УДК 581.465

АССИМИЛЯЦИЯ СПУТНИКОВЫХ ДАННЫХ В БИООПТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЧЕРНОГО МОРЯ

А.Б. Федотов

Институт природно-технических систем
г. Севастополь, ул. Ленина, 28
E-mail: fedotov57@mail.ru

В работе предложен алгоритм ассимиляции спутниковых данных о спектральных характеристиках восходящего излучения морской поверхности в модели экосистемы Черного моря. В качестве данных использовались значения спектрального коэффициента яркости моря, полученные после обработки измерений цветового сканера SeaWiFS.

Введение. Спутниковая информация о поверхностных характеристиках моря, таких как температура, значения уровня, данные о цвете моря, широко используется в исследованиях, связанных с изучением состояния Черного моря [1], дает представление о таких динамических явлениях, как поверхностные крупномасштабные и мезомасштабные течения, синоптические вихри и зоны апвеллинга. Значительный объем и периодичность получаемой спутниковой информации, наряду с построением численных экологических моделей, делают ее чрезвычайно важной для построения систем непрерывного контроля состояния экосистемы Черного моря.

Проведенные исследования [2] показали перспективность использования спутниковых данных для определения поверхностной концентрации хлорофилла-«*a*», что позволило, используя феноменологические соотношения между концентрацией хлорофилла-«*a*» и содержанием органического азота в морском фитопланктоне, осуществить оценки поверхностной концентрации фитопланктона без разделения на отдельные компоненты. В то же время фитопланктон является не единственным компонентом морской среды, ответственным за рассеяние и поглощение падающей солнечной радиации и формирование восходящего излучения из верхнего слоя моря в видимом диапазоне спектра.

Представляется важным использование всей доступной информации о рассеивающих и поглощающих свойствах морской среды открытой части Черного моря в совокупности с данными, полученными с использованием многоканального цветового сканера.

Одномерная модель экосистемы Черного моря. Одномерная экологическая модель [1] описывает годовой ход биохимических параметров Черного моря в виде вертикальных профилей концентраций следующих основных девяти компонентов, из которых четыре являются оптически активными, а именно: две компоненты фитопланктона Pf(z) – динофлагелляты; Pd(z) – диатомовые; Dn(z) – растворенное органическое вещество; Pn(z) – взвешенное органическое вещество, и пять компонентов являются оптически неактивными, это: A(z) – аммоний; B(z) – бактериопланктон; две груп-пы зоопланктона Hs(z) – микрозоопланктон; Hl(z) – мезозоопланктон и Ni(z) – совместно описываемые нитраты и нитриты.

Изменение во времени компонентов экосистемы описывается эволюционными уравнениями, в правой части которых стоят члены типа источников-стоков

$$F_i(\mathrm{z,t+\delta t})=\mathrm{F}_i + R\left(\vec{F}(\mathrm{z,t})\delta\mathrm{t}\right), \quad (1)$$

где $F_i(\mathrm{z,t})$ – компоненты экосистемы; $R\left(\vec{F}(\mathrm{z,t})\right)$ – член, описывающий взаимодействие i-ой компоненты экосистемы с другими; $\vec{F}(\mathrm{z,t})$ – вектор с компонентами $F_i(\mathrm{z,t})$.

В качестве начальных условий задавалось равномерное по глубине от 0 до 150 м распределение всех биохимических компонент, на поверхности моря задавались нулевые потоки всех характеристик, на глубине 150 м, соответствующей среднему положению верхней

границы сероводородного слоя, значения всех компонент полагалось равным нулю. Внешнее воздействие в экологической модели задано параметризованными потоками биогенов, соответствующими суммарному выносу их в Черное море такими реками как Дунай, Днепр и Днестр.

В качестве базового расчета был проведен расчет от начального момента времени, соответствующего началу октября, на 900 суток, так что конец расчета соответствует концу марта и на 1150 суток, что соответствует концу августа модельного времени. При выборе продолжительности базового расчета было принято во внимание то обстоятельство, что только примерно на второй год модельного времени интегрирования параметры экосистемы выходят на квазипериодический режим, описывающий сезонную изменчивость. Кроме того, данная продолжительность расчета была выбрана в связи с обеспеченностью спутниковыми данными *SeaWiFS* (*Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* – прибор для наблюдения цветовых полей) на март и август 1998 г., и, главным образом, тем обстоятельством, что март характеризуется резким всплеском концентрации диатомовых водорослей.

