815	3864	726	1672	89	112	42	102
123	89	41	20	13	10	11	24
713	164	537	42	521	217	101	677
19	4	10	0	0	0	0	0
410	438	928	294	385	2	12	1668
0	11	1	2	0	0	0	0
0	0	0	0	0	5	0	12
104	97	886	635	19	9	12	40
50 269	53 561	27 993	22 472	9050	7429	2377	9846

позвоночные не выявлены I.

метить преимущественное развитие в приповерхностном слое ряда организмов. Прежде всего это касается личинок донных беспозвоночных, главным образом полихет и брюхоногих моллюсков (рис. II. 1.1), численность которых в шельфовой зоне может в несколько десятков раз превышать таковую в открытых районах моря.

Среди планктонных ракообразных ветвистоусые и веслоногие проявляют противоположные тенденции к пространственному распределению в нейстали. Если первые значительно преобладают в СЗЧМ по сравнению с открытыми районами западной половины моря, то преимущественное развитие копепод в шельфовой зоне моря было отмечено лишь в 1980 г. (рис. II.1.2).

Сопоставление особенностей распределения планктонных организмов в нейстали и верхнем 10-метровом слое моря показало абсолютное доминирование беспозвоночных в нейстали как СЗЧМ, так и открытых районов западной половины Черного моря. При этом зафиксировано незначитель-

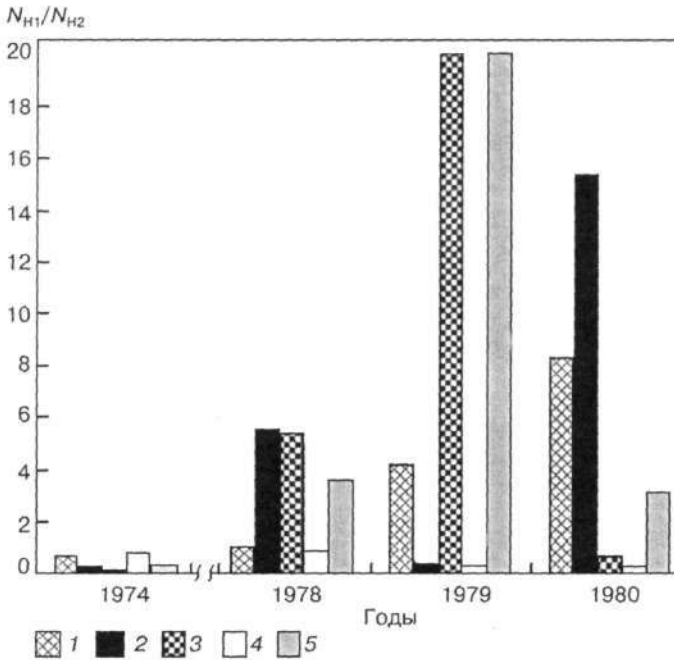
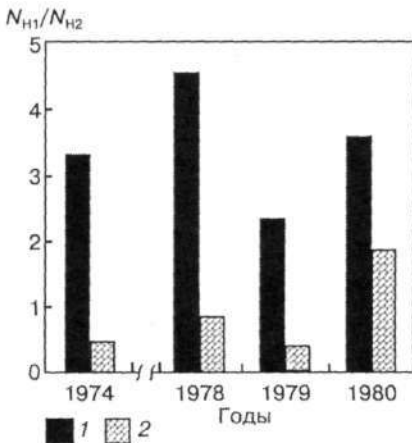


РИС. 11.1.1. Соотношение средней численности некоторых представителей меропланктона в нейстали северо-западной (N_{H1}) и западной (N_{H2}) частей Черного моря:
1 — Cirripedia; 2 — Bivalvia; 3 — Gastropoda; 4 — Decapoda; 5 — Polychaeta

ное выравнивание вертикальной структуры и проявление большей хаотичности распределения беспозвоночных, ранее тяготевших к приповерхностному микрогоризонту. Выявлена четкая закономерность снижения концентрации организмов в нейстали, хотя в 1995 г. уже наметились некоторые тенденции реабилитации экосистемы северо-западного шельфа, а именно: в нейстали возросла относительная и абсолютная численность копепоид и личинок донных беспозвоночных, составляющих меропланктон (табл. II. 1.9, П. 1.10).



