

УДК 551.465.7

© В.А.Горчаков, А.Ю.Дворников, В.А.Рябченко, С.С.Пугалова, 2013
Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН
vikfioran@yandex.ru

МЕЖГОДОВАЯ И СЕЗОННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ХАРАКТЕРИСТИК ЭКОСИСТЕМЫ В КАНАРСКОМ АПВЕЛЛИНГЕ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТРЕХМЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ)

На основе трехмерной эко-гидродинамической модели воспроизведены физические и биогеохимические характеристики океана в районе Центральновосточной Атлантики, включающем область Канарского апвеллинга, для периода 1958–2006 гг. С помощью модели были выявлены две особенности в распределении характеристик экосистемы: существование области пониженных значений поверхностной концентрации хлорофилла «а» и интегральной первичной продукции в прибрежной зоне, а также наличие подповерхностного максимума в вертикальном распределении концентрации хлорофилла «а», расположенного глубже границы, доступной для дистанционного зондирования.

Ключевые слова: Канарский апвеллинг, моделирование экосистем, биогеохимические циклы, межгодовая изменчивость.

Оценивая изменчивость гидротермодинамических процессов в Мировом океане с точки зрения их влияния на погодные и климатические факторы, определяющие хозяйственную деятельность, нельзя обойти вниманием влияние этих процессов на биологическую продуктивность рыбопромысловых зон. Поскольку биомасса фито- и зоопланктона, определяющая кормовую базу молоди промысловых рыб, зависит от наличия минерального питания (биогенов), освещенности и температуры, для оценки влияния изменчивости гидротермодинамических процессов в Мировом океане на продуктивность районов интенсивного рыболовства, необходимо иметь точное количественное описание механизма функционирования всей пелагической экосистемы в изменяющихся условиях океана, вызванных колебаниями климата, и прежде всего знать, как физические факторы среды влияют на фито- и зоопланктон.

В настоящей работе исследуется оценка влияния климатических изменений физических и химических параметров среды на пространственно-временную изменчивость характеристик экосистемы Мирового океана на примере района Центральновосточной Атлантики (ЦВА), включающего систему Канарского апвеллинга. Данный район принадлежит к наиболее продуктивным районам океана, в которых ведется интенсивное рыболовство. С этой целью выполнены расчеты физических и биогеохимических характеристик океана в ЦВА по объединенной физико-биологической модели для периода 1958–2006 гг.

В настоящее время существует целый ряд работ, посвященных моделированию особенностей функционирования морских экосистем в Атлантическом океане, например [1, 2]. Однако для рассматриваемого района Канарского апвеллинга можно указать только две. Это работа [3], в которой на основе четырехкомпонентной модели экосистемы исследовалось влияние факторов, определяющих биологическую продуктивность в зонах апвеллинга, и работа [4], где более сложная одиннадцатикомпонентная модель использовалась для воспроизведения сезонного хода характеристик мор-

ской экосистемы района ЦВА для условий 1958 г. Подчеркнем, что ни в одной из вышеупомянутых работ не рассматривалась межгодовая изменчивость экосистемы.

Воспроизведенный в работе [4] сезонный ход характеристик морской экосистемы исследуемого района позволил выявить основные черты их пространственно-временной изменчивости и связь с особенностями циркуляции. К сожалению, выполненный анализ носил преимущественно качественный характер, поскольку экспедиционные данные для воспроизводимых условий 1958 г. отсутствуют. Рассматриваемый в настоящей работе численный эксперимент по воспроизведению физических и биогеохимических характеристик океана в ЦВА для периода 1958–2006 гг. обеспечил возможность сравнения с данными наблюдений, включающих данные экспедиций Атлант НИРО [5], проводимых с 1994 г. по настоящее время, и спутниковых наблюдений поверхностной концентрации хлорофилла «а», проводимых с конца 1990-х годов прошлого столетия [6].

Как и в [4], численный эксперимент выполнялся с использованием трехмерной эко-гидродинамической модели, созданной на основе объединения модели циркуляции океана, разработанной в Институте вычислительной математики РАН (ИВМ РАН), и модели экосистемы океана, разработанной в Санкт-Петербургском филиале Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН (СПбФ ИО РАН).

Модель, условия расчета и данные наблюдений. Модель циркуляции океана ИВМ РАН [7, 8] основана на полных уравнениях динамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики, записанных в сферической системе координат. Основными прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, потенциальная температура и соленость. Модель экосистемы верхнего слоя океана СПбФ ИО РАН [9, 10] описывает океанский цикл азота и включает 11 независимых переменных: биомассы фитопланктона, зоопланктона и бактериопланктона, детрит, концентрации нитратов и аммония, концентрации лабильного растворенного органического азота и углерода, концентрации полулабильного растворенного органического азота и углерода, концентрацию растворенного кислорода. Объединенная эко-гидродинамическая модель использовалась для воспроизведения физических и биогеохимических характеристик океана в ЦВА для периода с 1958–2006 гг. В процессе выполнения численных экспериментов, как и в случае воспроизведения физических и биогеохимических характеристик океана в ЦВА для условий 1958 г., было выделено две области: 1) акватория Северной и Центральной Атлантики, ограниченная с запада и востока побережьем материков, а на севере и юге – жидкими границами на параллелях 78° с.ш. и 19° ю.ш. соответственно; 2) район ЦВА, ограниченный с юга и севера параллелями 15° и 28° с.ш., берегом на востоке и меридианом 18° з.д. на западе. В обеих областях горизонтальный шаг сетки составлял 0.25° , количество σ -уровней было равно 27, распределение которых по вертикали приведено в [4]. Уравнения гидродинамической модели интегрировались для всей Северной и Центральной Атлантики, тогда как уравнения модели экосистемы решались только для района ЦВА.

