

## СИСТЕМА ДИАГНОЗА-ПРОГНОЗА СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ ЧЕРНОГО МОРЯ

*В.Л. Дорофеев\**, *Г.К. Коротаев*, *Л.И. Сухих*

Морской гидрофизический институт РАН,  
Россия, 299011, Севастополь, Капитанская ул., 2; \*victor.dorofeev@mhi-ras.ru

**Резюме.** Созданный на базе Морского гидрофизического института Российской академии наук (МГИ РАН) центр мониторинга и прогноза выдает на регулярной основе информацию о состоянии морской среды для Черноморского региона. Одной из составных частей этой системы является подсистема диагноза и прогноза состояния экосистемы Черного моря. Ее основными составными частями являются численная модель нижнего пищевого уровня морской экосистемы и блок ассимиляции спутниковых измерений. Численная модель экосистемы включает пятнадцать переменных состояния и описывает процессы в верхнем 200-метровом слое моря. Модель основана на азотном цикле, то есть азот рассматривается как единственный биогенный элемент, ограничивающий рост фитопланктона. Алгоритм ассимиляции данных концентрации поверхностного фитопланктона основан на принципе релаксации полей, полученных по модели, к данным, подготовленным на основе изображений спутниковых цветочных сканеров. Модель была апробирована, в том числе, при анализе долговременной эволюции экосистемы Черного моря (1971-2001 гг.). Этот период характеризуется существенной трансформацией черноморской экосистемы. После относительно здорового состояния 60-х – начала 70-х годов прошлого столетия экосистема Черного моря испытала интенсивную эвтрофикацию, после чего, в середине 90-х, началось выздоровление экосистемы. Результаты выполненных расчетов выявили основные закономерности эволюции черноморской экосистемы в течение этого периода, подтвержденные многочисленными биологическими и гидрохимическими измерениями. Алгоритм ассимиляции измерений спутниковых цветочных сканеров был также тестирован при расчете эволюции экосистемы за период с 1998 г., когда стали доступны спутниковые данные, по 2012 г. Результаты моделирования сравнивались с контактными биогеохимическими измерениями, проводившимися в этот период времени, и показали достаточно хорошее количественное соответствие.

**Ключевые слова.** Мониторинг, морская экосистема, Черное море, ассимиляция данных, спутниковые измерения.

## ANALYSIS-FORECAST SYSTEM OF THE BLACK SEA ECOSYSTEM STATE

*V.L. Dorofeyev\**, *G.K. Korotaev*, *L.I. Sukhikh*

Marine hydrophysical institute RAS,  
2, Kapitanskaya Str., 299011, Sevastopol, Russia; \*victor.dorofeev@mhi-ras.ru

---

**Abstract.** The monitoring and forecasting center established in Marine Hydrophysical Institute RAS provides information on the state of the marine environment for the Black Sea region on a regular manner. One of this system compartment is the analysis and forecast subsystem of the Black Sea ecosystem state. Its main components are the lower trophic level numerical model of the marine ecosystem and the procedure of satellite measurements assimilation. The ecosystem numerical model includes fifteen state variables and describes processes in the upper 200-meter layer of the Black sea. The model is based on the nitrogen cycle, that is, nitrogen is considered as the only limiting nutrient for phytoplankton growth. The technique of surface phytoplankton assimilation is based on relaxation of the fields derived from the model to the satellite colour scanners measurements. The model was tested on the analysis of the long-term evolution of the Black Sea ecosystem (1971-2001). This period of time is characterized by a significant transformation of the Black Sea ecosystem. After the relatively healthy state of the 60s – early 70s of the last century, the Black Sea ecosystem experienced intensive eutrophication, after which it recovered in the mid-1990s. The modeling results revealed the main regularities of the Black Sea ecosystem evolution during this period, which are known from numerous biological and hydrochemical measurements. The algorithm of assimilation of satellite colour scanners measurements is also verified on the study of the marine ecosystem evolution since 1998, when satellite data became available, until 2012. The simulation results were compared with *in-situ* biogeochemical measurements conducted during this period of time, and showed a fairly good quantitative correspondence.

**Key words.** Monitoring, marine ecosystem, the Black Sea, data assimilation, satellite measurements.

## Введение

Важную роль в жизнедеятельности населения, живущего на прибрежных территориях, играет состояние морских экосистем. В то же время, человеческая деятельность часто негативно сказывается на функционировании экосистемы и приводит к ее изменениям. Для того, чтобы вовремя отслеживать опасные для экосистемы изменения необходимо проводить постоянный мониторинг ее состояния. Одними из эффективных средств мониторинга морских систем являются дистанционные измерения, выполненные приборами, установленными на спутниках. В частности, можно получать на регулярной основе карты температуры поверхности моря и возвышения свободной поверхности. Данные с цветковых сканеров позволяют получать поверхностные распределения концентрации пигмента хлорофилл *a*. Однако, недостатком данных спутниковых измерений является то, что они дают информацию только о процессах в приповерхностном слое. Кроме того, наличие облачности существенно ограничивает количество получаемых данных.