С развитием нейстона связано распределение одного из основных потребителей зоопланктона — хищной медузы *A. aurita*. Ранее проведенные исследования показали, что черноморская популяция аурелии предпочитает пониженную температуру и редко встречается у поверхности моря в нейстали (Зайцев, Полищук, 1983), но несмотря на это она может служить индикатором распределения планктона, которым питается, в том числе и ней-

РИС. 11.1.2. Соотношение средней численности Cladocera (1) и Copepoda (2) в нейстали северо-западной и западной частей Черного моря

ТАБЛИЦА II. 1.10. Многолетняя динамика численности планктонных беспозвоночных в открытых районах западной части Черного моря (по материалам Б.Г. Александрова и Л.Н. Полищука)

Таксон	1978		1979		1980		1995	Средняя численность
	СЗЧМ	ЗП*	СЗЧМ	ЗП	СЗЧМ	ЗП	СЗЧМ	
<i>Noctiluca scintillans</i>	5	3	4	0,2	0,8	0,5	0,1	2 ± 1
Tintinninea	160	346	153	60	0,1	0,1	43,4	109 ± 36
Rotatoria	437	432	959	1,0	0,1	0,01	10,5	263 ± 112
<i>Pleopis polyphemoides</i>	849	61	68	17	1,0	31,1	2,4	147 + 76
<i>Penilia avirostris</i>	6	9	9	8	1,0	0,5	1,4	5 ± 1
Evadne	3	13	0,3	50	7,4	0,8	1,4	11 ± 4
Cladocera	161	36	46	42	0,9	1,2	1,5	41 ± 14
Pontellidae	2	307	2	19	4,9	7,4	1,0	49 ± 28
<i>Centropages ponticus</i>	39	14	29	111	1,3	0,3	0,6	28 ± 10
<i>Acartia clausi</i>	49	42	112	53	0,3	0,02	4,4	37 ± 12
<i>Oithona minuta</i>	62	65	34	185	0,1	0,1	1,0	50 + 18
<i>Paracalanus parvus</i>	20	29	2	0,7	1,0	0,04	0,1	7 ± 4
Copepoda	53	47	65	91	0,3	0,1	3,3	37 + 12
<i>Oikopleura dioica</i>	19	24	34	44	0,05	0,3	0,1	18 ± 6
<i>Sagitta setosa</i>	2	3	0,8	13	0,4	0,2	0,2	3 ± 1
Balanus, личинки	3	43	58	307	3,9	0,1	27,6	63 + 26
Bivalvia, личинки	1970	255	63	479	5,0	1,8	1,5	397 ± 179
Gastropoda, личинки	84	25	20	1,0	0,2	1,1	0,5	19 + 8
Decapoda, личинки	7	6	1,0	4	1,0	0,9	0,7	3 ± 1
Polychaeta, личинки	67	5	16	2	0,1	0,2	1,7	13 ± 6
Meroplankton	978	59	33	281	2,2	0,4	4,3	194 ± 94
Varia	12	2	30	55	41,4	8,2	1,8	22 ± 7
В с е г о	13	9	6	18	0,7	0,2	0,5	7 ± 2

* Западная часть Черного моря.

ТАБЛИЦА II. 1.11. Сравнительная характеристика медуз *Jiurelia aurita* E нейстали и верхнем (10 м) слое водной толщи в октябре—ноябре 1982-1983 гг. (по материалам Л.Н. Полищука)

Показатель	Среднее абсолютное значение в нейстали	Средняя разность значений в нейстали и верхнем слое	Ошибка средней разности »
Численность, экз. • \(\Gamma^3\)	0,12 ± 0,02	-0,09	0,04
Диаметр колокола, мм	93,0 ± 7,0	2,58	6,84
Сырая масса, г	31,7 ± 4,4	9,97	3,98

* Критическое значение /-критерия Стьюдента при $n = 17$ составляет 2,92 для 1%-го уровня значимости ($P > 0,99$).

стона. В частности, возможно в результате эвтрофирования, вызвавшего перераспределение объектов питания медуз, ее встречаемость в нейстали возросла с 1-2 % в 1960-х годах до 73-89 % в 1970-х (Зайцев, Полищук, 1983).

Анализ результатов распределения аурелии, полученных в период вспышки ее развития и наиболее интенсивного изучения нейстона в 1975—1980 гг.



(Zaitsev, 1993), выявил достоверное ($P > 0,99$) преобладание в нейстали более крупных медуз, средняя масса которых оказалась примерно на 10 г выше, чем у особей, пойманных в слое 0—10 м (табл. II. 1.11). Данное обстоятельство служит еще одним подтверждением значимости нейстали как зоны концентрации жизни в море.

Несмотря на то что нейсталь в среднем содержала в 1,75 раза меньше медуз, чем верхний 10-метровый слой, в результате преобладания у поверхности более крупных особей биомасса *A. aurita* была распределена практически равномерно, 3,80 и 3,78 г · м⁻³ соответственно. Возможным объяснением этого факта является отмечавшаяся выше тенденция к вертикальному перераспределению зоопланктона вследствие эвтрофирования и отсутствие резко выраженных максимумов его развития в приповерхностном слое 0-5 см.