В качестве внешней информации, необходимой для расчета потоков импульса, тепла и влаги на океанской поверхности, как и в [4], привлекались данные об атмосферных характеристиках, подготовленных в рамках программы CORE [11] для экспериментов с моделями океана и льда. Суточный ход поглощенной солнечной радиации на поверхности океана, необходимый для расчета суточного хода фотосинтетически активной радиации (ФАР) в верхнем слое океана, восстанавливался по ее средним суточным значениям, содержащимся в архиве CORE. На момент выполнения численных экспериментов база данных CORE включала данные за 1958–2006 гг.

Используемые в численном эксперименте условия на открытых границах как первой, так и второй области полностью соответствовали эксперименту по воспроизведению характеристик океана для условий 1958 г., описанному в [4]. Так, на жидких границах первой модельной области задавались значения ежемесячных климатических данных температуры и солености из архива [12] с шагом по пространству 0.25° , интерполированные на модельный временной шаг. На открытых боковых границах второй модельной области (район ЦВА) были заданы значения концентрации нитратов, полученные линейной интерполяцией климатических средних месячных полей из архива [13]. Для остальных переменных экосистемы на всех боковых границах были заданы условия излучения для вытекающей жидкости и отсутствия потока примеси для втекающей жидкости.

В качестве начальных условий были заданы поля биогеохимических характеристик на 1 января 1958 г., полученные в результате интегрирования совместной модели в течение двух лет при атмосферных воздействиях 1958 г. [4]. Значения параметров модели, использованные в расчете для условий 1958 г., были приняты и при интегрировании на весь период 1958–2006 гг. Начальное распределение термогидродинамических характеристик заимствовалось из решения гидродинамической модели ИВМ РАН, полученного для указанной выше акватории Северной и Центральной Атлантики на период 14 лет модельного времени.

Расчет по совместной модели с описанными выше условиями был начат с 1 января 1958 г. После 20 лет интегрирования выяснилось, что используемые на жидких границах условия не обеспечивают баланса нитратов в глубинных слоях расчетной области. Отсутствие баланса нитратов в глубинных слоях привело к их постепенному накоплению и росту значений до величин, многократно превосходящих наблюдаемые. Следствием аномального увеличения концентрации нитратов в глубинных слоях явились существенное увеличение их значений в поверхностных слоях и соответственно неограниченный рост фито- и зоопланктона. Для исключения данного артефакта в области ЦВА, начиная с некоторой фиксированной глубины h_N , распределение нитратов не вычислялось, а задавалось путем линейной интерполяцией климатических средних месячных полей архива [13]. Повторный расчет продолжался с 1 января 1958 г. по 31 декабря 2006 г.

Одной из существенных проблем моделирования морских экосистем является их верификация. Регулярно проводимые с 1994 г. рейсы научно-исследовательских судов Атлант НИРО позволили накопить определенную информацию о следующих характеристиках экосистемы в исследуемом районе ЦВА: концентрации фосфатов, растворенного кислорода и нитратов, концентрации хлорофилла, а также первичной продукции фитопланктона. Наибольшее количество данных за рассматриваемый период было получено для температуры, солености, фосфатов и растворенного кислорода, которые измерялись во всех экспедициях. Максимально освещенными оказались зимний и летний периоды. Из рассматриваемых 13 лет (в 2002 г. экспедиции не проводились) только в трех из них (1998, 1999, 2005 гг.) есть данные для весны и только в двух (1995 и 2003 гг.) – данные для осеннего периода. Еще хуже обстоит дело с данными по хлорофиллу и первичной продукции: эти характеристики измерялись только в период 1994–2000 гг., причем данные для зимы и весны есть только для 3 лет из 7, а для осени вообще отсутствуют. Нитраты практически не измерялись: небольшое число данных есть только для февраля 1995 г., августа 2006 г., июля–августа 2007 г. Таким образом, количество имеющихся данных и недостаточное временное покрытие ими исследуемой области не позволяют провести полноценный сравнительный анализ данных наблюдений и результатов модельных расчетов. В ча-

стности, рейсовые измерения, выполненные Атлант НИРО, характеризуются постоянным изменением местоположения станций, что не позволяет проследить быстрые внутригодовые изменения (вспышки продуктивности) характеристик экосистемы в конкретном небольшом районе. Таким образом, экспедиционные данные о концентрации нитратов и хлорофилла, первичной продукции из-за их малочисленности могут быть использованы только для оценки того, насколько правильно модель воспроизводит характерные значения упомянутых характеристик. Из-за отсутствия в данном районе в рассматриваемый период достаточного объема натурных наблюдений для оценки результатов моделирования использовались данные о хлорофилле «а» из базы данных спутниковых измерений NASA [6] (Национальное управление США по аэронавтике и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration)).

Анализ результатов расчета. Приведенные на рис.1, а результаты расчета средней по исследуемому району ЦВА температуры поверхности океана (ТПО) демонстрируют сезонные колебания характеристики с размахом около 6°C и максимумом во второй половине сентября–первой половине октября.

