

Ассимиляция спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла *a* и расчетных данных о динамике морской среды в адаптивной модели экосистемы северо-западного шельфа Черного моря

И. Е. Тимченко*, И. П. Науменко, Е. М. Игумнова

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru*

Поступила в редакцию 24.04.2018 г.

Предложена модель экосистемы верхнего слоя моря, основанная на уравнениях метода адаптивного баланса влияний. В модели использована схема причинно-следственных связей из работы Фэшема, Даклоу и Мак-Кельви, представляющая собой реакции азотного цикла в верхнем слое моря. Параметризации биохимических реакций взаимодействия веществ в этой модели заменены нормированными отношениями средних значений концентраций веществ, найденных из анализа наблюдений биохимических полей в акватории северо-западного шельфа Черного моря. В качестве внешних влияний использованы спутниковые наблюдения концентраций хлорофилла *a*, а также данные об адвекции и диффузии, полученные из расчетов по гидродинамической модели внутригодовой изменчивости поля скорости течений в верхнем слое моря. Эта информация послужила внешними влияниями для расчета отклонений концентраций биохимических полей от их средних значений, принятых за стационарное состояние экосистемы. Ассимиляция наблюдений осуществлена путем включения в правые части уравнений адаптивной модели экосистемы дополнительных функций источников, представляющих усваиваемые данные. Построены карты биохимических полей района, позволившие анализировать их пространственно-временную изменчивость в течение 2015 г. Сделан вывод о полезности предлагаемого подхода к построению карт биохимических полей верхнего слоя моря.

Ключевые слова: метод адаптивного баланса влияний, сохранение материальных балансов, нормированные коэффициенты влияний, адаптивная модель экосистемы верхнего слоя моря, карты биохимических полей.

Благодарности: разработка адаптивной модели морской экосистемы выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Севастополя в рамках проекта № 18-47-920001 «Исследование принципов построения адаптивных моделей эколого-экономических систем и цифровых информационных технологий для управления сценариями устойчивого развития природно-хозяйственных комплексов Севастопольского региона». Вычислительные эксперименты с моделью проведены в рамках государственного задания по теме № 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей».

Для цитирования: Тимченко И. Е., Науменко И. П., Игумнова Е. М. Ассимиляция спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла *a* и расчетных данных о динамике морской среды в адаптивной модели экосистемы северо-западного шельфа Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 2018. Т. 34, № 6. С. 556–569. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-556-569

Assimilation of Satellite Observations of the Chlorophyll-*a* Concentration and the Calculated Data on the Marine Environment Dynamics in the Adaptive Model of the Ecosystem of the Black Sea Northwestern Shelf

I. E. Timchenko*, I. P. Naumenko, E. M. Igumnova

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

**e-mail: timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru*

The model of the sea upper layer ecosystem based on the equations of the adaptive balance of causes method is proposed. The scheme of the cause-effect relations from the paper by Fasham, Ducklow and McKelvie constituting the nitrogen cycle reactions in the sea upper layer is used in the model. Parameterization of biochemical reactions of the substance interaction is substituted in this model for the normalized ratios of the substances' average concentrations resulted from analyzing the observations of the biochemical fields of the Black Sea northwestern shelf. The satellite-derived chlorophyll-*a* concentrations as well as the data on advection and diffusion obtained from calculations of intra-annual variability of the current velocity field in the sea upper layer using the hydrodynamic model, are used as the external influencing factors. Being regarded as the external influencing factors, the information was used for calculating the deviations of the biochemical fields' concentrations from their average values assumed to be a stationary state of the ecosystem. The observations were assimilated through including the sources' additional functions (representing the assimilated data) to the right parts of the adaptive ecosystem model equations. The regional maps of the biochemical fields permitting to analyze their spatial-temporal variability in 2015 were constructed. The drawn conclusion confirms utility of the proposed approach used for mapping the biochemical fields of the sea upper layer.

Keywords: adaptive balance of causes method, preservation of material balances, normalized influence coefficients, adaptive model of the sea upper layer ecosystem, maps of biochemical fields.

Acknowledgements: the adaptive model of the marine ecosystem is developed at financial support of the Russian Fund of Fundamental Investigations and the Sevastopol Administration within the framework of the project № 18-47-920001 "Study of the principles for constructing adaptive models of the ecological-economic systems and digital informational technologies for managing the scenarios of sustainable development of natural and economical complexes in the Sevastopol region". The computing experiments with the model are performed within the framework of the state task on the theme № 0827-2018-0004 "Complex interdisciplinary investigations of the oceanologic processes which condition functioning and evolution of the coastal ecosystems of the Black and Azov seas".

For citation: Timchenko, I.E., Naumenko, I.P. and Igumnova, E.M., 2018. Assimilation of satellite observations of the chlorophyll-*a* concentration and the calculated data on the marine environment dynamics in the adaptive model of the ecosystem of the Black Sea northwestern shelf. *Morskoy Gidrofizicheskiy Zhurnal*, [e-journal] 34(6), pp. 556-569. doi:10.22449/0233-7584-2018-6-556-569 (in Russian).