Черное море представляет собой практически замкнутый водоем, соединяющийся со Средиземным морем системой узких проливов. Такая его обособленность проявляется в уникальности экосистемы, которая за последние

---

---

десятилетия двадцатого столетия претерпела существенные трансформации. Эти изменения связаны как с климатическими условиями региона, так и с деятельностью человека (судоходство и рыболовство), а также с антропогенной нагрузкой, вызванной стоками рек. С 60-х годов двадцатого столетия экосистема Черного моря претерпела существенные изменения в биомассе, таксономическом составе и структуре групп планктона. Эти изменения в структуре пищевой цепи сопровождалось также изменениями вертикальной гидрохимической структуры вод моря (Kopovalov, Murray, 2001). Трансформации экосистемы Черного моря были описаны в ряде работ на основе качественного анализа биогеохимических измерений (например, Zaitsev, Mamaev, 1997; Daskalov, 2003; Oguz, Gilbert, 2007).

Работы по математическому моделированию динамики экосистемы Черного моря начались достаточно давно. Изменчивость морской экосистемы и ее эволюция в течение различных периодов изучалась сначала с помощью одномерных междисциплинарных моделей (Oguz et al., 1999; Oguz et al., 2001; Lancelot et al., 2002; Gregoire et al., 2008). Они позволили достичь общего качественного соответствия модельных вертикальных распределений биогеохимических параметров и их сезонной эволюции имеющимся наблюдениям. Однако, особенности динамики бассейна Черного моря и интенсивная синоптическая изменчивость существенно влияют на биогеохимические процессы, одним из которых является перенос течениями богатых биогенными элементами вод северо-западного шельфа моря. На изображениях Черного моря, полученных спутниковыми цветовыми сканерами, видно, как перенос продуктивных вод вдоль западного берега моря поддерживает повышенные концентрации хлорофилла вблизи Анатолийского побережья. На этих изображениях также можно проследить важность синоптических процессов, которые обуславливают неоднородности в распределении цвета моря, связанные с изменениями продуктивности вод бассейна. Учесть все эти явления и их влияние на морскую экосистему можно только с помощью трехмерных моделей. Такие модели были созданы и использовались для изучения поведения экосистемы Черного моря (Gregoire et al., 2004; Дорофеев и др., 2005).

Перспективным направлением в мониторинге окружающей среды представляется синтез дистанционных измерений с математическими моделями. Применительно к морским системам использование трехмерных моделей позволяет помимо заполнения пробелов, обусловленных облачностью, экстраполировать эти данные с поверхности моря в глубину. На основе таких технологий, включающих ассимиляцию регулярно поступающих данных дистанционных измерений в моделях морской среды, в МГИ РАН создана система диагноза-прогноза состояния Черного моря, частью которой является подсистема, осуществляющая мониторинг состояния нижнего уровня пищевой цепи экосистемы Черного моря на основе ассимиляции спутниковых измерений в трехмерной математической модели. В данной работе представлено описание этой системы и приведены некоторые результаты математического моделирования эволюции экосистемы Черного моря.

---

## Методы и материалы

Основу системы диагноза-прогноза состояния морской экосистемы представляет трехмерная модель. Модель нижнего пищевого уровня экосистемы Черного моря включает 15 переменных состояния и описывает процессы в верхнем 200-метровом слое моря. Биологическую часть представляют две группы фитопланктона (диатомовые и флагелляты), две размерные группы зоопланктона: микрозоопланктон (имеющий размер меньше 0.2 мм) и мезозоопланктон (0.2-3 мм), медуза *Aurelia aurita* и гребневик *Mnemiopsis leidyi*. В пищевую цепь входят, кроме того, нефотосинтезирующий бактериопланктон, растворенные и взвешенные органические соединения, а также всеядная динофлагеллята *Noctiluca scintillans*. Азот рассматривается как единственный биогенный элемент, ограничивающий рост фитопланктона. Азотный цикл включает три неорганических соединения: аммоний, нитраты и нитриты. В качестве отдельных переменных состояния в модель также входят растворенные кислород и сероводород.

Математическая формулировка модели изменения во времени концентраций компонентов экосистемы имеет вид уравнений переноса-диффузии, включающих в правую часть слагаемые типа источников-стоков:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial(uF)}{\partial x} + \frac{\partial(vF)}{\partial y} + \frac{\partial((w + w_s)F)}{\partial z} = K_h \nabla^2 F + \frac{\partial}{\partial z} (K_v \frac{\partial F}{\partial z}) + \mathfrak{R}(F), \quad (1)$$

где  $\mathfrak{R}(F)$  - описывает биогеохимические взаимодействия между различными компонентами экосистемы  $F$  (выраженные в ммоль·м<sup>-3</sup>),  $w_s$  - скорость седиментации диатомовых водорослей и взвешенной органики (для остальных она равна нулю),  $(u, v, w)$  - компоненты скорости течений (м·с<sup>-1</sup>),  $K_h, K_v$  - коэффициенты горизонтальной и вертикальной турбулентной диффузии соответственно (м<sup>2</sup>·с<sup>-1</sup>). Члены типа источника-стока  $\mathfrak{R}(F)$  аналогичны тем, которые использовались в одномерных моделях (Oguz et al., 2000; Oguz et al., 2001). Поля скоростей течений, температуры, солености и коэффициентов турбулентной диффузии, обеспечиваются моделью циркуляции Черного моря. Горизонтальная сетка и вертикальные расчетные уровни биогеохимической части модели совпадает с теми, которые используются в модели циркуляции.

На поверхности моря задаются нулевые потоки всех переменных состояния, кроме кислорода. На нижней границе, в той ее части, где она жидкая (горизонт 200 м), ставятся нулевые условия для всех компонентов экосистемы, кроме аммония и сероводорода. В мелководной части моря на дне принимаются условия отсутствия потоков для всех компонентов экосистемы, кроме взвешенной органики и диатомовых водорослей, оседающих на дно. Такие же условия отсутствия потоков ставятся на боковых границах, за исключением устьев крупных рек, где задаются потоки питательных веществ, пропорциональные их концентрации и интенсивности речного стока.