Рассчитанные значения ТПО хорошо согласуются с имеющимися спутниковыми данными за 2000–2006 гг. [6] (рис.1, б), однако рассчитанная температура оказалась несколько ниже наблюдаемой, но не более чем на 1.5°C . Изменения средней годовой температуры за период 2000–2006 гг. составляют 0.9 и 1.0°C , согласно результатам расчетов и спутниковым измерениям соответственно.

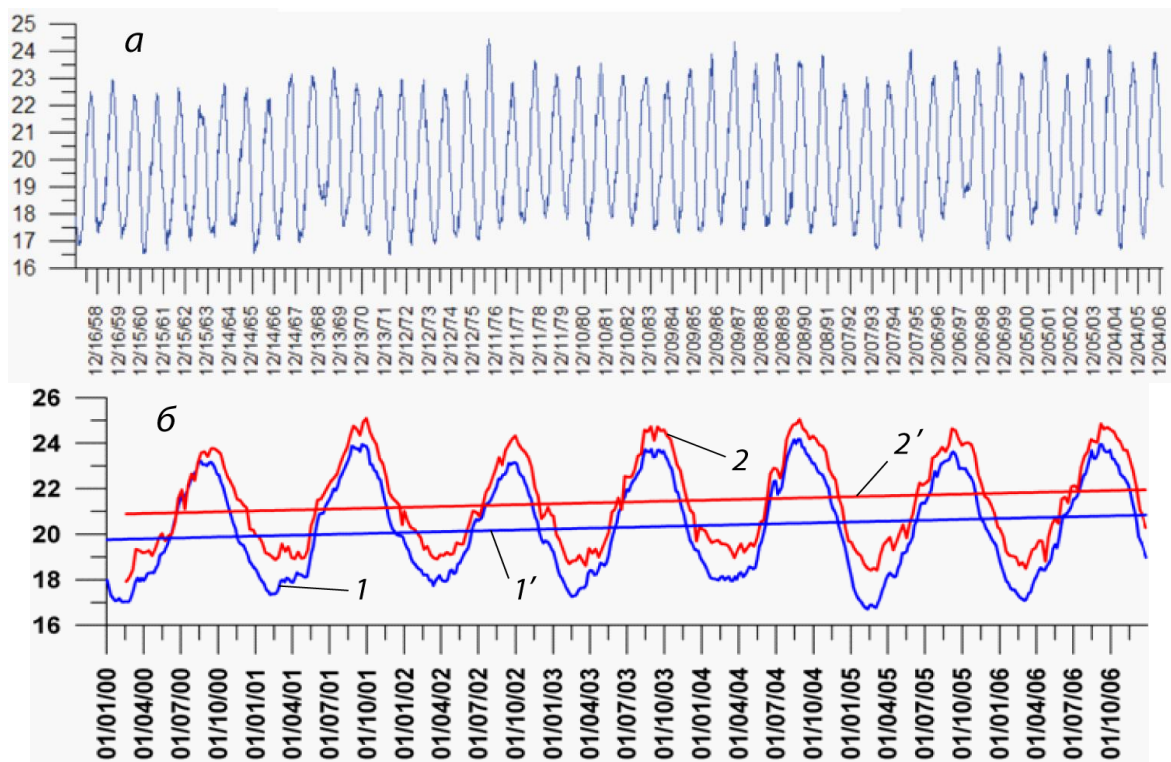


Рис.1. Временная эволюция средней температуры (в $^{\circ}\text{C}$) поверхности океана по исследуемому району ЦВА.

а – результаты расчетов по эко-гидродинамической модели с 1958 по 2006 г.;
б – результаты расчетов (1) и данные спутника MODIS (2) для периода с 2000 по 2006 г.
Линии (1'), (2') – линейный тренд в изменениях характеристики соответственно.

Рассчитанные и наблюдаемые горизонтальные распределения температуры и солености сравнивались путем сопоставления экспедиционных данных Атлант НИ-РО [5] с модельными распределениями, осредненными за период выполнения экспедиций. Анализ продемонстрировал, что рассчитанные распределения температуры и солености качественно правильно воспроизводят наблюдаемые особенности этих полей с небольшими количественными отличиями. Так, например, весной 1998 г. (26 февраля–5 апреля) рассчитанные распределения температуры и солености на горизонте $z = 10$ м имеют количественные отличия от наблюдаемых около 2°C по температуре и 0.5 ‰ по солености в сторону занижения. Существующие межгодовые изменения полей температуры и солености также хорошо воспроизводятся моделью, как и сезонные. В частности, весной 1999 г. (3 апреля–1 мая, т.е. в более поздний период, чем в 1998 г.) температура в северной части исследуемого района ЦВА была на 2°C , а соленость на 0.5 ‰ ниже, чем в 1998 г. Основное отличие летних распределений ТПО от ее зимних и весенних распределений – значительное увеличение температуры в южной части ЦВА, причем в 1999 г. это увеличение оказалось заметно больше, чем в 1998 г. (на 3°C).

Сравнение оценок первичной продукции (рис.2) свидетельствует о том, что модель завышает среднегодовой уровень продукции, правильно воспроизводит размах ее внутригодовых колебаний и время наступления минимума, приводит к запаздыванию времени достижения максимальных значений. Модельные оценки первичной продукции завышены на 30–40 % и более чем в 2 раза по сравнению со спутниковыми оценками по методу Эппли [6] и углеродному методу [6] соответственно. Это расхождение может быть связано с занижением толщины фотического слоя в спутниковых оценках первичной продукции, которая оценивается по поверхностной концентрации хлорофилла. Спутниковые данные о поверхностной концентрации хлорофилла заметно превышают судовые значения, что приводит к заниженным значениям толщины фотического слоя. Межгодовые изменения средних годовых значений первичной продукции за период 1998–2006 гг. составляют $+60$, -100 и $+50\text{ мгС м}^{-2}\text{ сут}^{-1}$ ($+6$, -13 и $+12\text{ ‰}$ средних годовых значений) соответственно по результатам расчета, по версии Эппли стандартного метода и по углеродному методу.