Введение

Биохимические реакции превращения веществ в верхнем слое моря находятся под влиянием солнечной радиации, потоков кислорода и углекислого газа через морскую поверхность, горизонтального и вертикального переноса и перемешивания водных масс, а также многих других факторов. Этим обусловлена проблема моделирования изменчивости биохимических полей верхнего слоя, диктующая необходимость ассимиляции в моделях экосистем данных наблюдений концентраций веществ и динамики морской среды. Методы ассимиляции данных спутниковых и контактных наблюдений получили развитие во многих исследованиях, посвященных моделям динамики океана и атмосферы [1–7]. В ряде исследований разработаны методы ассимиляции данных спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла, температуры и возвышений уровня морской поверхности, а также дистанционных наблюдений плавающих буев в моделях циркуляции Черного моря [8–10]. Благодаря этому появились работы, в которых модели морских экосистем строятся на основе гидрофизических уравнений переноса и диффузии веществ, допол-

ненных функциями источников и стоков, учитывающими биохимические реакции превращения веществ в морской среде.

Динамика водных масс является фактором внешнего воздействия на морские экосистемы. Это позволяет строить модели морских экосистем, основываясь на более простых балансовых моделях биохимических процессов, подчиненных внешним влияниям адвекции и диффузии на концентрации моделируемых субстанций в экосистемах. Примером такого подхода служит ставшая классической модель азотного цикла в верхнем слое моря авторов Фэшема, Даклоу и Мак-Кельви [11]. В этой модели динамика нижней границы верхнего перемешанного слоя, рассчитываемая по отдельной гидрофизической модели, управляет массовыми балансами биохимических реакций за счет включения дополнительных динамических источников в систему обыкновенных дифференциальных уравнений модели экосистемы.

Стремление упростить задачу моделирования биохимических полей верхнего слоя моря за счет максимального использования данных наблюдений привело к созданию адаптивного подхода к моделированию, опирающегося на гипотезы о существовании состояния равновесия экосистемы с окружающей средой и об отклонениях от этого состояния под влиянием наблюдаемых внешних воздействий. Эти гипотезы позволили разработать используемый в данной работе метод адаптивного баланса влияний (*ABC*-метод) [12, 13], в котором применены обыкновенные дифференциальные уравнения специального (логистического) типа. В основе метода лежит предположение о стремлении экосистемы к состоянию динамического равновесия, при котором внутрисистемные процессы адаптированы друг к другу и к внешним воздействиям таким образом, чтобы сохранялись материальные балансы реакций превращения веществ в морской среде. Принцип адаптации приводит к относительно простым уравнениям адаптивных моделей взаимосвязанных процессов, что в свою очередь позволяет упростить процесс ассимиляции в модели данных наблюдений.

Этот подход был применен в ряде работ И. Е. Тимченко, И. П. Науменко, Е. М. Игумновой, посвященных усвоению спутниковых наблюдений в адаптивных моделях экосистем верхнего слоя для акваторий Черного моря. В частности, в работе [14] рассмотрена ассимиляция данных наблюдений в адаптивном варианте упомянутой выше модели нитратного цикла [11], в которой имитировано внешнее влияние переноса и диффузии водных масс на концентрации веществ. В отличие от имитационных экспериментов [14] в данном исследовании была поставлена цель ассимилировать в модели реальные спутниковые данные о концентрации хлорофилла *a*, полученные в течение 2015 г. в северо-западной части Черного моря, и адаптировать модельные оценки биохимических полей верхнего слоя к расчетным архивным данным о переносе и диффузии веществ в указанный период.

Адаптивная модель экосистемы верхнего слоя моря

В основе адаптивной модели экосистемы лежит идея максимально использовать данные наблюдений реакций превращения веществ в морской среде, чтобы заменить сложные параметризации этих реакций коэффициентами влияний, оцениваемыми по наблюдениям. В *ABC*-методе предполагают-

ся известными причинно-следственные связи между моделируемыми процессами, что позволяет построить схему взаимных влияний – концептуальную модель экосистемы. Вводится предположение о существовании среднестатистического состояния равновесия экосистемы, при котором скорости изменения концентраций веществ сбалансированы таким образом, что в отсутствие внешних влияний они сохраняются постоянными.

Для пояснения сути этого метода рассмотрим множество переменных модели экосистемы $\{u_i\}$, которые обозначают концентрации веществ при их превращениях в морской среде, и определим средние значения процессов $\{C_i\}$, характеризующие стационарное состояние экосистемы. Взаимные влияния n процессов будем оценивать при помощи коэффициентов влияний a_{ij} , которые связывают между собой переменные u_i и u_j соотношениями

$$u_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} u_j. \quad (1)$$

Эти соотношения можно рассматривать как реакции преобразования ресурсов экосистемы u_j в продукты u_i . Тогда коэффициенты влияний учитывают, какое количество данного вида ресурса потребляет продукт в ходе данной реакции. Естественно допустить, что коэффициенты влияний a_{ij} сохраняются при осреднении выражений (1), а также при учете в них внешних влияний на экосистему, которые мы обозначим как A_i . Внешние влияния приводят к отклонениям концентраций веществ от их среднестатистических значений C_i . Естественным условием служит сохранение материальных балансов реакций с учетом внешних влияний:

$$u_i - C_i = \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} (u_j - C_j) + A_i. \quad (2)$$

Введенные предположения использованы в методе адаптивного баланса влияний [12, 13] для построения стандартных уравнений, автоматически сохраняющих балансы (2) превращения веществ в экосистеме. Эти уравнения имеют вид

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \left\{ C_i - \left[u_i - \sum_{j=1, j \neq i}^n a_{ij} (u_j - C_j) - A_i \right] \right\}, \quad (3)$$

где r_i – размерные параметры, имеющие смысл удельных скоростей изменения u_i . Уравнения (3) связывают переменные экосистемы отрицательными обратными связями второго порядка со скоростями изменения переменных, что гарантирует быструю адаптацию переменных друг к другу и к внешним влияниям с целью сохранения балансов (2) [13].