Другой важной частью описываемой системы диагноза-прогноза экосистемы Черного моря является ассимиляция данных измерений спутниковых цветковых сканеров. Процедура ассимиляции данных концентрации поверхностного фитопланктона основана на принципе релаксации полей, полученных по модели, к данным, подготовленным на основе изображений спутниковых сканеров (Дорофеев и др., 2008). В правую часть уравнения (1) для двух компонентов фитопланктона добавляется слагаемое, зависящее от разности измеренного значения концентрации и полученного по модели:

$$\frac{1}{\tau}(P^s - \chi_i P_i(0)), \quad (2),$$

где  $P^s$  - данные измерений,  $P_i(0)$  - концентрация одной из двух компонентов фитопланктона на поверхности моря,  $\chi_i$  - вес соответствующей компоненты в суммарной концентрации,  $\tau$  - коэффициент релаксации, равный одним суткам.

Весовые коэффициенты  $\chi_i$  сезонно зависят от времени и определялись на основе статистических оценок по результатам предыдущих расчетов по модели. Необходимость введения этого параметра объясняется тем, что подготовленные спутниковые данные содержат концентрацию суммарного поверхностного фитопланктона без разделения на отдельные компоненты.

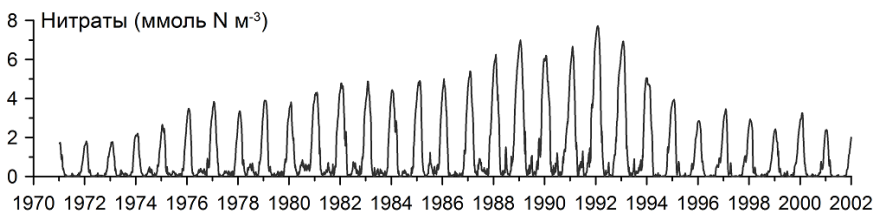
К сожалению, данные о распределении концентрации поверхностного фитопланктона, полученные непосредственно по спутниковым изображениям, имеют большие пропуски, вызванные отбраковкой облачности. Особенно это заметно в районах непосредственно возле берега на северо-западном шельфе, где концентрации планктона достигают максимальных значений из-за выноса биогенов крупными реками. Кроме того, в данных иногда имеются пропуски длиной в несколько дней для всей акватории Черного моря. Поэтому, с целью улучшения качества получаемых результатов, поля поверхностного фитопланктона, полученные на основе спутниковых данных цветковых сканеров, были подвергнуты дополнительной обработке. Вначале они интерполировались в узлы сетки модели. Затем для заполнения имеющихся пробелов, использовалась процедура оптимальной интерполяции (Гандин, Каган, 1976) по пространству и времени в те узлы сетки, где имелись пропуски. После такой дополнительной обработки поля, которые затем ассимилировались в модели, содержали существенно меньше пропусков, хотя полностью устранить пробелы в ассимилируемых данных не удастся. Тем не менее, дополнительная обработка полей, полученных по спутниковым изображениям, существенно увеличивает их информативность на входе в модель.

Для тестирования описанного алгоритма был использован специально подготовленный массив спутниковых данных, покрывающий интервал времени с июня по декабрь 1998 г. Выбор такого интервала был определен тем, что в это время имело место достаточно репрезентативное разнообразие типичных процессов изменчивости состояния моря (осеннее цветение фитопланктона, перемешивание водных масс и т.п.). Были использованы каждодневные данные, полученные американским спутниковым прибором *SeaWiFS* с дополнительно выполненной обработкой, имевшей целью повышение

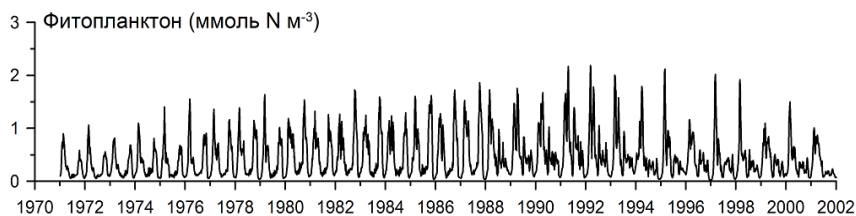
достоверности результатов измерений для региона Черного моря. Во-первых, часть стандартных результатов обработки была отбракована по специальным критериям, обнаруживающим грубые ошибки атмосферной коррекции (Суетин и др., 2008). Во-вторых, результаты определения концентрации хлорофилла уточнялись путем их согласования с существующим массивом прямых (*in situ*) измерений этой величины в море (Берсенева и др., 2004). В работе Дорофеева и др. (2008) приведены результаты этого тестирования. В частности, приведены примеры полей распределения поверхностного фитопланктона для разных сезонов: лета, осени и зимы. В поверхностном распределении концентрации фитопланктона отчетливо видны проявления синоптической динамики в Черном море: синоптические вихри, филаменты, грибовидные течения. По приведенным изображениям можно также наблюдать обмен биопродукцией между шельфовой зоной (особенно северо-западным шельфом) и открытой областью моря. Таким образом, было показано, что ассимиляция спутниковых измерений цвета моря в трехмерной междисциплинарной модели устраняет пробелы и позволяет получить непрерывный ряд полей распределения поверхностной концентрации фитопланктона для всего бассейна Черного моря. Использование модели дает также не только поверхностное распределение фитопланктона, но и ряд трехмерных полей всех компонентов экосистемы.