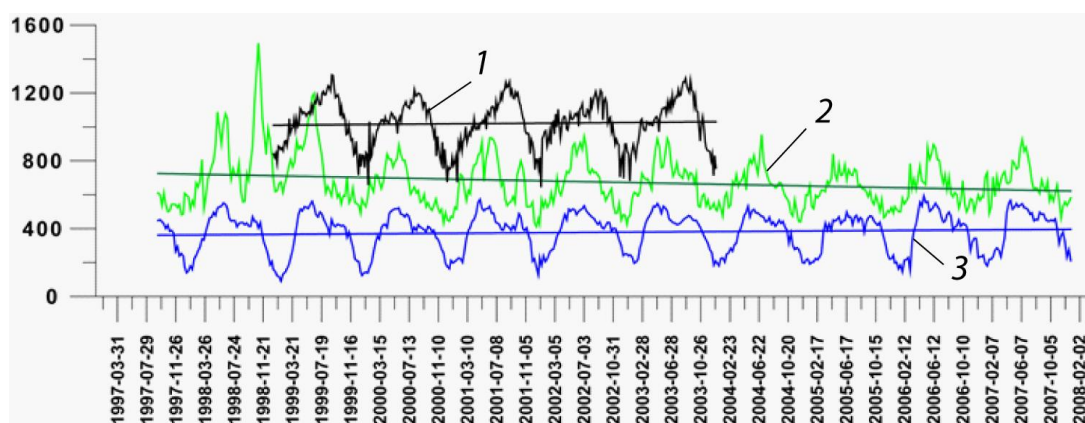


Рис.2. Временная эволюция средней по исследуемому району ЦВА первичной продукции (в $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) фитопланктона в 1998–2006 гг.

1 – результат модельного расчета, 2, 3 – оценки по спутниковым данным соответственно по версии Эппли стандартного метода и углеродному методу.

Таким образом, выполненное сравнение модельного решения с данными наблюдений показало, что модель правильно как качественно, так и количественно воспроизводит сезонную и межгодовую изменчивость гидрофизических характеристик. Этого нельзя сказать о воспроизведении изменчивости биогеохимических характеристик. В ряде случаев отмечаются существенные расхождения между моделью и спутниковыми данными, проявляющимися в несовпадении фаз сезонных колебаний значений хлорофилла «а» и занижении моделью максимальных значений этой характеристики.

Для выяснения причин указанных расхождений выполнены численные эксперименты по чувствительности решения уравнений модели экосистемы к плохо известным модельным параметрам, таким как скорость смертности фитопланктона и зоопланктона, параметры процесса потребления и усвоения пищи зоопланктоном, скорость гравитационного опускания и скорость разложения детрита, а также к граничным условиям для нитратов, задаваемым по климатическим данным архива [13]. В процессе экспериментов оценивалось способность каждого из перечисленных параметров влиять на изменение фаз сезонных колебаний значений хлорофилла «а» и максимальных значений этой характеристики. Согласно результатам расчетов, модельное решение оказалось наиболее чувствительным к максимальной скорости потребления пищи зоопланктоном g_m и глубине h_N , ниже которой значение концентрации нитратов задавалось. Были найдены оптимальные значения этих параметров, при которых полученное решение демонстрировало наилучшее согласие с имеющимися данными наблюдений о концентрации хлорофилла «а» и первичной продукции фитопланктона.

Для оценки качества воспроизведения временной изменчивости характеристик морской экосистемы на рис.3 и 4 представлено сравнение поверхностной концентрации хлорофилла «а» и интегральной по фотическому слою первичной продукции модельного решения с данными измерений спутника SeaWiFS. Учитывая сильную пространственную изменчивость этих характеристик, особенно между прибрежной зоной и открытым морем, исследуемый район был разделен на три широтные зоны – северную (28–35°с.ш.), центральную (20–28°с.ш.) и южную (15–20°с.ш.). Каждая из этих зон, в свою очередь, делится на прибрежную зону шириной 2° и открытое море.

Основные различия между данными спутника SeaWiFS [6] и результатами модельных расчетов для шести выделенных районов в период 1998–2004 гг. сводятся к следующим. Во-первых, модель недооценивает как концентрацию хлорофилла «а», так и интегральную первичную продукцию в прибрежных зонах и переоценивает их в открытом море. Это, скорее всего, связано с недостаточным разрешением (0.25°) модели по горизонтали, приводящим к пространственному сглаживанию решения. Во-вторых, рассчитанные моменты наступления максимумов и минимумов в годовом ходе согласуются с их оценками по спутниковым данным лучше в случае интегральной первичной продукции, чем в случае поверхностной концентрации хлорофилла «а» (ср. рис.3 и 4). Самые большие расхождения в фазовых сдвигах отмечаются в прибрежной зоне южной части района ЦВА. Скорее всего, это связано с сильным влиянием на решение граничных условий на южной границе модельной области, где практически в течение всего года отмечаются течения северных направлений. В таких условиях задание климатических значений концентраций нитратов на этой границе приводит к поступлению в область значительного количества нитратов и последующих всплесков первичной продукции в периоды времени, несогласованные с межгодовой изменчивостью течений, обусловленной заданными атмосферными воздействиями.