Для оценки коэффициентов влияний a_{ij} по данным наблюдений предложены вероятностные и экспертные методы [13]. В данном исследовании мы

воспользуемся приближенными оценками, основанными на известных средних значениях моделируемых процессов C_i . Прежде всего, приведем ресурсные функции u_j , входящие в балансовые соотношения (2), к интервалам изменчивости продуктов экосистемы ($0 \leq u_i \leq 2C_i$). Для этого выразим переменные модели экосистемы в балансовых соотношениях (2) в единицах средних значений переменных. Тогда получим

$$u_i = C_i + \sum_{j=1, j \neq i}^n a'_{ij} \frac{C_i}{C_j} (u_j - C_j) + A'_i. \quad (4)$$

Влияние ресурсов u_j в соотношениях (4) пропорционально значениям отклонений $(u_j - C_j)$, а степень этих влияний определяется величинами отношений средних значений C_i/C_j . Поэтому можно предположить, что безразмерные множители a'_{ij} одинаково транслируют влияния функций u_j на функции u_i . Это позволяет выбирать их одинаковыми, исходя из соображений устойчивости решений системы уравнений *ABC*-метода (3).

Из анализа свойств *ABC*-метода [13] известно, что устойчивость решений системы уравнений (3) будет гарантирована, если суммы отрицательных и положительных влияний в уравнениях метода не превышают $0,5C_i$. Пусть, например, в уравнениях системы (3) имеется m положительных и $n - m$ отрицательных влияний. Тогда при введенных допущениях система уравнений (3) принимает вид

$$\frac{du_i}{dt} = 2r_i u_i \left\{ C_i - \left[u_i - \frac{C_i}{2m} \sum_{k=1, k \neq i}^m C_k^{-1} (u_k - C_k) + \frac{C_i}{2(n-m)} \sum_{l=1, l \neq i}^{n-m} C_l^{-1} (u_l - C_l) - A'_i \right] \right\}, \quad (5)$$

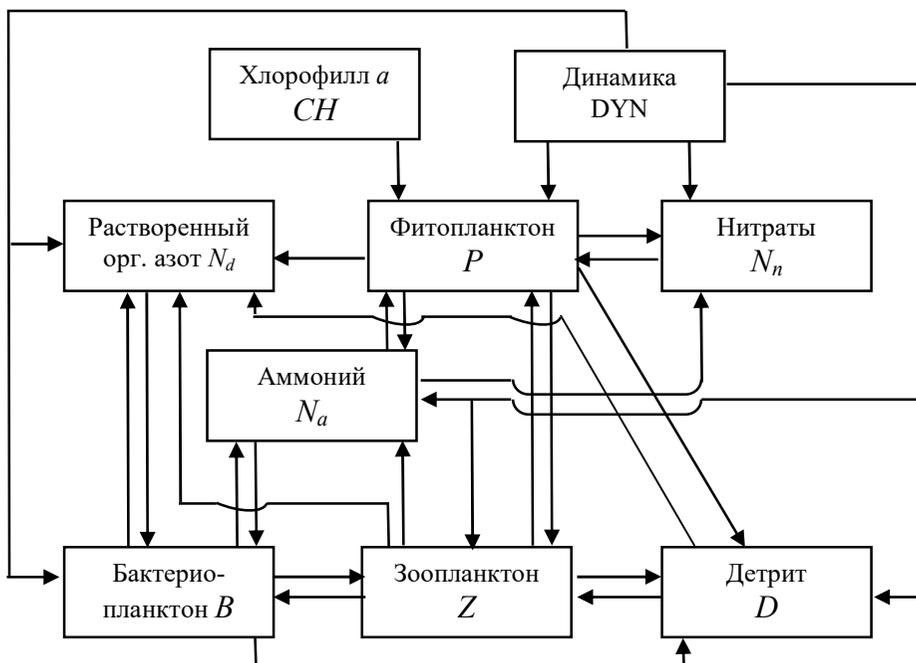
$$(n > m), (i, j = 1, 2, \dots, n).$$

Для того чтобы решения уравнений удовлетворяли установленным интервалам изменчивости переменных ($0 \leq u_i \leq 2C_i$), система уравнений модели (5) дополняется логическими агентами управления

$$u_i = IF[u_i < 0; 0; IF(u_i > 2C_i; 2C_i; u_i)]. \quad (6)$$

Применим полученные уравнения к схеме причинно-следственных связей между процессами азотного цикла, основанной на модели экосистемы Фэшема, Даклоу и Мак-Кельви [11]. Концептуальная модель экосистемы изображена на рис. 1.

Используя обозначения переменных и причинно-следственные связи между ними, приведенные на рис. 1, построим систему уравнений адаптивной модели экосистемы верхнего слоя моря. Для сокращения будем обозначать отклонения переменных от своих средних значений как $u'_i = u_i - C_i$.



Р и с. 1. Концептуальная модель экосистемы верхнего слоя моря, основанная на модели Фэ-шема, Даклоу и Мак-Кельви [11]

F i g. 1. Conceptual model of the ecosystem upper layer in the sea based on the Fasham, Ducklow and McKelvie model [11]

Уравнение концентрации фитопланктона:

$$\frac{dP}{dt} = 2r_P P \{ C_P - [P - C_P(4C_{N_a})^{-1} N'_a - C_P(4C_{N_n})^{-1} N'_n + C_P(2C_Z)^{-1} Z - F(CH') - DYN(P')] \}.$$

Уравнение концентрации зоопланктона:

$$\frac{dZ}{dt} = 2r_Z Z \{ C_Z - [Z - C_Z(6C_B)^{-1} B' - C_Z(6C_D)^{-1} D' - C_Z(6C_P)^{-1} P' - DYN(Z')] \}.$$

Уравнение концентрации бактериопланктона:

$$\frac{dB}{dt} = 2r_B B \{ C_B - [B - C_B(4C_{N_d})^{-1} N'_d - C_B(4C_{N_a})^{-1} N'_a + C_B(2C_Z)^{-1} Z' - DYN(B')] \}.$$

(7)

Уравнение концентрации детрита:

$$\frac{dD}{dt} = 2r_D D \{ C_D - [D - C_D(4C_P)^{-1} P' - C_D(4C_Z)^{-1} Z' + C_D(4C_B)^{-1} B' - DYN(D')] \}.$$

Уравнение концентрации аммония:

$$\frac{dN_a}{dt} = 2r_{N_a} N_a \{C_{N_a} - [N_a + C_{N_a} (4C_P)^{-1} P' - C_{N_a} (2C_Z)^{-1} Z' + C_{N_a} (4C_B)^{-1} B' - DYN(N'_a)]\}.$$

Уравнение концентрации нитратов:

$$\frac{dN_n}{dt} = 2r_{N_n} N_n \{C_{N_n} - [N_n + C_{N_n} (2C_P)^{-1} P' - C_{N_n} (2C_{N_a})^{-1} N'_a - DYN(N'_n)]\}.$$

Уравнение концентрации растворенного органического азота:

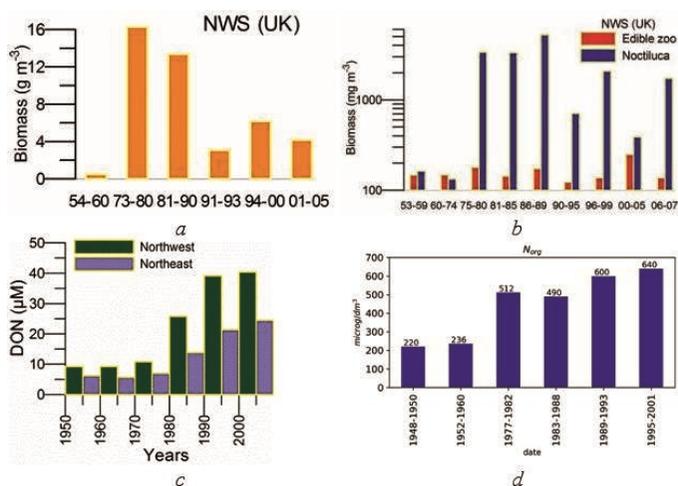
$$\frac{dN_d}{dt} = 2r_{N_d} N_d \{C_{N_d} - [N_d - C_{N_d} (6C_P)^{-1} P' - C_{N_d} (6C_Z)^{-1} Z' + C_{N_d} (2C_B)^{-1} B' - C_{N_d} (6C_D)^{-1} D' - DYN(N'_d)]\}.$$

В качестве ассимилируемых данных наблюдений была использована функция источника $F(CH')$ в уравнении для концентрации фитопланктона, которая представляла собой спутниковые наблюдения концентрации хлорофилла a . Функции источников $DYN(u'_i)$ учитывали влияния переноса и диффузии на концентрации биохимических переменных экосистемы, которые были приведены к масштабам изменчивости этих переменных. Каждое из уравнений системы (7) было дополнено агентом управления (6).

Оценка коэффициентов влияний в адаптивной модели по нормированным отношениям средних значений биохимических полей северо-западного шельфа Черного моря. Для определения коэффициентов влияний в модели (7) была использована информация о средних значениях биохимических полей северо-западного шельфа Черного моря (СЗШ ЧМ), полученная из литературных источников. Анализ этих источников показал довольно значительную пространственно-временную изменчивость полей экосистемы верхнего слоя указанного района.

Наиболее продуктивным районом для фитопланктона является придунайская часть шельфовой зоны. Отмечается, что характерными чертами развития фитопланктона здесь является отсутствие биогенного лимитирования, резкое увеличение терригенного стока с паводковыми водами весной и ограничение вследствие этого фотической зоны глубиной 1–2 м [15]. По данным работы [16], максимальные значения концентрации фитопланктона на СЗШ ЧМ наблюдались в 1973–1980 гг. (рис. 2, *a*), что было обусловлено сильной эвтрофикацией вод (фрагменты *a*, *b*, *c*, *d* рис. 2 взяты из [16–19] и адаптированы к настоящей работе). Средняя концентрация фитопланктона в эти годы по сравнению с 1950–1960 гг. увеличилась почти в 17 раз, от 0,9 до 16 г/м³. В период 1981–2000 гг. концентрация фитопланктона постепенно уменьшалась: в 90-е годы она составляла около 6 г/м³, а в 2000-е уменьшилась до 4 г/м³. Эти изменения показаны на рис 2, *a*. Исходя из приведенных данных, среднее значение биомассы фитопланктона для района СЗШ ЧМ было выбрано равным $C_P = 4$ г/м³.