1.7. Ихтионейстон

В ходе нейстонологических исследований были выяснены основные особенности размножения кефалей в Черном море (Зайцев, 1960; Бабаян, Зайцев, 1964), включая аблиторальные миграции производителей на нерест, развитие икры в нейстали открытых вод и адлиторальные миграции мальков к местам нагула. Также были обнаружены личинки и мальки кефалей на пути их передвижения к берегу, т. е. до того, как они в большом количестве появляются в приурезовой полосе и начинают вдольбереговые миграции в лиманы и лагуны. На рис. II. 1.3 видно, как по мере увеличения длины тела уменьшается относительная длина головы. Это общее правило, но на мальках кефали оно еще не было подтверждено.

Подошедшие к местам нагула мальки сингиля имеют более крупные размеры, как показано на рис. II. 1.4.

Большой объем новой информации о мальках кефалей сингиля, остроноса и лобана у берегов СЗЧМ, Крыма и Кавказа получил М.Я. Савчук (1968, 1969, 1973). Он определил направления вдольбереговых миграций маль-

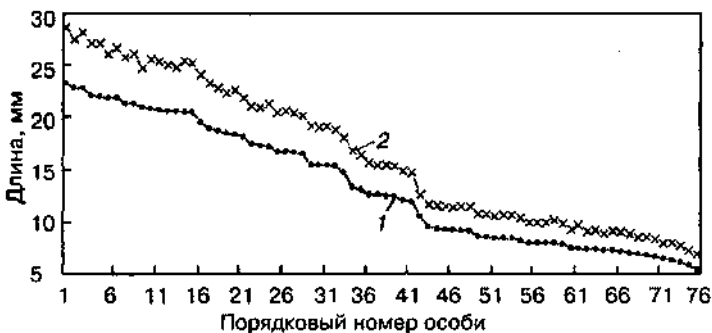


РИС. II. 1.3. Морфометрические характеристики ранних мальков остроноса (*Liza saliens*, 1) и лобана (*Mugil cephalus*, 2) в нейстонный период их жизни до подхода к берегам (по уловам МНТ в СЗЧМ в августе 1965 г. и материалам Ю.П. Зайцева и Н.С. Чиликиной)



Рис. II.1.4. Размеры мальков сингиля *Liza aurata* у входа в Будакский лиман (1, по материалам Ю.П. Зайцева и Б.Г. Александрова) и в прибрежной полосе моря (2)

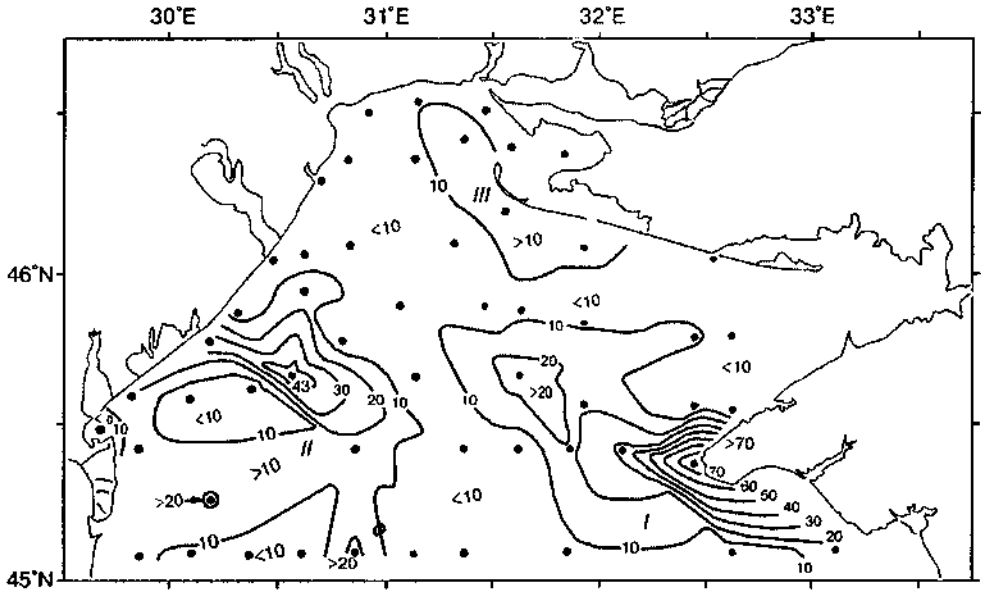


Рис. II.1.5. Икhtiопланктонейстонный комплекс в СЗЧМ

ков, их видовой состав, количество и некоторые особенности экологии на местах нагула и зимовки.