В целом сравнение результатов модельных расчетов временной (сезонной и межгодовой) изменчивости интегральных характеристик экосистемы, выполненных при оптимальном наборе параметров, свидетельствует об их неплохом соответствии с данными наблюдений.

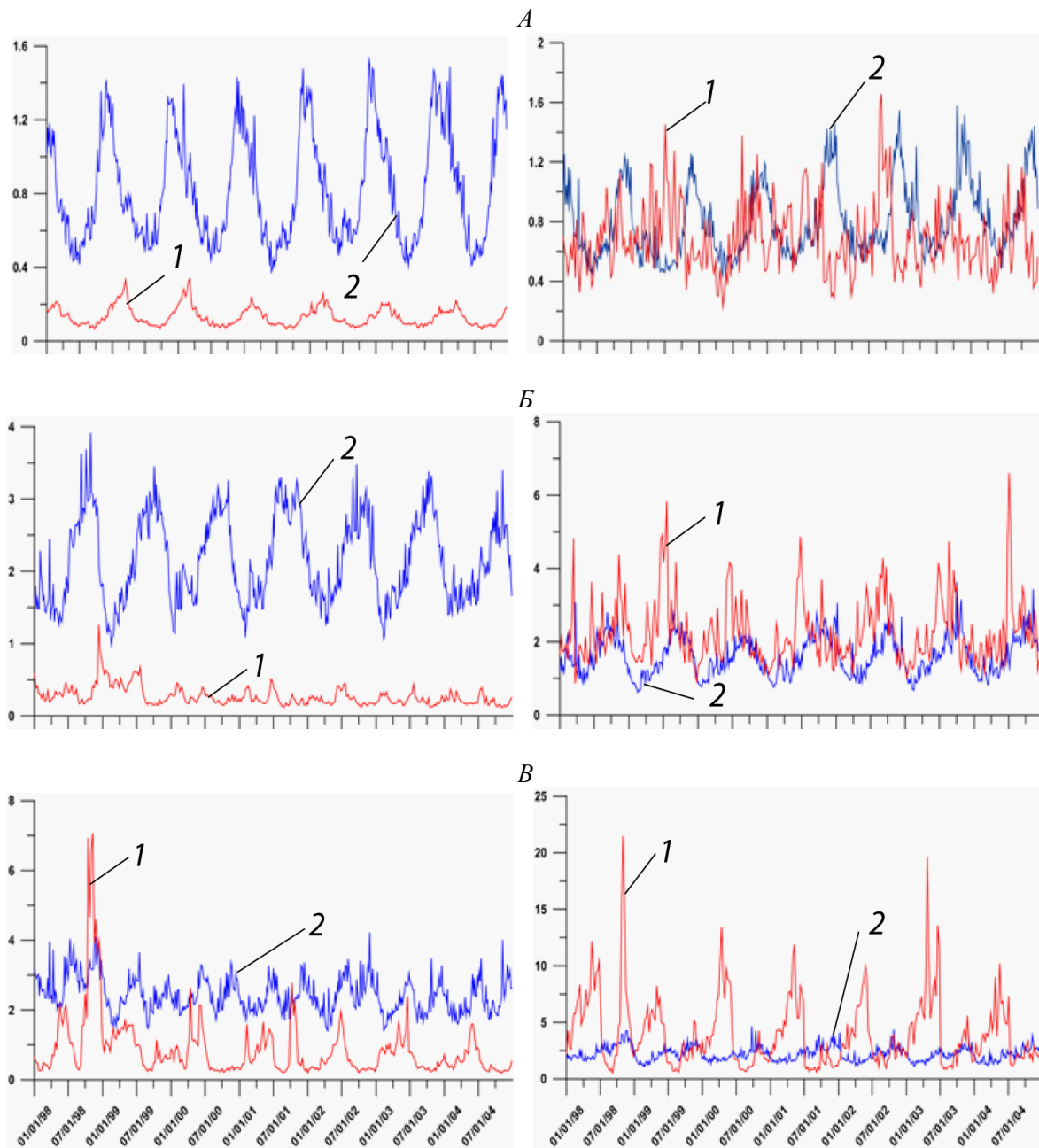


Рис.3. Поверхностная концентрация хлорофилла «а» (в $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$) по данным спутника SeaWiFS (1) и результатам модельных расчетов (2), осредненная по шести выделенным районам: открытому морю (левые графики) и прибрежной зоне (правые графики).
 А – северная ($28\text{--}35^\circ\text{с.ш.}$), Б – центральная ($20\text{--}28^\circ\text{с.ш.}$) и В – южная ($15\text{--}20^\circ\text{с.ш.}$) части ЦВА в 1998–2004 гг. Ширина прибрежной зоны установлена равной 8 шагам сетки вдоль широты и составляет 2° .