Пространственное распределение зоопланктона столь же неоднородно. Концентрация планктонных организмов связана с распространением пресных вод в районе гидрофронтов, зонами «цветения», распространением микроорганизмов и ветровым режимом. На перераспределение зоопланктона существенно влияет циркуляция, возникающая при сгонных и нагонных ветрах. По данным Т. Шигановой [17], в 1990–1995 гг. биомасса кормового зоопланктона составляла 123,4 мг/м³, в 1996–1999 гг. – 138,2 мг/м³, в 2000–2005 гг. увеличилась до 250,2 мг/м³, в 2006–2007 гг. снова уменьшилась до 138,4 мг/м³. Эти изменения характеризует диаграмма на рис. 2, *b*. В данном исследовании для среднего значения концентрации зоопланктона Z была принята величина $C_Z = 0,4$ г/м³.



Р и с. 2. Данные многолетних наблюдений на акватории СЗШ ЧМ: *a* – изменение биомассы фитопланктона в 1954–1960 гг. и в 1973–2005 гг. [16]; *b* – биомасса кормового зоопланктона и *Noctiluca scintillans* в течение 1953–2007 гг. [17]; *c* – изменчивость концентрации растворенного органического азота на поверхности в западных и восточных прибрежных водах, осредненная за 5 лет [18]; *d* – среднее содержание азота органического вещества (мкг/дм³) в поверхностном слое [19]

Fig. 2. Data of the multi-year observations on the Black Sea northwestern shelf: *a* – changes of the phytoplankton biomass in 1954–1960 and 1973–2005 [16]; *b* – biomass of the fodder zooplankton and *Noctiluca scintillans* in 1953–2007 [17]; *c* – variability of the dissolved organic nitrogen on the surface of the western and eastern coastal waters averaged for 5 years [18]; *d* – average content of nitrogen in organic substance (mcg/dm³) in the surface layer [19]

Согласно [20], содержание аммонийного азота N_a в поверхностных водах изменялось в широких пределах: экстремально высокие концентрации за весь период исследований и соответственно диапазон их изменчивости наблюдались в днепро-бугском районе. Средняя концентрация N_a на поверхности составляла 18,2 мкг/л, на горизонте 10 м она уменьшалась до 17,4 мкг/л, что в пересчете составляет 0,158 г/м³. Значительно меньше содержание N_a в зоне смешивания вод и в мористых районах шельфа (около 5,9 мкг/л) [20]. Таким образом, в пространственном распределении для аммонийного азота так же, как и для планктонных организмов, наблюдалась тенденция увеличения концентрации по мере приближения к прибрежным приустьевым зонам. В качестве среднего значения нами была принята величина $N_a = 0,16$ г/м³.

Диапазон пространственной и временной изменчивости концентраций нитратов является наибольшим в приустьевых районах шельфа, особенно в поверхностном слое моря. В дунайском районе наблюдались максимальные за весь период исследований концентрации, доходившие до 998 мкг/л. В зоне смешивания вод содержание нитратов значительно уменьшалось, здесь максимальные концентрации уже не превышали 250 мкг/л. В мористых районах СЗШ ЧМ, отдаленных от основных источников загрязнения, среднее многолетнее содержание нитратов составляло 0,1–4,3 мкг/л. В слое 20–30 м средняя многолетняя величина содержания нитратов в приустьевых районах находилась в пределах 8,3–62,5 мкг/л, в мористых районах – в пределах 0,1–6,7 мкг/л. В данной работе в качестве среднего по району многолетнего значения была принята величина $C_{N_n} = 0,11 \text{ г/м}^3$.

На рис 2, с показано осредненное за 5 лет [18] содержание растворенного органического азота в западных и восточных прибрежных водах. Эти данные были использованы для оценки средней многолетней концентрации $C_{N_d} = 4,93 \text{ г/м}^3$.

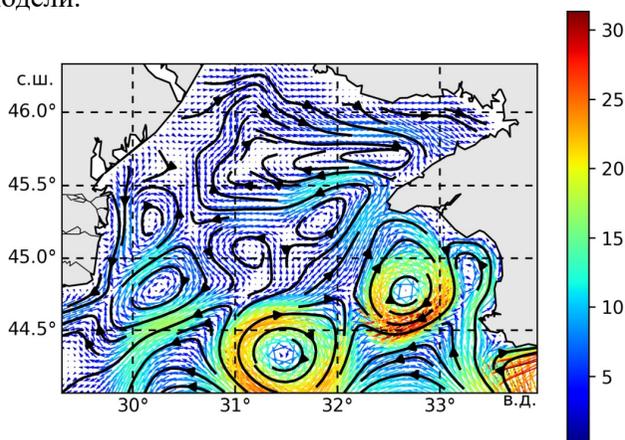
При оценке среднего значения концентрации бактериопланктона были использованы материалы наблюдений, опубликованные в [19, 21]. Данные из указанных работ позволили принять в качестве среднего значения концентрации бактериопланктона величину $C_B = 0,46 \text{ г/м}^3$. Основываясь на материалах работы [19], можно сделать вывод, что оценка средней многолетней концентрации детрита составляет $C_D = 2 \text{ г/м}^3$. Таким образом, для оценки величин коэффициентов влияния в адаптивной модели экосистемы верхнего слоя СЗШ ЧМ были использованы средние многолетние концентрации биохимических веществ, которые суммированы в таблице.