А.К. Виноградов (1969) экспериментально установил, что гипонейстонное положение личинок черноморских рыб наилучшим образом обеспечивает возможность первичного заполнения их плавательных пузырей атмосферным воздухом. Сам факт использования личинками рыб атмосферного воздуха по литературным источникам был известен, но для черноморских видов он подтвержден впервые.

На основании многолетних данных А. Г. Цокур построил карту распределения «икhtiопланктонейстонного комплекса» (совокупности преимущественно раннеонтогенетических стадий рыб в слое 0–25 см, собранных МНТ) в СЗЧМ, на которой достаточно отчетливо видны три района повышенного скопления икринок и личинок рыб (рис. II. 1.5).

Скопления наблюдаются возле Тарханкутского п-ова, о-ва Тендровская Коса и Дунай-Днестровского междуречья. Выявленный характер распределения ранних стадий развития рыб А.Г. Цокур связывает с циклоническими и антициклоническими круговоротами водных масс в северо-западном регионе моря. Такой подход представляется вполне правомерным, ибо известно, что распределение как планктона в целом, так и пелагических икринок и личинок рыб отражает систему действующих в пелагиали течений. Например, по сборам *Calanus finmarchicus*, полученных с помощью «непрерывного регистратора планктона» в Северной Атлантике, судят о прохождении холодных течений и вероятности встречи судов с айсбергами.

1.8. Морская нейстонология за рубежом

Приступая к исследованиям морского нейстона, зарубежные ученые ссылаются на приоритетные работы в этой области, выполненные в ОФ ИнБЮМ с использованием предложенной методики. Р.П. Виллис (Willis, 1963), изучая пелагических фораминифер в водах Новой Зеландии, обнаружил на поверхности пелагиали тот же комплекс организмов, что и the hyponeuston of Zaitsev, выявленный на поверхности Черного моря.

Г. Трегубов (Tregouboff, 1963), сотрудник зоологической станции в Вильфранше (Франция), выявил в пробах гипонейстона Средиземного моря высокую концентрацию ветвистоусых ракообразных.

С помощью трехъярусной сети, построенной по образцу ПНС-3 Зайцева, П.М. Девид (David, 1956), сотрудник Национального института океанографии (Англия), изучал в Индийском океане приповерхностные организмы, которые могут служить пищей птицам, и обнаружил большое видовое разнообразие и высокую численность организмов гипо- и эпинеястона. Выполненные им цветные фотографии прекрасно передают характер пигментации нейстонтов и некоторые особенности их поведения.

М. Спеки (Specchi, 1966) из Института сравнительной зоологии и анатомии в Триесте (Италия) сообщает об исключительно высоких концентрациях личинок десятиногих раков на поверхности Триестского залива. Свои работы автор проводил с помощью пятиярусной планктонно-нейстонной сети ПНС-5 конструкции Зайцева.

Развитие морского и океанического нейстона в условиях эвтрофикации и химического загрязнения поверхности пелагиали изучали Дж. Харди и соавт. (Hardy et al., 1997). Отмечены, в частности, высокие концентрации, которые в океаническом ПМС образуют перидиниевые водоросли *Pterocentrum micans* и синезеленые водоросли рода *Trichodesmium*. Авторы предлагают в целях экологического мониторинга начать глобальный «нейстонный дозор» (Neuston watch), аналогичный уже проводящемуся в морях и океанах «мидийному дозору» (Mussel watch) (Hardy et al., 1997; Zaitsev, 1997).

Значительный объем исследований организмов микронейстона (бактерий, одноклеточных водорослей, грибов) и условий их обитания в Атлантическом океане выполнили Дж. Сибурс и соавт. (Sieburth, 1971, 1983; Sieburth et al., 1976) из университета Род-Айленд (США).

Интерес, выходящий за пределы биологии и экологии моря, представляет работа, которую провел Р.Ф. Twitchell из Института военно-морских исследований (США). Он показал, что непрерывные движения жгутиков, ресничек и других органов микроскопических животных и растений нейстона вызывают возмущение поверхностного ламинарного слоя воды. В соответствии с размерами нейстонтов провоцируемые ими волны на поверхности пелагиали измеряются сотыми и тысячными долями миллиметра, однако этого оказывается достаточно для того, чтобы в 3 раза увеличить испарение и газообмен в системе океан—атмосфера (MacIntyre, 1974). Позднее данный аспект функционирования нейстонного сообщества Мирового океана рассматривался на уровне экспертов GESAMP ООН в контексте глобальных экологических изменений (GESAMP, 1995; Liss, Duce, 1997).

Результаты исследований в области морской нейстонологии нашли применение во многих областях науки и практики: при определении характера антропогенных изменений в нейстале, для оценки состояния морской экосистемы и характеристики экологически критических зон моря, составления перечня видов, находящихся в угрожаемом состоянии и нуждающихся в охране, планирования и осуществления других природоохранных мероприятий.