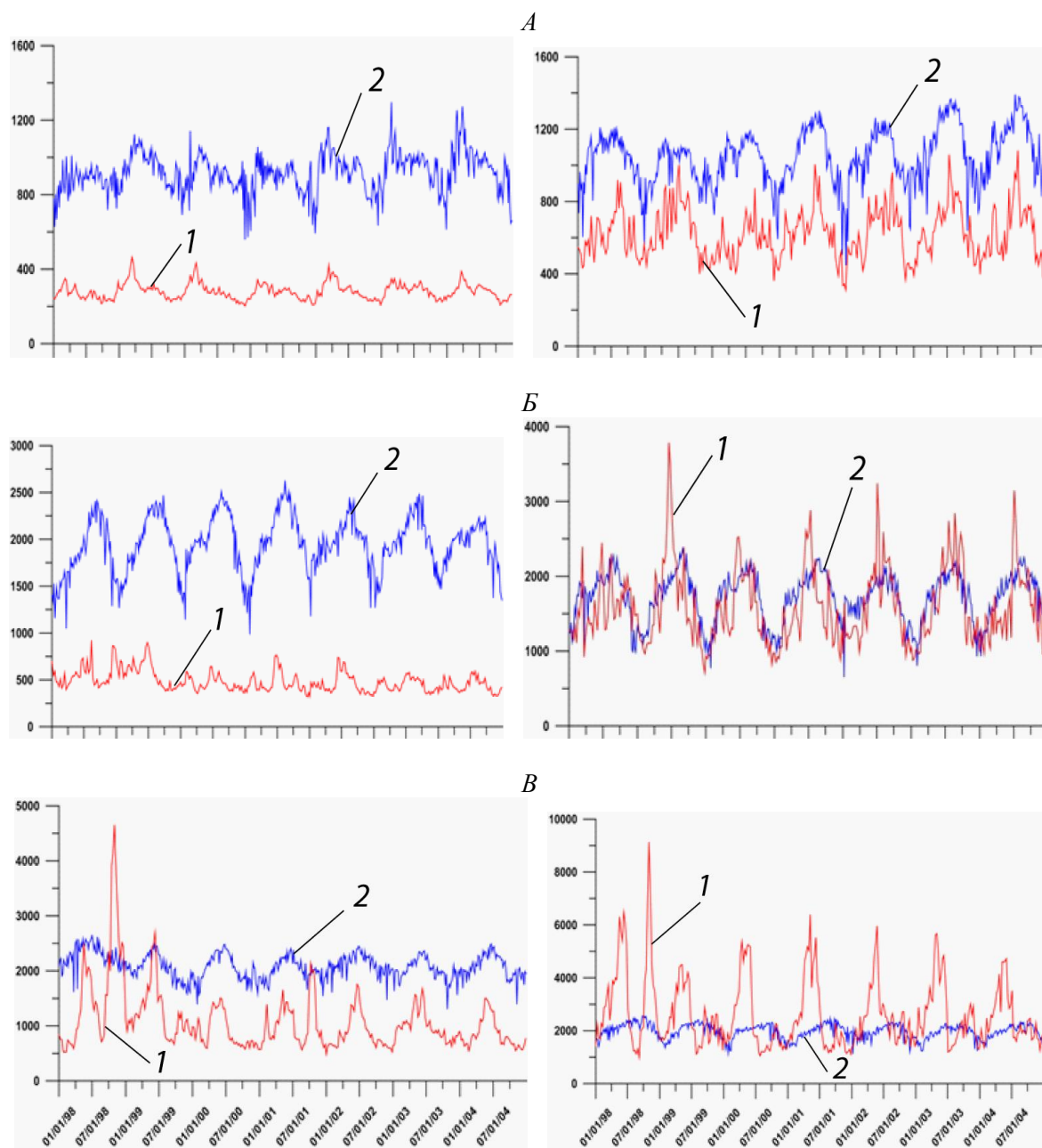


Рис.4. Интегральная по фотическому слою первичная продукция (в $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$) по данным спутника SeaWiFS (1) и результатам модельных расчетов (2), осредненная по шести выделенным районам: открытому морю (левые графики) и прибрежной зоне (правые графики). Усл. обозн. те же, что на рис.3.

Рассчитанные по модели горизонтальные распределения характеристик качественно согласуются с данными как спутниковых, так и экспедиционных измерений. Так, например, в сезонном ходе хлорофилла «а» модель правильно воспроизводит максимальные значения этой характеристики в узкой прибрежной зоне апвеллинга между 16 и 25.5°с.ш., вытянутую на запад зону повышенных концентраций хлорофилла между 18 и 21°с.ш., низкие концентрации в остальных частях исследуемой области. Вместе с тем модельное распределение оказалось гораздо более гладким, чем распределение по результатам спутниковых наблюдений. Это может объяснять-

ся как недостаточно высоким горизонтальным разрешением модели, так и завышенным значением коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии. Более детальное представление о соответствии модельных и спутниковых пространственных распределений различных характеристик можно получить из рис.5 (см.цв.вклейку). Представлены распределения поверхностной концентрации хлорофилла «а», интегральной первичной продукции и поверхностной температуры, построенные по спутниковым данным и результатам расчетов для 28 августа 2004 г. Как видно, имеет место качественное, а для поверхностной температуры и количественное согласие модели со спутниковыми данными. Модельные распределения концентрации хлорофилла «а» и интегральной первичной продукции сильно сглажены, демонстрируя недооценку характеристики в прибрежной зоне и ее переоценку в открытом море.