Модель коэффициента яркости моря. Спектральный коэффициент яркости моря ρ_w на длине волны λ с учетом профиля суммарного поглощения и обратного рассеяния света в морской воде по глубине z, следуя работе [2], рассчитывался по формуле

$$\rho_w(\lambda)=\gamma\int_{-\infty}^{0} b_b\,(\lambda,z)\exp\left(\frac{a(\lambda,z)}{\mu_1}z\right)\exp\left(\frac{a(\lambda,z)}{\mu_2}z\right)\mathrm{dz}, \qquad (2)$$

где γ – это константа, равная 0,12 стер$^{-1}$; $b_b(\lambda,z)$ – спектральный коэффициент обратного рассеяния света морской водой (м$^{-1}$) на глубине z; $a(\lambda,z)$ – спектральный коэффициент поглощения света морской водой (м$^{-1}$) на глубине z; μ_1 и μ_2 – средние косинусы передней и задней половины индикатрисы рассеяния, равные 1 и 0,5 соответственно.

В работе были использованы коэффициенты яркости моря ρ_w в шести СК 412, 443, 490, 510, 555 и 670 нм, полученные в результате обработки измерений цветового сканера *SeaWiFS* за 1998 г. Эти данные были проинтерполированы на 4-х км сетку с 2-х недельным осреднением.

Чтобы минимизировать грубые ошибки атмосферной коррекции, из массива исключались спектры ρ_w, которые обладали следующими свойствами:

– $\rho_w < 0$ для любого спектрального канала;

– измерения были сделаны в зоне блика;

– в ближайших узлах сетки (± 1 узел сетки) находился объект повышенной яркости, в нашем случае облачность.

Восстановление поверхностных концентраций оптически активных компонентов морской среды по спутниковым данным о спектральном коэффициенте яркости моря. Экологическая модель позволяет получать вертикальные профили оптически активных компонентов морской среды. С использованием методики предыдущего раздела были построены модельные спектры восходящего излучения морской поверхности для центральной части Черного моря для модельного времени, соответствующего концу марта, что позволило сравнить измеренные значения спектрального коэффициента яркости моря с рассчитанными. Невязки спектра для j-го спектрального канала определяются по модельному спектру $\mathrm{Sm_j}$ и поступившим спутниковым данным $\mathrm{Sd_j}$ как

$$\delta S_j = \mathrm{Sm}_j - \mathrm{Sd}_j.$$

По модельным поверхностным концентрациям оптически активных компонент $F_i(0)$ и модельному спектру Sm строится корреляционная матрица невязок SF_{ij}. Невязки концентраций оптически активных компонент δF_i определяются путем решения системы линейных

уравнений

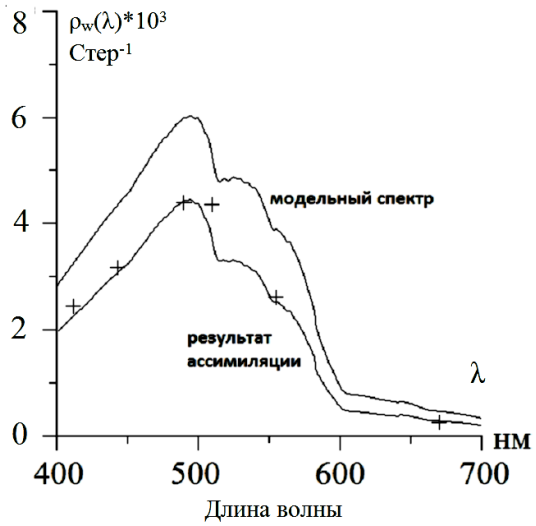
$$\delta S_j = \sum_{i=1}^{nc} SF_{ij}\, \delta F_i\ , \qquad (3)$$

здесь суммирование по индексу i осуществляется по всем nc оптически активным компонентам.