## Результаты

Описанная выше модель была апробирована, в том числе при моделировании долговременной изменчивости экосистемы Черного моря (1971-2001гг.). Как отмечалось во введении, этот период характеризуется существенной трансформацией морской экосистемы бассейна Черного моря. После относительно здорового состояния 60-х – начала 70-х годов прошлого столетия экосистема Черного моря испытала интенсивную эвтрофикацию. Выздоровление экосистемы Черного моря началось в середине 90-х и объясняется некоторыми защитными мерами, предпринятыми для контроля за антропогенным загрязнением и чрезмерным выловом рыбы. В работе Дорофеева и др. (2013) были представлены результаты моделирования эволюции экосистемы Черного моря в течение 30 лет с 1971 по 2001 год. На рис. 1, 2 изображены графики изменения со временем осредненных по площади бассейна поверхностных концентраций нитратов и суммарного фитопланктона в глубоководной части Черного моря за рассматриваемый период.

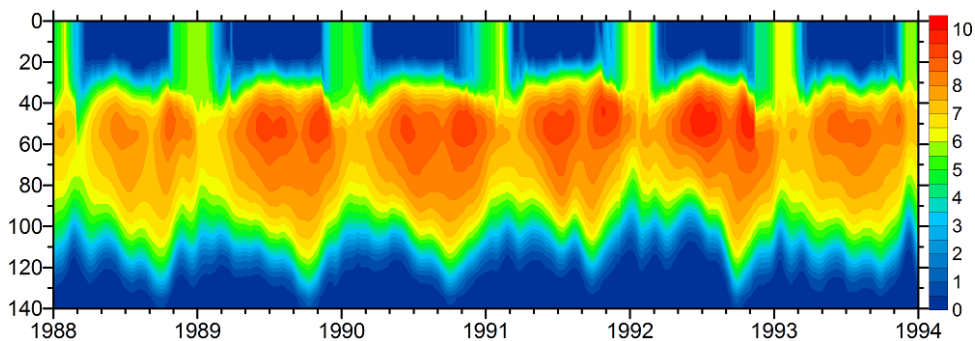


**Рисунок 1.** Временная эволюция средней по площади поверхностной концентрации нитратов



**Рисунок 2.** Временная эволюция средней по площади поверхностной концентрации фитопланктона

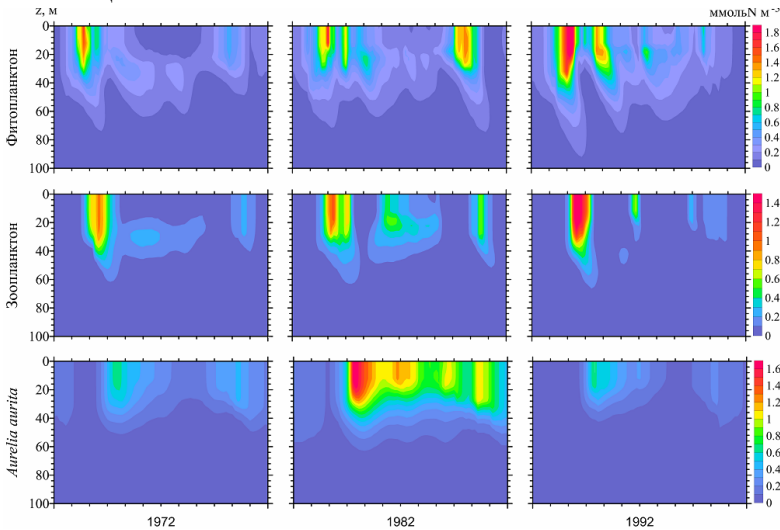
На приведенных графиках хорошо просматривается как сезонный ход, так и межгодовая изменчивость. Сезонный ход поверхностной концентрации нитратов имеет ярко выраженные пики в зимнее время, связанные с интенсивными зимними процессами перемешивания, в результате которых в поверхностный слой Черного моря поступает большое количество нитратов из нижележащих слоев. Затем они ассимилируются фитопланктоном в результате процесса фотосинтеза и в течение остального времени года концентрация нитратов у поверхности низка. На рис. 3 представлена вертикальная структура и временная изменчивость в течение шести лет средней по площади бассейна концентрации нитратов в верхнем 140-метровом слое Черного моря. Слой максимума нитратов располагается на глубине от 40 до 100 метров. У поверхности концентрация нитратов низкая в течение всего года, за исключением зимы. На рисунке видно, как в это время нитраты поднимаются к поверхности, соответственно их концентрация в слое максимума падает.



**Рисунок 3.** Эволюция средней концентрации нитратов ( $\text{ммоль N м}^{-3}$ ) в верхнем 140-метровом слое Черного моря

Помимо сезонного хода на рис. 1 хорошо видна межгодовая изменчивость, которая проявляется в изменении величины зимних пиков. В сезонном ходе поверхностной концентрации фитопланктона (рис. 2) выделяется весеннее цветение, являющееся откликом на аккумуляцию питательных веществ в верхнем слое зимой. Хорошо также видна межгодовая изменчивость величины весеннего максимума, которая связана со значением концентрации нитратов у поверхности моря в зимний период.

За рассматриваемый период изменения экосистемы Черного моря проявились не только в изменении биомассы ее компонентов, но и в изменении их сезонных циклов. Основное цветение фитопланктона происходит в конце зимы – начале весны, когда в поверхностном слое содержится большое количество нитратов и поступает достаточно солнечного света. За цветением фитопланктона следует всплеск роста популяции зоопланктона, который питается фитопланктоном. В результате содержание фитопланктона в поверхностном слое моря резко уменьшается. В свою очередь, зоопланктон поедается медузой *Aurelia aurita*. К концу весны происходит резкое увеличение ее популяции (цветение) и, как следствие, численность зоопланктона резко уменьшается. Необходимо отметить, что в годовом цикле фитопланктона заметными чертами являются также летний подповерхностный максимум и цветение в конце осени – начале зимы.



**Рисунок 4.** Сезонные циклы фитопланктона, зоопланктона и медузы *Aurelia aurita* для трех лет

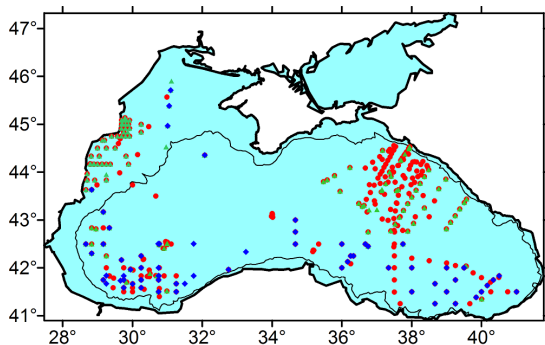
На рис. 4 показана сезонная эволюция концентраций трех компонентов экосистемы в верхнем 100-метровом слое глубоководной части моря для трех лет, соответствующих предэвтрофикационному состоянию экосистемы и периоду эвтрофикации. В 1982 г. интенсивность весеннего цветения фитопланктона стала выше по сравнению с началом 70-х годов. Кроме того, весенний максимум разбивается на два. Осеннее и летнее цветение также стали интенсивнее и имеют более сложную структуру, чем наблюдалось ранее. Весенний максимум в концентрации зоопланктона тоже разделился на два, расположенных близко по времени. Цветение медузы *Aurelia aurita* имеет несколько максимумов, самый большой из которых приходится на апрель – май. В 1992 г., когда в экосистеме появился и стал доминировать новый хищник гребневик *Mnemiopsis leidyi*, отмечается несколько периодов цветения фитопланктона, самое интенсивное из которых наблюдается в начале весны. Сезонный ход содержания зоопланктона в верхнем слое моря также имеет несколько пиков, при этом подповерхностный максимум в этом году не



наблюдается. Сезонный ход концентрации медузы *Aurelia aurita* примерно такой же, как в 1972 г.: имеется максимум в апреле – мае и затем второй максимум, меньшей интенсивности, в конце осени.

Таким образом, результаты моделирования динамики экосистемы Черного моря в течение тридцатилетнего периода продемонстрировали ее значительную изменчивость. Результаты численного моделирования в целом соответствуют тому поведению экосистемы Черного моря, которое известно по результатам многочисленных измерений биологических и геохимических параметров.

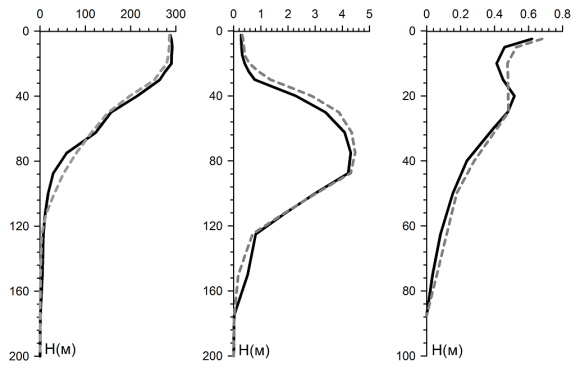
Важной частью описываемой системы диагноза-прогноза экосистемы Черного моря является ассимиляция данных измерений, выполненных спутниковыми цветовыми сканерами, на основе алгоритма, описанного выше. Для апробации совместной работы модели и алгоритма ассимиляции в течение длительного срока был проведен расчет эволюции экосистемы Черного моря на 15 лет (с 1998 по 2012 гг.). Такой выбор объясняется тем, что данные, полученные со световых сканеров, стали доступны с сентября 1997 года. Пространственное разрешение модели 4.8 км, что соответствует сетке модели циркуляции. Для ассимиляции использовались двухнедельные поля поверхностной концентрации хлорофилла *a*, подготовленные на основе продуктов *SeaWiFS*, *MODIS* и *MERIS* по разработанному специально для Черного моря алгоритму (Суслин и др., 2008; Suslin, Churilova, 2016). В результате проведенных расчетов был получен набор трехмерных биогеохимических полей Черного моря на регулярной сетке и дискретностью по времени в одни сутки..



**Рисунок 5.** Места выполнения измерений концентраций кислорода, нитратов, хлорофилла

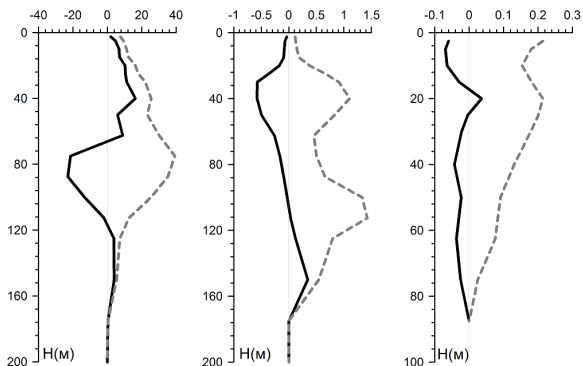
Качество полученных полей оценивалось путем сравнения с данными измерений. За рассматриваемый период контактных биологических измерений в Черном море было проведено сравнительно немного. Была использована междисциплинарная океанографическая база данных для Черного моря, составленная в рамках проекта «NATO Science for Stability TU-Black Sea project». Для сравнения с результатами моделирования использовались *in-situ* измерения кислорода, нитратов и хлорофилла *a*, как наиболее обеспеченные данными. На рис. 5 приведена карта с обозначенными положениями станций, на которых производились измерения этих параметров и которые использовались при сравнении, при этом часть данных была отбракована. Красным цветом показаны станции, где проводились измерения кислорода, зеленым –

нитратов, синим – хлорофилла. Результаты моделирования интерполировались по времени и по пространству в те моменты времени и точки, где имелись данные измерений. На рис. 6 приведены средние профили концентраций растворенного кислорода, нитратов и хлорофилла *a*, полученные по данным измерений (сплошные линии) и по результатам расчетов (пунктирные линии).



**Рисунок 6.** Средние профили (ммоль  $\text{м}^{-3}$ ), нитратов (ммоль  $\text{N м}^{-3}$ ) и хлорофилла *a* ( $\text{мг м}^{-3}$ ) (слева – направо)

Для глубоководной части моря средние профили концентрации растворенного кислорода достаточно близки до глубины порядка 70 м, затем результаты моделирования имеют более высокие значения. Для нитратов основным отличием является то, что верхний нитроклин в модельных данных расположен несколько выше, чем в данных измерений. Профили концентрации хлорофилла, полученные по результатам моделирования и по данным измерений, также достаточно близки один к другому. Для более детального анализа различий между результатами моделирования и измерениями на рис. 7 приведены профили отклонения модельных значений концентрации четырех элементов экосистемы от измеренных значений (сплошные линии). На этих же графиках представлены среднеквадратичные отклонения (пунктирные линии).



**Рисунок 7.** Профили среднего и среднеквадратичного отклонения концентраций кислорода (ммоль  $\text{м}^{-3}$ ), нитратов (ммоль  $\text{N м}^{-3}$ ) и хлорофилла *a* ( $\text{мг м}^{-3}$ ) (слева – направо)

Наибольшие среднеквадратичные отклонения модельных значений концентрации растворенного кислорода наблюдаются на глубине 80 м. Это происходит из-за того, что оксиклин по результатам моделирования шире по

---

сравнению с данными измерений. Так как верхний нитроклин в модельных данных расположен несколько выше, чем в данных измерений, то существует систематическая ошибка в распределении нитратов с максимумом на глубине около 40 м. Среднеквадратичное отклонение для профилей нитратов имеет два максимума на горизонтах 40 и 110 м. Эти горизонты соответствуют средним положениям верхнего и нижнего нитроклинов. Хотя в средних профилях они достаточно близки, а нижний нитроклин практически совпадает, большие градиенты концентрации нитратов даже при незначительных ошибках в положении нитроклина приводят к значительным значениям среднеквадратичного отклонения. Наибольшие среднеквадратичные отклонения профилей хлорофилла наблюдаются у поверхности и на горизонте 20 м. У поверхности эта ошибка вызвана средним превышением модельной концентрации в приповерхностном слое. Максимум на глубине 20 м связан с тем, что в весенний и летний сезоны (когда выполнено большинство измерений) на этой глубине наблюдаются максимальные градиенты концентрации фитопланктона (см. рис. 6). В целом сравнение показало, что полученные в результате моделирования параметры экосистемы Черного моря не только качественно, но и количественно согласуются с имеющимися данными измерений.

Описанные выше модель и алгоритм ассимиляции спутниковых данных применяются в работающей в МГИ РАН системе диагноза-прогноза состояния экосистемы Черного моря. Результаты работы системы мониторинга обновляются каждые сутки. Расчет начинается за 4 суток от текущей даты и имеет продолжительность 9 суток. Модель экосистемы использует при этом результаты диагноза-прогноза гидрофизических полей. Таким образом, система в течение первого периода ассимилирует вновь поступившие данные и затем дает прогноз на 120 часов. Выход работы системы диагноза-прогноза представляет собой массивы распределений концентраций компонентов экосистемы с частотой выдачи в сутки. Эту информацию можно найти на сайте <http://mis.bsmfc.net:8080/thredds/catalog.html>, где помимо изображений карт представлены числовые данные.

### Дискуссия

В работе описана система диагноза и прогноза состояния экосистемы Черного моря, являющейся частью черноморских прогнозов, которые дает центр мониторинга и прогноза, созданный в Морском Гидрофизическом институте РАН. Продукты центра доступны свободно через интернет для всех заинтересованных пользователей. Черноморские прогнозы основаны на использовании четырех математических моделей морской среды, одна из которых – модель экосистемы, рассмотренная в данной работе. Для того, чтобы понять насколько эта модель хорошо описывает биогеохимические процессы в Черном море, она была апробирована, в частности, при моделировании долговременной тридцатилетней изменчивости эволюции экосистемы Черного моря (1971-2001 гг.). Модель достаточно адекватно воспроизвела основные трансформации экосистемы в течение рассматриваемого периода. Другой важной

---

особенностью работы системы диагноза и прогноза является ассимиляция спутниковых данных. В данном случае – это измерения цветковых сканеров. Для тестирования алгоритма ассимиляции был проведен пятнадцатилетний расчет, результаты которого сравнивались с контактными измерениями концентраций кислорода, нитратов и хлорофилла *a*. Это сопоставление показало, что результаты моделирования достаточно хорошо согласуются с данными измерений.

Работающая система диагноза и прогноза может быть модернизирована и расширена. В частности, можно увеличить количество выдаваемых продуктов. Кроме того, выдаваемые системой биогеохимические поля могут использоваться в качестве граничных и начальных условий для моделирования региональных прибрежных экосистем с более высоким пространственным разрешением. В целом, описанная в работе система представляется перспективной для мониторинга состояния морской экосистемы и может быть основой для разработки аналогичных систем для других морей России.

### Список литературы

Берсенева Г.П., Чурилова Т.Я., Георгиева Л.В. 2004. Сезонная изменчивость хлорофилла и биомассы фитопланктона в западной части Черного моря. – *Океанология*, т. 44, № 3, с. 389-398.

Гандин Л.С., Каган Р.Л. 1976. Статистические методы интерполяции метеорологических данных. – Ленинград, Гидрометеиздат, 359 с.

Дорофеев В.Л., Огуз Т., Коротаев Г.К. 2005. Моделирование биологической изменчивости Черного моря. – В сб.: *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – Севастополь, вып. 12, с. 71-82.

Дорофеев В. Л., Коротаев Г. К., Суетин В.С., Сухих Л. И. 2008. Ассимиляция спутниковых изображений цвета моря в междисциплинарной модели экосистемы Черного моря. – В сб.: *Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа*. – Севастополь, вып. 16, с. 323-332.

Дорофеев В. Л., Коротаев Г. К., Сухих Л. И. 2013. Исследование долговременной изменчивости полей Черного моря с использованием междисциплинарной физико-биогеохимической модели. – *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, т. 49, № 6, с. 1-11.

Суетин В.С., Королев С.Н., Суслин В.В., Кучерявый А.А. 2008. Уточненная интерпретация данных наблюдений Черного моря спутниковым прибором SeaWiFS осенью 1998 г. – *Морской гидрофизический журнал*, № 2, с. 68-79.

Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М. 2008. Региональный алгоритм расчета концентрации хлорофилла *a* в Черном море по спутниковым данным SeaWiFS. – *Морской экологический журнал*, № 2, с. 24-42.

Daskalov G.M. 2003. Long-term changes in fish abundance and environmental indices in the Black Sea. – *Marine Ecology Progress Series*, vol. 255, pp. 259-270.

---

---

Gregoire M., Nezlin N., Kostianoy A., Soetaert K. 2004. Modeling the nitrogen cycling and plankton productivity in an enclosed environment (the Black Sea) using a three-dimensional coupled hydrodynamical-ecosystem model. – *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, C05007.

Gregoire M., Raick C., Soetaert K. 2008. Numerical modeling of the central Black Sea ecosystem functioning during the eutrophication phase. – *Progress in Oceanography*, vol. 76, pp. 286-333.

Konovalov S.K, Murray J.W. 2001. Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960-1995). – *Journal of Marine Systems*, vol. 31, pp. 217-243.

Lancelot C., Staneva J., Van Eeckhout D., Beckers J., Stanev, E. 2002. Modelling the danube-influenced north-western continental shelf of the Black Sea. II: ecosystem response to changes in nutrient delivery by danube river after its damming in 1972. – *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, vol. 54, pp. 473-499.

Oguz T., Ducklow H.W., Malanotte-Rizzoli P., J. W. Murray, E.A. Shushkina, V.I. Vedernikov, U. Unluata U. 1999. A physical-biochemical model of plankton productivity and nitrogen cycling in the Black Sea. – *Deep-Sea Res. Part I*, vol. 46, pp. 597-636.

Oguz T., Ducklow H.W., Malanotte-Rizzoli P. 2000. Modeling distinct vertical biochemical structure of the Black Sea: Dynamical coupling of the oxic, suboxic, and anoxic layers. – *Global biochemical cycles*, vol. 14, No. 4, pp. 1331-1352.

Oguz T., Ducklow H.W., Purcell J.E., Malanotte-Rizzoli P. 2001. Modeling the response of top-down control exerted by gelatinous carnivores on the Black Sea pelagic food web. – *Journal of Geophysical Research*, vol. 106, No. C3, pp. 4543-4564.

Oguz, T., Gilbert, D. 2007. Abrupt transitions of the top-down controlled Black Sea pelagic ecosystem during 1960-2000: evidence for regime shifts under strong fishery exploitation and nutrient enrichment modulated by climate-induced variations. – *Deep Sea Research, Part I*, vol. 54, pp. 220-242.

Suslin V., Churilova T. 2016. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll- $\alpha$  and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480-560 nm bands from ocean colour scanners. – *International Journal of Remote Sensing*, vol. 37, No. 18. pp. 4380-4400.

Zaitsev, Y.P., Mamaev, V. 1997. *Marine Biological Diversity in the Black Sea: A Study of Change and Decline*. GEF Black Sea Environmental Programme. – New York, United Nations Publications, 208 p.

## References

Berseneva G.P., Churilova T.Ja., Georgieva L.V. 2004. Sezonnaya izmenchivost' hlorofilla i biomassy fitoplanktona v zapadnoj chasti Chernogo moray [Seasonal variability in pigment concentration, taxonomic structure of phytoplankton community in western part of the Black Sea]. *Okeanologiya – Oceanology*, vol. 44, no. 3, pp. 389-398.

---

---

Gandin L.S., Kagan R.L. 1976. *Statisticheskie metody interpoliatsii meteorologicheskikh dannyh* [Statistical methods of meteorological data interpolation]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 359 p.

Dorofeyev V.L., Oguz T., Korotaev G.K. 2005. Modelirovanie biologicheskoy izmenchivosti Chernogo moray [Modeling the biological variability of the Black Sea]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological safety of coastal and shelf zones and comprehensive use of shelf resources], Sevastopol, ECOSI-Gidrofizika, no. 12, pp. 71-82.

Dorofeyev V. L., Korotaev G. K., Suetin V.S., Sukhikh L.I. 2008. Assimilyatsiya sputnikovykh izobrazhenij tsveta morya v mezhdistsiplinarnoj modeli ekosistemy Chernogo moray [Assimilation of satellite color imagery in multy-disciplinary model of the Black Sea ecosystem]. *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoy i shel'fovoy zon i kompleksnoe ispol'zovanie resursov shel'fa* [Ecological safety of coastal and shelf zones and comprehensive use of shelf resources], Sevastopol, ECOSI-Gidrofizika, no. 16, pp. 323-332.

Dorofeyev V.L., Korotaev G.K., Sukhikh L.I. 2013. Issledovanie dolgovremennoj izmenchivosti polej Chernogo morya s ispol'zovaniem mezhdisciplinarnoj fiziko-biogeohimicheskoy modeli [Study of long-term variations in the Black Sea fields using an interdisciplinary physical and biogeochemical model]. *Izvestiia RAN. Fizika atmosfery i okeana – Izvestiya RAS. Physics of atmosphere and ocean*, vol. 49, no. 6, pp. 1-11.

Suetin, V. S., Korolev S. N., Suslin V. V., Kucheryavy A. A. 2008. Utochnennaya interpretatsiya dannykh nablyudenij Chernogo morya sputnikovym priborom SeaWiFS osen'yu 1998 g. [Specified Interpretation of the Black Sea Satellite Observation Data Provided by SeaWiFS in Autumn 1998]. *Morskoy gidrofizicheskij zhurnal – Marine Hydrophysics Journal*, no. 2, pp. 68-79.

Suslin V.V., Churilova T.Ja., Sosik H.M. 2008. Regional'nyj algoritm rascheta koncentracii chlorofilla- $\alpha$  v Chernom more po sputnikovym dannym SeaWiFS [The SeaWiFS algorithm of chlorophyll  $\alpha$  in the Black Sea]. *Morskoy ekologicheskij zhurnal – Marine Ecological Journal*, no. 2, pp. 24-42.

Daskalov G.M. 2003. Long-term changes in fish abundance and environmental indices in the Black Sea. – *Marine Ecology Progress Series*, vol. 255, pp. 259-270.

Gregoire M., Nezlin N., Kostianoy A., Soetaert K. 2004. Modeling the nitrogen cycling and plankton productivity in an enclosed environment (the Black Sea) using a three-dimensional coupled hydrodynamical-ecosystem model. – *Journal of Geophysical Research*, vol. 109, C05007.

Gregoire M., Raick C., Soetaert K. 2008. Numerical modeling of the central Black Sea ecosystem functioning during the eutrophication phase. – *Progress in Oceanography*, vol. 76, pp. 286-333.

Konovalov S.K, Murray J.W. 2001. Variations in the chemistry of the Black Sea on a time scale of decades (1960-1995). – *Journal of Marine Systems*, vol. 31, pp. 217-243.

---

---

Lancelot C., Staneva J., Van Eeckhout D., Beckers J., Stanev, E. 2002. Modelling the danube-influenced north-western continental shelf of the Black Sea. II: ecosystem response to changes in nutrient delivery by danube river after its damming in 1972. – Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 54, pp. 473-499.

Oguz T., Ducklow H.W., Malanotte-Rizzoli P., J. W. Murray, E.A. Shushkina, V.I. Vedernikov, U. Unluata U. 1999. A physical-biochemical model of plankton productivity and nitrogen cycling in the Black Sea. – Deep-Sea Res. Part I, vol. 46, pp. 597-636.

Oguz T., Ducklow H.W., Malanotte-Rizzoli P. 2000. Modeling distinct vertical biochemical structure of the Black Sea: Dynamical coupling of the oxic, suboxic, and anoxic layers. – Global biochemical cycles, vol. 14, No. 4, pp. 1331-1352.

Oguz T., Ducklow H.W., Purcell J.E., Malanotte-Rizzoli P. 2001. Modeling the response of top-down control exerted by gelatinous carnivores on the Black Sea pelagic food web. – Journal of Geophysical Research, vol. 106, No. C3, pp. 4543-4564.

Oguz, T., Gilbert, D. 2007. Abrupt transitions of the top-down controlled Black Sea pelagic ecosystem during 1960-2000: evidence for regime shifts under strong fishery exploitation and nutrient enrichment modulated by climate-induced variations. – Deep Sea Research, Part I, vol. 54, pp. 220-242.

Suslin V., Churilova T. 2016. A regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and coloured detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean colour scanners. – International Journal of Remote Sensing, vol. 37, No. 18. pp. 4380-4400.

Zaitsev, Y.P., Mamaev, V. 1997. Marine Biological Diversity in the Black Sea: A Study of Change and Decline. GEF Black Sea Environmental Programme. – New York, United Nations Publications, 208 p.

*Статья поступила в редакцию: 04.04.2017*

*После переработки: 26.04.2017*