Оценки средних значений (г/м^3) компонентов и коэффициентов влияния в модели экосистемы
Estimates of the components' average values (g/m^3) and the effect coefficients in the ecosystem model

u_i	P	Z	B	D	N_a	N_n	N_d
C_i	4,0	0,4	0,46	2	0,16	0,11	4,93
P	1	5	–	–	6,312	9,009	–
Z	0,017	1	0,146	0,033	–	–	–
B	–	0,573	1	–	0,723	–	0,023
D	0,125	1,250	2,183	1	–	–	–
N_a	0,010	0,198	0,086	–	1	–	–
N_n	0,014	–	–	–	0,350	1	–
N_d	0,205	2,053	5,379	0,411	–	–	1

Ассимиляция спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла a и расчетных данных о динамике морской среды в модели. Для ассимиляции в модели (7) были использованы спутниковые наблюдения концентрации хлорофилла a и расчетные данные о динамике морской среды для района СЗШ ЧМ, полученные по программе *Myosean* [22]. В качестве примера на рис. 3 приведена карта горизонтальных течений в верхнем слое указанного

района на 209-е сутки 2015 г., построенная в результате расчетов по гидродинамической модели.



Р и с. 3. Карта скоростей (см/с) горизонтальных течений в верхнем слое северо-западного шельфа Черного моря на 209-е сутки 2015 г., полученная в результате расчетов по гидродинамической модели [22]

F i g. 3. Map of the horizontal currents' velocities (cm/s) in the upper layer of the Black Sea north-western shelf on the 209th day of 2015 resulted from the calculations by the hydrodynamic model [22]

Уравнения модели экосистемы (7) представлены в конечных разностях по схеме Эйлера. При этом введено условие, упрощающее их запись. Связи шага вычислений по времени Δt с удельной скоростью изменения функций r_i и средними значениями переменных модели C_i были приняты равными единице: $2\Delta t r_i C_i = 1$. Тогда модульные выражения для уравнений модели (7) в конечных разностях принимают упрощенный вид:

$$u_i^{k+1} = 2u_i^k \left\{ 1 - \frac{1}{2C_i} [u_i^k - F_{u_i}[u_j^k, DYN(u_i^k)]] \right\}, \quad (8)$$

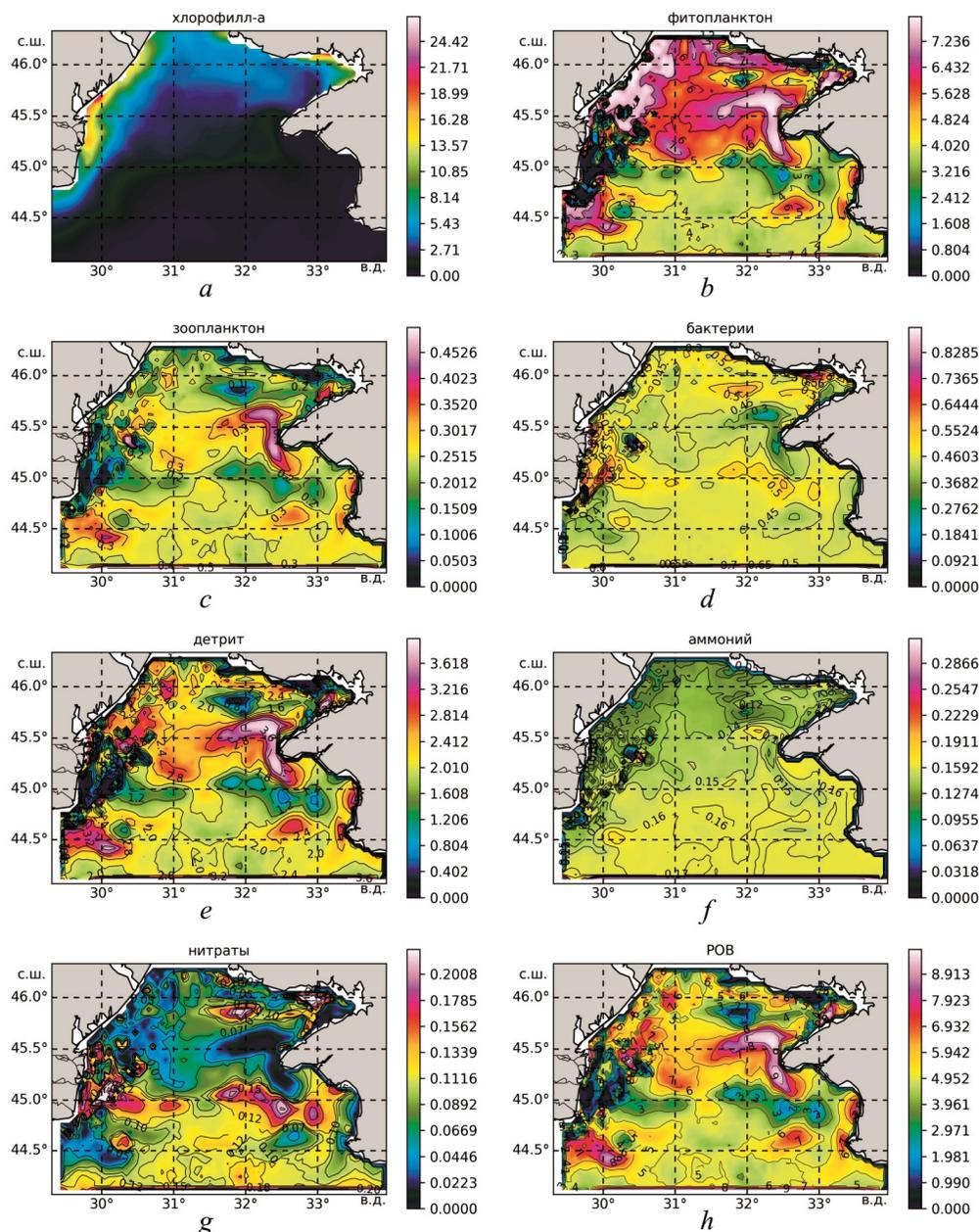
$$u_i^k = IF[u_i^k < 0; 0; IF(u_i^k > 2C_i; 2C_i; u_i^k)],$$

где через $F_{u_i}[u_j^k, DYN(u_i^k)]$ обозначены влияющие функции в правых частях уравнений (7).

Ассимиляции наблюдений предшествовали вычислительные эксперименты, в ходе которых была проверена устойчивость вычислительного алгоритма решения уравнений адаптивной модели и его чувствительность к внешним влияниям. Сходимость итераций к среднему (стационарному) состоянию экосистемы при отсутствии внешних влияний оказалась весьма быстрой. Она составляла около 5–7 итераций.

Заметим, что рассчитанные по модели стационарные значения процессов C_i^* в экосистеме являются условными по отношению к использованным оценкам коэффициентов влияний. Они отличаются на постоянные величины от оценок C_i , приведенных в таблице, ввиду принятого соотношения $2\Delta t r_i C_i = 1$. Однако эти отличия известны, и потому они могут быть легко

устранены путем введения постоянных поправок в сценарии, полученные после ассимиляции данных наблюдений [14]. Примеры карт полей биохимических компонентов экосистемы, построенных путем ассимиляции данных наблюдений, приведены на рис. 4.



Р и с. 4. Карты полей биохимических компонентов ($\text{г}/\text{м}^3$) в верхнем слое северо-западного шельфа Черного моря на 209-е сутки 2015 г., полученные в результате ассимиляции данных в адаптивной модели экосистемы (7), (8)

F i g. 4. Maps of the biochemical components' fields (g/m^3) in the upper layer of the Black Sea northwestern shelf on the 209th day of 2015 resulted from the data assimilation in the ecosystem adaptive model (7), (8)

Для проверки чувствительности модели к усваиваемым в ней данным наблюдений от внешних источников информации были проведены расчеты карт полей на каждые сутки 2015 г. Были выполнены эксперименты по раздельной ассимиляции спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла *a* и данных, характеризующих перенос и диффузию биохимических компонентов экосистемы. Как показал анализ результатов ассимиляции, наиболее подробные карты пространственно-временных полей экосистемы верхнего слоя моря получаются при одновременном усвоении моделью всей доступной информации.

На рис. 4 показаны карты полей в режиме одновременной ассимиляции спутниковых наблюдений концентрации хлорофилла *a* (рис. 4, *a*) и расчетных данных о динамике морской среды, полученных на эти сутки. Сопоставляя между собой пространственные распределения концентрации хлорофилла *a*, горизонтальные течения в верхнем слое моря и модельные карты биохимических полей, можно видеть их определенное локальное подобие в ряде районов. В частности, выделяются обусловленные динамикой вод особенности структуры полей в районе, прилегающем к западной оконечности Крыма.

Заключение

В данной работе была поставлена цель: показать возможность слежения за динамикой полей экосистемы верхнего слоя моря с помощью адаптивной динамической модели, которая обладает свойствами взаимного приспособления переменных модели в условиях, когда в уравнения модели непрерывно поступают новые данные наблюдений. Ассимиляция наблюдений выполняла функцию управления моделью. Адаптация модельных оценок биохимических полей к данным наблюдений осуществлялась благодаря условию сохранения материальных балансов внутрисистемных взаимодействий между моделируемыми процессами. Это условие лежит в основе метода адаптивного баланса влияний, который был применен при построении модели экосистемы. Одна из задач заключалась в проверке метода представления внутрисистемных реакций в адаптивной модели с помощью коэффициентов, являющихся нормированными отношениями средних значений полей, которые были приняты за стационарное состояние экосистемы.

Вычислительные эксперименты по ассимиляции данных спутниковых наблюдений и расчетных данных о динамике морской среды в адаптивной модели экосистемы верхнего слоя для района северо-западного шельфа Черного моря показали, что поставленная цель была достигнута. С помощью ассимиляции данных наблюдений были построены карты полей биохимических переменных модели, согласованных между собой и с внешними источниками информации. Подтверждена возможность замены сложных параметризаций, применяемых при описании внутрисистемных взаимодействий в морской экосистеме, нормированными отношениями средних значений моделируемых процессов в тех случаях, когда эти средние значения известны из наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саркисян А. С. Об основных направлениях моделирования физических характеристик Мирового океана и морей // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2016. Т. 52, № 4. С. 381–387. doi:10.7868/S0002351516040106
2. Динамико-стохастический подход к анализу наблюдений поля плотности на гидрофизических полигонах / Б. А. Нелепо [и др.] // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1978. Т. 14, № 10. С. 1079–1093.
3. *Timchenko I. E.* Stochastic Modelling of Ocean Dynamics. Chur : Harwood Academic Publishers, 1984. 320 p.
4. Кочергин В. П., Тимченко И. Е. Мониторинг гидрофизических полей океана. Л. : Гидрометеоздат, 1987. 280 с.
5. *Ghil M., Malanotte-Rizzoli P.* Data Assimilation in Meteorology and Oceanography // Advances in Geophysics / Edit. by R. R. Dmowska, B. Saltzman. San-Diego : Academic Press, Inc., 1991. Vol. 33. P. 141–266. doi:10.1016/S0065-2687(08)60442-2
6. *Marchuk G. I., Zalesny V. B.* A numerical technique for geophysical data assimilation problems using Pontryagin's principle and splitting-up method // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 1993. Vol. 8, iss. 4. P. 311–326. doi:10.1515/rnam.1993.8.4.311
7. *Robinson A. R., Lermusiaux P. F. J.* Overview of Data Assimilation // Harvard Reports in Physical/Interdisciplinary (Ocean Science). Cambridge, Massachusetts : Harvard University, 2000. No. 62. 28 p. URL: http://robinson.seas.harvard.edu/PAPERS/red_report_62.html (дата обращения: 18.04.2018).
8. Коротаев Г. К., Еремеев В. Н. Введение в оперативную океанографию Черного моря. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 382 с.
9. Assimilation of the climatic hydrological data in the σ -coordinate model of the Black Sea by the algorithm of adaptive statistics / A. I. Mizyuk [et al.] // Physical Oceanography. 2009. Vol. 19, iss. 6. P. 339–357. doi:10.1007/s11110-010-9058-2
10. Development of Black Sea nowcasting and forecasting system / G. K. Korotaev [et al.] // Ocean Science. 2011. Vol. 7, iss. 5. P. 629–649. doi:10.5194/os-7-629-2011
11. *Fasham M. J. R., Ducklow H. W., McKelvie S. M.* A nitrogen-based model of plankton dynamics in the oceanic mixed layer // Journal of Marine Research. 1990. Vol. 48, no. 3. P. 591–639. <https://doi.org/10.1357/002224090784984678>
12. Тимченко И. Е., Игумнова Е. М., Тимченко И. И. Системный менеджмент и ABC-технологии устойчивого развития. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000. 225 с.
13. *Timchenko I. E., Igumnova E. M., Timchenko I. I.* Adaptive Balance Models for Environmental-Economic Systems. CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016. 486 p.
14. Тимченко И. Е., Лазарчук И. П., Игумнова Е. М. Ассимиляция данных наблюдений в адаптивной модели морской экосистемы при известных средних значениях процессов в морской среде // Морской гидрофизический журнал. 2017. № 5. С. 79–96. doi:10.22449/0233-7584-2017-5-79-96
15. Финенко З. З., Чурилова Т. Я., Суслин В. В. Оценка биомассы фитопланктона и первичной продукции в Черном море по спутниковым данным // Промысловые биоресурсы Черного и Азовского морей. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. С. 221–236.
16. The state of phytoplankton / D. Nesterova [et al.] // State of the Environment of the Black Sea (2001–2006/7) : A report by the Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution / Chief Editor Temel Oquz. Istanbul : Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution, 2008. Chapter 5. P. 33–167.
17. The State of Zooplankton / T. Shiganova [et al.] // State of the Environment of the Black Sea (2001–2006/7) : A report by the Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution / Chief Editor Temel Oquz. Istanbul : Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution, 2008. Chapter 6. P. 168–217.

18. The State of Eutrofication / T. Oguz [et al.] // State of Environment of the Black Sea (2001–2006/7) : A report by the Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution / Chief Editor Temel Oquz. Istanbul : Commission on the Protection of the Black Sea Against Pollution, 2008. Chapter 2. P. 44–73.
19. *Зайцев Ю. П.* Северо-западная часть Черного моря: биология и экология / Отв. ред. Ю. П. Зайцев. Киев : Наукова думка, 2006. 701 с.
20. *Лоева И. Д.* Гидрологические и гидрохимические показатели состояния северо-западного шельфа Черного моря. Киев : КНТ, 2008. 616 с.
21. *Шумакова Г. В.* Многолетняя сезонная динамика распределения бактериопланктона в северо-западной части Черного моря // Экология моря. 2002. Вып. 61. С. 69–73.
22. Интернет ресурс: <http://www.myocean.eu/>

Об авторах:

Тимченко Игорь Евгеньевич, заведующий отделом системного анализа, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, профессор, **ResearcherID: A-8650-2017**, timchenko.syst.analysis@mhi-ras.ru

Науменко Инга Петровна, научный сотрудник, отдел системного анализа, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), кандидат физико-математических наук, **ResearcherID: U-1807-2018**, ingainatm@yandex.ru

Игумнова Екатерина Михайловна, ведущий инженер, отдел оптики и биофизики моря, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2).