Как уже отмечалось выше, модельные распределения интегральной первичной продукции к северу от 19°с.ш. характеризуются наличием узкой вдольбереговой полосы пониженных значений, положение которой соответствует области пониженных значений температуры, обусловленной апвеллингом. Механизм возникновения пониженных значений концентрации хлорофилла «а» и интегральной первичной продукции в зоне апвеллинга непосредственно у берега сводится к следующему. Сильный апвеллинг в непосредственной близости у берега (рис.6, а) (см.цв.вклейку) приводит к понижению температуры до 16–18°C (рис.6, б) и росту концентрации нитратов до 10–12 ммоль N·м⁻³ (рис.6, в). Понижение температуры уменьшает первичную продукцию фитопланктона, тогда как увеличение нитратов увеличивает ее. В рассматриваемом случае эффект температуры оказывается сильнее, приводя к пониженным в прибрежной полосе значениям биомассы фитопланктона (рис.6, з), концентрации хлорофилла «а» (рис.6, д) и первичной продукции (рис.6, е). Данное высказывание подтверждается анализом членов формулы расчета первичной продукции [14], основанной на методике Эппли [15] и описывающей зависимость первичной продукции от температуры, освещенности, биогенов и биомассы фитопланктона. Так, анализ изменения первичной продукции, выполненный для 29.08.2004 г. (рис.5, з) вдоль широты 25°с.ш. от точки 20°з.д. в открытом море к точке 15°з.д., находящейся у берега в зоне апвеллинга, показал, что в рассматриваемом районе, характеризующем отсутствием пространственных изменений освещенности, первичная продукция уменьшается за счет падения температуры в 2.5 раза, тогда как за счет роста биогенов она увеличивается только в 1.2 раза.

Поскольку экспедиционные данные для этой области отсутствуют, единственным источником сравнения являются данные спутниковых наблюдений. Сопоставление модельного решения со спутниковыми распределениями демонстрирует хорошее соответствие в полях температур рассматриваемой области – как решение, так и спутниковые данные указывают на существование в прибрежной зоне области пониженных температур. Однако в спутниковых распределениях поверхностной концентрации хлорофилла «а» и интегральной первичной продукции область пониженных значений здесь отсутствует. Причинами этого расхождения могут быть:

- близость побережья, искажающая сигнал и оценки хлорофилла по данным дистанционного зондирования;
- переоценка моделью влияния эффекта понижения температуры как фактора, уменьшающего первичную продукцию фитопланктона по отношению к увеличению нитратов, повышающих эту характеристику.

Отсутствие экспедиционных наблюдений в данной области не позволяет однозначно указать причину расхождений. Однако хорошее соответствие модельного решения спутниковым распределениям при удалении от побережья, в районах, где

дистанционное зондирование не испытывает искажающего влияния побережья, дает надежду на то, что модель правильно воспроизводит соотношение влияния факторов температура–нитраты на количество первичной продукции. Следовательно, можно предположить, что в условиях постоянного притока нитратов из глубины, существующего в зонах апвеллингов, именно температура воды является фактором, лимитирующим первичную продукцию, и тем самым полученный результат не является артефактом.

Характерной особенностью представленных на рис.6 вертикальных разрезов является наличие подповерхностного максимума в вертикальном распределении концентрации хлорофилла «а». Его отсутствие в распределении биомассы фитопланктона на рис.6, *г* обусловлено тем, что подповерхностный максимум этой характеристики выражен несколько слабее и смещен по времени и пространству, располагаясь ближе к побережью на глубине примерно 20 м. Различия в поведении хлорофилла «а» и биомассы фитопланктона связаны с явлением фотоадаптации, для описания которого в модели используется формула Клоерна [16], связывающая отношение хлорофилла к углероду в фитопланктоне Chl/C с температурой воды, потоком фотосинтетически активной радиации (ФАР) и концентрациями нитратов и аммония. Рассматриваемый разрез характеризуется верхним перемешанным слоем (ВПС) толщиной около 10 м в области от 16 до 19°з.д., толщина которого увеличивается от 10 м в области от 16 до 19°з.д. до примерно 25 м в области 20–25°з.д. Подповерхностный максимум хлорофилла, располагающийся в термоклине непосредственно под ВКС, в условиях квазипостоянной температуры обусловлен резким ростом биогенов в термоклине (рис.6, *в*), эффект которого превалирует над эффектом понижения ФАР с глубиной. Это подтверждает анализ сомножителей, входящих в формулу Клоерна. Так, на рассматриваемом разрезе на долготе 20°з.д. при увеличении глубины с 7 до 20 м фактор, описывающий эффект фотоадаптации, практически не меняется, тогда как фактор, описывающий влияние биогенов, возрастает в 2.4 раза.

Вертикальные разрезы рассчитанных концентраций хлорофилла «а», представленные на рис.7 (см.цв.вклейку), демонстрируют как сезонную, так и межгодовую изменчивость подповерхностного максимума этой характеристики. Несмотря на то что глубина нахождения подповерхностного максимума остается практически неизменной (между 20 и 30 м), в период осеннего цветения фитопланктона межгодовая изменчивость проявляется в вариациях значений концентрации хлорофилла «а» в различные годы при неизменном пространственном распределении, а весной – в изменении как концентрации, так и характера распределения характеристики. Так, весной 1998 г. область максимальных значений, достигающих $4 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$, расположена на 18°з.д., в 2000 г. подповерхностный максимум ($3.5 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$) смещается мористее, к 22–24°з.д., а в 2002 г. простирается от 16 до 24°з.д., причем его значение в этом случае не превышает $2.5\text{--}3 \text{ мг} \cdot \text{м}^{-3}$. Как видно, в рассматриваемом районе невозможно выделить никакого «характерного» профиля. Напротив, вертикальное распределение характеристик экосистемы для разных лет демонстрирует сильную пространственно-временную изменчивость. Существенная сезонная и межгодовая изменчивость подповерхностного максимума хлорофилла «а» означает невозможность введения в данном районе какого-либо «характерного» профиля, неизменного во времени и пространстве. Тем самым ставится под сомнение достоверность интегральных оценок характеристик экосистемы по спутниковым данным, расчеты которых выполнены путем определения значений характеристики на поверхности и введения профиля ее изменения с глубиной, фиксированного для всего района.

Отметим, что значения подповерхностного максимума хлорофилла «а», как правило, смещены от берега более чем на 2° . Это может также служить объяснением, почему в модельном решении значение интегральной первичной продукции в открытом море оказывается существенно выше по сравнению со спутниковыми данными (см. рис.4). Модельные оценки интегральной по всему слою характеристики включают в себя значения локальных подповерхностных максимумов, расположенных глубже нижней границы, доступной для дистанционного зондирования.

Таким образом, выполненное сравнение модельного решения с данными наблюдений показало, что модель правильно как качественно, так и количественно воспроизводит сезонную и межгодовую изменчивость гидрофизических характеристик. Решение, соответствующее оптимальным значениям g_m и h_N , также демонстрирует в целом удовлетворительное соответствие рассчитанного и наблюдаемого (по данным Атлант НИРО) распределения, хотя рассчитанное распределение оказалось более гладким с недооцененным (на 20 %) максимумом в районе мыса Кап-Блан. Сопоставление результатов расчетов временной изменчивости характеристик морской экосистемы со спутниковыми данными свидетельствует об удовлетворительном качественном соответствии решения спутниковым данным.

Следует отметить две особенности, присущие модельному решению:

- области пониженных значений поверхностной концентрации хлорофилла «а» и интегральной первичной продукции в прибрежной зоне, где близость побережья может существенно искажать сигнал и оценки характеристик по данным дистанционного зондирования;
- наличие подповерхностного максимума в вертикальном распределении концентрации хлорофилла «а», расположенного глубже границы, доступной для дистанционного зондирования, сильная сезонная и межгодовая изменчивость которого ставит под сомнение достоверность интегральных оценок характеристик экосистемы, а расчеты последних выполнены путем определения значений характеристики на поверхности и введения профиля ее изменения с глубиной, фиксированного для всего района.

Авторы выражают благодарность рецензентам за полезные замечания.

Работа была поддержана Российским фондом фундаментальных исследований, грант РФФИ № 13-05-00652.

Литература

1. Ward B.A., Schartau M., Oschlies A., Martin A.P., Follows M.J., Anderson T.R. When is a biogeochemical model too complex? Objective model reduction and selection for North Atlantic time-series sites // *Progress in Oceanography*. 2013. V.116. P.49–65. 10.1016/j.pocean.2013.06.002.
2. Loza S., Vezina A., Wright D., Lu Y., Thompson K., Dowd M. 3D ecosystem modelling in the North Atlantic: relative impacts of physical and biological parameterizations // *J. of Marine Syst.* 2006. V.61(3). P.230–245. doi: 10.1016/j.jmarsys.2005.09.011.
3. Lachkar Z., Gruber N. What controls biological production in coastal upwelling systems? Insights from a comparative modeling study // *Biogeosciences*. 2011. V.8. P.2961–2976. doi:10.5194/bg-8-2961-2011.
4. Горчаков В.А. и др. Моделирование сезонной изменчивости морской экосистемы в районе Центрально-восточной Атлантики // *Океанология*. 2012. Т.52, № 3. С.348–361.
5. Чернышков П.П., Сирота А.М., Тимохин Е.Н. Структура и динамика вод районов Канарского и Бенгельского апвеллингов в связи с состоянием популяций пелагических рыб. Калининград: Изд. АтлантНИРО, 2005. 215 с.

6. NASA. Ocean Color WEB. Ocean Productivity/ <http://www.science.oregonstate.edu/ocean.productivity/custom.php>.
7. *Алексеев В.В.* и др. Численная модель крупномасштабной динамики океана // Вычислительные процессы и системы / Ред. Г.И.Марчук. Вып.10. М.: Наука, 1993. С.232–252.
8. *Дианский Н.А.* и др. Сигма-модель глобальной циркуляции океана и ее чувствительность к вариациям напряжения трения ветра // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т.38, № 4. С.537–556.
9. *Anderson T.R.* et al. Denitrification in the Arabian Sea: A 3D ecosystem modeling study // Deep-Sea Research I. 2007. V.54. Issue 12. P.2082–2119.
10. *Ryabchenko V.A.* et al. Seasonal dynamics and biological productivity in the Arabian Sea euphotic zone as simulated by a three-dimensional ecosystem model // Global Biogeochemical Cycles. 1998. V.12. P.501–530.
11. *Large W.G.* et al. Diurnal to Decadal Global Forcing for Ocean and Sea-Ice Models: The Data Sets and Flux Climatologies. Climate and Global Dynamics Division. National Center for Atmospheric Research. Boulder, Colorado, 2004. 113 p.
12. *Boyer T.P.* et al. Objective analysis of temperature and salinity for the world ocean on a 1/4 degree grid. NOAA Atlas NESDIS 11. 1997.
13. *Conkright M.E.* et al. NOAA Atlas NESDIS 46 WORLD OCEAN DATABASE 2001 Volume 5: Temporal distribution of nutrient profiles / Ed. S.Levitus. Washington, D.C.: U.S. