

# УЧЁТ ПРОДУКТИВНОСТИ ФИТОПЛАНКТОНА И ИЗМЕНЧИВОСТИ КОНЦЕНТРАЦИИ БИОГЕНОВ В ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

*В. С. Латуш*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: lee@alpha.mhi.iuf.net

*Выполнен анализ влияния различных факторов на продуктивность фитопланктона в тёплый период года на северо-западном шельфе Чёрного моря. Показано, что основное воздействие на изменчивость первичной продукции оказывает концентрация биогенов. Предложено дифференциальное уравнение для описания пространственно-временной изменчивости концентрации биогенов на шельфовых акваториях, подверженных влиянию речного стока.*

Источниками живого органического вещества, потоки которого вверх по ступеням трофической пирамиды имитируют морские эколого-экономические модели, являются фитопланктон и макрофиты, точнее – процессы фотосинтеза в их организмах. В системе "фитопланктон – кормовой зоопланктон – пелагические рыбы – промысел нелогических рыб", первичным продуцентом биомассы выступает фитопланктон. На изменчивость продуктивности фитопланктона атмосферные процессы влияют через следующие факторы: суммарная солнечная радиация, температура и соленость морской воды, концентрация биогенов, циркуляция вод. Относительное влияние каждого из этих факторов на продуктивность фитопланктона не является постоянным, оно зависит от конкретных экологических условий и может изменяться в широких пределах. Имеющихся натурных данных бывает недостаточно для адаптации сложной модели к условиям определённой акватории. Понимание природы моделируемых процессов и предварительные оценки диапазонов изменения факторов влияния помогают преодолеть эти трудности. После соответствующего расширения системы основных уравнений математической задачи модернизированная модель требует новой её настройки на адекватно-устойчивое функ-

ционирование, когда при вероятном внешнем воздействии на любой компонент системы модель сохраняет значения остальных компонентов в экологически допустимых пределах [1].

Цель данной работы – для использования в пространственных эколого-экономических моделях предложить формализацию продуктивности фитопланктона, адаптированную к изменчивости экологических условий тёплого времени года (ТВГ) на северо-западном шельфе Чёрного моря (СЗШ). Для такой адаптации необходимо, с учётом пространственно-временных масштабов моделирования, выполнить сравнительный анализ процессов и факторов, влияющих на продуктивность фитопланктона в этих условиях.

Под продуктивностью фитопланктона  $p(x, y, z, t)$  будем понимать удельную скорость воспроизводства его биомассы. В общем случае на продуктивность фитопланктона прямое лимитирующее или стимулирующее влияние могут оказывать следующие факторы:  $I(x, y, z, t)$  – солнечная энергия,  $T(x, y, z, t)$ ,  $S(x, y, z, t)$  – температура и солёность морской воды,  $B(x, y, z, t)$  – концентрация биогенов. Косвенное воздействие оказывает циркуляция вод со скоростью  $\vec{W}(x, y, z, t)$ . Итак,

$$p = p_0 [1 + f(I, T, S, B) L_1(P)], \quad (1)$$

где  $P$  – концентрация фитопланктона,  $p_0$  – реперное значение его продуктивности,  $L_1(P)$  – эффект самолимитирования.

Количество световой энергии, поступающей к поверхности моря в единицу времени, зависит от высоты Солнца над горизонтом (то есть от географической широты места и времени года), от характеристик облачности и прозрачности атмосферы. В диапазоне длин световых волн существует участок фотосинтетически активной радиации (ФАР). Продуктивность фитопланктона максимальна при определённых значениях энергии ФАР. Недостаток энергии лимитирует развитие фитопланктона, избыток – угнетает его.

Для оценки потока энергии ФАР на СЗШ в ТВГ использованы данные актинометрических измерений в Одессе [2]. Принимая альbedo равным 0,07 и отношение ФАР к суммарной радиации равным 0,50, получаем для ТВГ среднее значение ФАР на поверхности моря равным 1,29 Дж/см<sup>2</sup> мин.

Фотосинтез максимален при  $\Phi AP = (0,42 - 0,63)$  Дж/см<sup>2</sup> мин, угнетение фотосинтеза светом происходит при  $\Phi AP \geq (0,67-0,84)$  Дж/см<sup>2</sup> мин [3].

В открытой части СЗШ средняя глубина моря равна 35 м. Здесь на глубине 10 м освещенность составляет 30%, а на глубине 15 м — 25% от её значения на поверхности [4]. Летом при типичной экологической обстановке условия для максимального фотосинтеза наблюдаются в слое 7 – 9 м. При прочих равных условиях влияние увеличения или уменьшения  $\Phi AP$  на первичное продуцирование биомассы сглаживается соответствующими активными изменениями глубины залегания этого слоя.

Оценки влияния облачности на суммарную солнечную радиацию выполнены по известным эмпирическим формулам [5]. В ТВГ на СЗШ преобладают облака вертикального развития, при которых пятибалльная облачность ослабляет радиацию на 20%, десятибалльная — на 70%. В течение лета среднемесячная общая облачность уменьшается с 4,4 до 2,2 балла, нижняя — с 2,8 до 1,6 балла. Межгодовые колебания освещенности, вызванные изменениями среднемесячной облачности на  $\pm 2$  балла, не могут существенным образом повлиять на фотосинтез. На толщину фотического слоя и структуру светового потока в нём сильно влияют заморы, но они требуют специального моделирования и в данной работе не рассматриваются.

На СЗШ соленость изменяется в пределах от 5 до 18‰. Влияние такой изменчивости на продуктивность фитопланктона можно не учитывать, поскольку к ней приспособлены развивающиеся здесь многочисленные виды эвригалинных диатомовых водорослей [4].

Изменчивость температуры морской воды отражает особенности теплового баланса акватории СЗШ и потому зависит от истории развития гидрометеорологических процессов в бассейне Чёрного моря. Ниже будет показано, от чего зависит температура морской воды весной и как она влияет на продуктивность фитопланктона летом.

Биогены в фотический слой поступают с речными водами, при зимней конвективной циркуляции, которая придонные биогены поднимает к поверхности моря, и в процессе локальной деструкции органического вещества. На крупномасштабную циркуля-

цию вод и адвективный перенос биогенов влияют ветер, речной сток и теплообмен через поверхность моря.

В весенне-летнем ходе численности фитопланктона присутствуют два максимума, чаще — весенний и летний реже, если весеннего цветения фитопланктона не было — два летних максимума. Весной света достаточно и фотический слой обогащен биогенами вследствие зимнего конвективного перемешивания, поэтому начало цветения диатомового фитопланктона зависит от температуры воды и на СЗШ обычно наблюдается в апреле, когда вода прогревается до 7° – 9° С. Более низкая температура лимитирует развитие фитопланктона. Если после холодной зимы температура воды весной находится ниже указанного интервала, время первого цветения фитопланктона сдвигается на начало летнего сезона. Например, в апреле 1962 г, после холодной и штормовой зимы, теплозапас вод на СЗШ был минимальным и не только цветения, фитопланктона, но даже какого-либо увеличения его биомассы не наблюдалось. В этом году первое цветение фитопланктона наступило в июне, когда воды СЗШ достаточно прогрелись [6], а ставрида и анчоус уже вернулись с зимовки на основную акваторию их нагула и нереста. Таким путём теплозапас и температура воды в предшествующие месяцы влияют на сроки первого цветения фитопланктона. Второе цветение фитопланктона в 1962 г. наблюдалось в августе.

После первого цветения фитопланктона запас биогенов над пикноклином в открытой части СЗШ значительно сокращается. Пополнение этого запаса происходит в результате деструкции органического вещества и, главным образом, за счет поступления биогенов с речными водами, особенно после паводка. Биогены речного стока переносятся на юго-запад постоянным прибрежным течением, вдоль восточной границы которого протянулся плотностной гидрологический фронт. В центральную часть СЗШ биогены поступают при развитии ветровых течений восточного октанта, когда происходит разрыв гидрологического фронта [7]. Сила и повторяемость соответствующих ветров через концентрацию биогенов сильно влияют на изменчивость первичного продуцирования биомассы на открытой акватории СЗШ в ТВГ. В штиле-

вую погоду на этой акватории наблюдаются слабые течения западной четверти. Воды этих течений отличаются большей солёностью и меньшим содержанием биогенов.

Из проведенного анализа следует, что основным фактором, влияющим на продуктивность фитопланктона в ТВГ, является концентрация биогенов. Источниками пополнения запаса биогенов в фотическом слое служат локальные процессы деструкции органического вещества и перенос биогенов речного стока восточными ветровыми течениями. Влияние биогенов речного стока является преобладающим, и среднегодовая биомасса фитопланктона зависит от годового стока рек. Температура воды только в начале ТВГ существенно влияет на временную изменчивость продуктивности фитопланктона. Это влияние косвенно сказывается на первичном продуцировании биомассы летом и может быть учтено через начальные и граничные условия.

Биогенами называют растворённые в воде минеральные вещества (соединения азота, фосфора и других химических элементов), необходимые для развития фитопланктона и макрофитов. При подробной имитации жизнедеятельности фитопланктона и соответствующих потоков основных биогенов разрабатываются численные модели высокого разрешения (100 м по горизонтали, 1 м по вертикали, 1 час по времени). Если моделируются крупномасштабные экологические процессы, такая детализация неприемлема из-за быстрого накопления ошибок интегрирования [8]. Поэтому при разработке морских эколого-экономических моделей целесообразно значительно увеличить размеры вычислительной сетки и под "концентрацией биогенов" понимать удельное содержание в морской воде смеси химических соединений, состав и соотношение ингредиентов которой отвечают жизненным потребностям фитопланктона. Тогда не содержание в воде отдельного соединения, а "концентрация биогенов" является комплексным императивным ресурсом для фитопланктона. При прочих равных условиях, вдали от источников интенсивной антропогенной эвтрофикации вод, продуктивность фитопланктона пропорциональна концентрации биогенов.

Верхняя граница пикноклина летом находится на глубине  $h \sim 20$  м. От поверхно-

сти моря до этой глубины в середине лета концентрация биогенов незначительно возрастает, а температура воды понижается от 23–25°C до 11–17°C. Биомасса фитопланктона имеет небольшой промежуточный максимум в слое оптимальной интенсивности ФАР и минимум – над пикноклином, где ФАР уменьшается втрое. Пикноклин препятствует поступлению биогенов из слоя придонных вод в основную часть фотического слоя, где сосредоточены главный продукционный потенциал фитопланктона, а также почти вся биомасса зоопланктона и теплолюбивых пелагических рыб.

Проведенный анализ показал, что при моделировании крупномасштабных экологических процессов на акватории СЗП в ТВГ целесообразно рассматривать временную изменчивость горизонтальной структуры характеристик, осреднённых по вертикали в пределах верхнего слоя постоянной глубины  $h$ . Исследование короткопериодной изменчивости вертикальной структуры фитоценоза представляет самостоятельный интерес. Включение соответствующего блока в эколого-экономическую модель сильно затруднит решение математической задачи и многократно увеличит ошибки моделирования [8, 9].

В дифференциальном уравнении для имитации пространственно-временной изменчивости удельной концентрации биогенов на определённой акватории следует учесть все основные приходные и расходные статьи их бюджета, а также перенос биогенов течениями. Эти факторы учтены нами в следующем уравнении:

$$\frac{\partial B}{\partial t} = r_h \bar{D} - (c_{bp} P + c_{bm} \bar{M}) B + (\vec{\nabla} v - \bar{u}) \vec{\nabla} B + \nu \Delta B, \quad (2)$$

где  $B(x, y, t)$  – концентрация биогенов,  $P(x, y, t)$  – концентрация фитопланктона,  $\bar{D}$ ,  $\bar{M}$  – средние концентрации детрита и макрофитов,  $c_{bp}$ ,  $c_{bm}$  – удельные скорости потребления биогенов фитопланктоном и макрофитами,  $v(x, y, t)$  – коэффициент горизонтального турбулентного перемешивания,  $\bar{u}(x, y, t)$  – сумма скоростей постоянного и ветрового течений,  $\vec{\nabla}$  – оператор градиента,  $\Delta$  – оператор Лапласа.

Детрит медленно оседает на дно. Регенерация биогенов происходит и во время

оседания ( $r_h \bar{D}$ ) и, в основном, при разложении детрита в придонном слое вод. Зимой конвективная циркуляция разрушает пикноклин и выносит накопившиеся у дна биогены к поверхности моря. При решении уравнения (2) этот запас биогенов учитывается начальным условием  $B(x, y, 0) = B_0(x, y)$ .