Коррекция концентраций оптически активных компонентов по глубине производится с сохранением структуры вертикальных профилей

$$\tilde{F}_i(z) = F_i(z)\left(1 + \delta F_i / F_i\,(0)\right). \qquad (4)$$

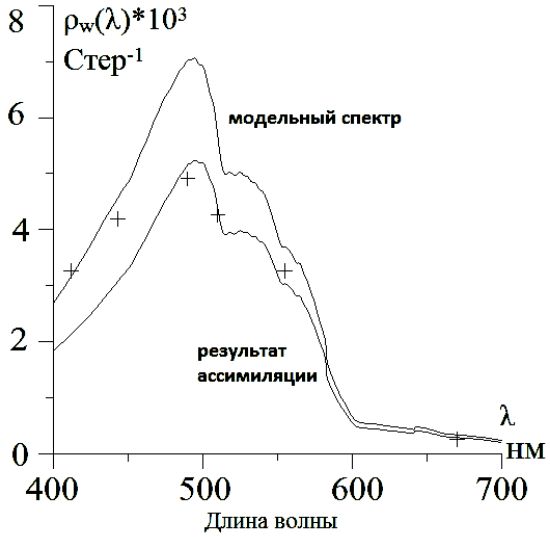
Результаты применения процедуры ассимиляции по предлагаемой методике продемонстрированы ниже. На рис. 1 и 2 приведены результаты работы [3] спектры восходящего излучения морской поверхности Черного моря для конца марта в сравнении с данными *SeaWiFS*.



Р и с. 1. Спектральная плотность восходящего излучения моря для конца марта, крестиками показаны данные спутникового сканера. Использованы данные по каналам 443, 490, 510 и 555 нм

Представленный график (рис.1) показывает удовлетворительную работу алгоритма по восстановлению концентраций оптически активных компонентов при использовании данных по 4-м СК в диапазоне 443 – 555 нм.

Применение процедуры ассимиляции спутниковых данных через расчет значений невязок оптически активных компонентов позволяет построить скорректированные концентрации этих компонентов, и, соответственно, скорректированный спектр поверхностного излучения.



Р и с. 2. Спектральная плотность восходящего излучения моря для конца марта, крестиками показаны данные спутникового сканера. Использованы данные по каналам 490, 510, 555 и 670 нм

Крестиками отмечены спутниковые данные о спектральном коэффициенте яркости моря по всем 6-ти спектральным каналам. Применение процедуры ассимиляции спутниковых данных через расчет невязок оптически активных компонентов позволяет построить скорректированные концентрации этих компонентов, и, соответственно, скорректированный спектр поверхностного излу-чения. График, приведенный на рис. 2, показывает только формальную работу алгоритма, это связано с сильным поглощением солнечной радиации на длинах волн 412 и 670 нм растворенным органическим веществом и чистой водой соответственно, что обусловливает отсутствие информации о концентрации хлорофилла-«*a*» в спутниковых данных по этим каналам. Таким образом, алгоритм ассимиляции данных о спектральной плотности восходящего излучения осуществлялся с использованием данных спектральных каналов сканера 443, 490. 510 и 555 нм. Схема экспериментов была предложена следующая: в начальные данные экологической модели вносятся возмущения в один из рассчитываемых

компонентов модели, на основании ансамбля возмущений строятся коэффициенты корреляции между возмущаемым компонентом и исследуемым.

Решению основной задачи предшествовал ряд предварительных расчетов:

– экстраполяция невязок значений оценок концентрации оптически активных компонентов в глубину.

– построение корреляционной матрицы невязок этих концентраций.

– автоматизация процесса построения оценок невязок оптически активных компонентов модели по данным о спектре восходящего излучения.

Таблица 1

Корреляционная матрица ошибок прогноза поверхностных значений компонентов экологической модели

	Pn	Pf	Pd	Dn	A	B	Hl	Hs	Ni
Pn	1	0,0042	0,028	0,04	0	0,004	0,17	0,11	0
Pf	-0,0028	1	-0,017	-0,0037	0	0,018	0,055	-0,53	0
Pd	-0,001	-0,0003	1	-0,001	0	-0,0045	-0,7	-0,17	0
Dn	0,11	0,0011	0,0116	1	0	-0,35	0,073	0,14	0
A	0,32	0,02	0,022	0,058	1	0,33	0,4	0,38	0
B	0,0048	-0,002	-0,003	0,2	0	1	0,5	-0,17	0
Hl	-0,0002	0,0006	0,0079	0,0002	0	0,0004	1	0,01	0
Hs	0,115	0,06	0,052	0,03	0	0,1	-0,46	1	0
Ni	0,112	0,0057	0,0076	0,016	0,56	0,11	0,22	0,18	1

Базовый расчет выполнен на 1400 суток модельного времени, начальное время t = 270 суток, конец периода расчета соответствует середине августа модельного времени t = 1670 суток. На основном этапе данные для t = 1670 суток были последовательно зашумлены, амплитуда шума варьировалась в диапазоне 5 – 15% для поверхностных значений концентраций, экстраполяция возмущений по глубине была осуществлена с учетом корреляций по глубине.