С началом весеннего прогрева моря формируется и постепенно заглубляется пикноклин, в приповерхностном слое прогретых вод бурно развивается фитопланктон, запас биогенов уменьшается. Основным источником поступления биогенов в этот слой становится речной сток. Этот адвективный поток биогенов зависит от градиента их концентрации на границах  $[\vec{\nabla} B(x, y, t)]$ , и скорости течений на всей акватории  $\vec{u}(x, y, t)$ . Суммарный эффект подсеточной адвекции биогенов параметризован коэффициентом горизонтального турбулентного перемешивания,

$$v(x, y, t) = v_0(x, y, t) + v_c(x, y, t) + v_d(x, y, t), \quad (3)$$

где через слагаемые  $v_0$ ,  $v_c$ ,  $v_d$  обозначены вклады фонового течения, процессов кросс-фронтального водообмена и ветрового течения в суммарный эффект виртуальной диффузии. Изменчивость величины  $v_d(x, y, t)$  известным образом зависит от изменчивости параметров ветрового течения [10].

На открытой акватории СЗШ в ТВГ фоновое течение отличается малой изменчивостью, со скоростью около 5 см/с оно переносит примеси на запад. В маловетренную погоду кроссфронтальный водообмен расширяет полосу высокой продуктивности фитопланктона вдоль западной границы акватории. При умеренных и сильных ветрах юго-западной четверти, когда происходит разрыв фронтальной зоны и богатые биогенами речного стока прибрежные воды распространяются далеко на восток, горизонтальное турбулентное перемешивание резко усиливается.

Использование уравнения (2) в эколого-экономических моделях позволит сделать очередной шаг в повышении их адекватности. Ближайшей задачей является прямой учёт рыбного промысла [11] и изменчивости концентрации биогенов в пространственной динамической модели системы "биогены – фитопланктон – кормовой зоопланктон – анчоус – ставрида – промысел ставриды".

1. В.С.Латун. Эколого-математическая модель системы фитопланктон – зоопланктон – анчоус – ставрида // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: Изд. МГИ НАНУ, 2007. С. 150–155.

2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том IV. Черное море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб.: Гидрометеоздат, 1991. 429 с.

3. З.З.Финенко. Продукция фитопланктона. Действие света на фотосинтез фитопланктона в море // Основы биологической продуктивности Черного моря. Киев: Наук. думка, 1979. С. 93–95.

4. Ю.И.Сорокин. Черное море: Природа, ресурсы. М.: Наука, 1982. 216 с.

5. Н.А.Тимофеев. Радиационный режим океанов. Киев: Наук. думка, 1983. 248 с.

6. В.Н.Еремеев, Е.Ф.Васечкина, Е.М.Игумнова, В.С.Латун, И.Е.Тимченко, В.Д.Ярин. Системное моделирование морских эколого-экономических процессов. – Севастополь: ЭКОСИ – Гидрофизика, 2007. – 420 с.

7. В.Н.Еремеев, В.С.Латун, Е.Е.Совга. Влияние антропогенных загрязнителей и путей их переноса на экологическую обстановку в северо-западном районе Чёрного моря. // Морской гидрофизический журнал, №5, 2001. – С. 41–55.

8. D.C.Gordon, jr., P.R.Boudreau, K.H. Mann et al. Land-ocean interactions in the coastal zone. Reports & studies No. 5. Biogeochemical modeling guidelines. – The Netherlands: IGBP, 1996. – 104 p.

9. В.И.Беляев. Кинетическая теория систем, состоящих из макроскопических частиц и её приложение к задачам экологии. Севастополь, МГИ НАН Украины, 1998. – 236 с.

10. В.А.Иванов, Е.М.Игумнова, В.С.Латун, И.Е.Тимченко. Модели управления ресурсами прибрежной зоны моря. – Севастополь, 2007. – 258 с.

11. В.С.Латун. Учёт рыбного промысла в эколого-экономических моделях // Системы контроля окружающей среды. – Севастополь: Изд. МГИ НАНУ, 2007. С. 147–149.