Для оценки эффективности работы алгоритма проведено его тестирование, модельные концентрации были изменены следующим образом: концентрация детрита увеличена на 10%, концентрация растворенного азота уменьшена на 10%, по измененным концентрациям построены квази-измерения спектра, применение алгоритма дало следующие результаты для корректировки концентраций: для Pn +9,14%, Pf -1,6%, Pd -1,6%, Dn -13,5%.

В связи с тем, что в алгоритме используются нормированные спектры, визуальный анализ их затруднен, так как графики практически сливаются в одну линию, что в целом предъявляет дополнительные требования к чувствительности алгоритма.

Полученные концентрации с использованием корреляционной матрицы (табл. 1) позволяют корректировать весь вектор состояния системы, при этом следует заметить то обстоятельство, что корреляционная матрица с хорошей точностью может считаться диагональной единичной, анализ показывает, что отдельные значения корреляционной функции порядка 0,5 – 0,7 связаны с тем, что дисперсия варьируемых параметров задачи очень мала и их фактическая из-

менчивость не скажется при реальной корректировке.

Заключение. Представленная модель описывает изменчивость концентраций биохимических компонентов верхнего слоя Черного моря, при этом важно отметить, что экспериментальное измерение концентраций этих компонентов является чрезвычайно трудоемким процессом[4]. Перспектива подобных исследований связывается с применением дистанционнных методов измерений и, прежде всего, с измерениями спектра восходящего излучения верхнего слоя моря в его видимом диапазоне.

Таким образом, разработанный алгоритм ассимиляции концентрации оптически активных компонентов: двух составляющих фитопланктона, растворенного органического вещества и взвешенного органического вещества позволяет корректировать модельные значения данных параметров и может быть применен в трехмерной междисциплинарной модели для всей открытой части Черного моря.

Данное исследование имеет своей целью определение отклика всей системы на входящие возмущения, а также является чрезвычайно полезным при ассимиляции спутниковых данных, поступающих через незначительный временной интервал. Это позволяет различить ошибку прогноза по экологической модели, связанную с неточностью собственно модели, и отклик системы на предыдущие акты ассимиляции данных. В контексте данной работы предполагается *a priori*, что алгоритм разрабатывается для ассимиляции информации о поверхностной концентрации оптически активных компонент морской среды при том, что посредством экологической модели осуществляется прогноз всех биохимических компонент морской среды открытой части Черного моря.

Необходимо подчеркнуть характерные особенности предлагаемого алгоритма:

– корреляционная матрица невязок SF_{ij} не является универсальной, она зависит от значений концентраций оптически активных компонент морской среды на момент ассимиляции данных спектральной яркости;

– используемая в работе модель коэффициента яркости моря позволяет учитывать рассеяние света только двумя составляющими фитопланктонного сообщества: диатомовыми и динофлагелятами, перспективы данной работы, в частности, связываются с учетом вклада эффекта цветения кокколитофорид в спектре восходящего излучения моря;

– предложенный алгоритм не связан с конкретным выбором как самой экологической модели Черного моря, так и модели коэффициента яркости моря и предполагает их развитие и модификацию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дорофеев В.Л., Коротаев Г.К.* Ассимиляция данных спутниковой альтиметрии в вихреразрешающей модели циркуляции Черного моря // Морской гидрофизический журнал. – 2004. – № 1. – С. 52–68.
2. *Дорофеев В.Л., Огуз Т., Коротаев Г.К.* Моделирование биологической изменчивости Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика». – 2005. – Вып. 12. – С. 71–82.
3. *Федотов А.Б., Суслин В.В., Коротаев Г.К.* Построение алгоритма ассимиляции спутниковых данных в биооптической модели Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: НПЦ “ЭКОСИ-Гидрофизика”. – 2012. – Вып. 26. – Том 2. – С. 175–184.
4. *Чурилова Т.Я., Берсенева Г.П., Георгиева Л.В.* Изменчивость биооптических характеристик фитопланктона в Черном море // Океанология. – 2004. – Том 44, № 2. – С. 208–221.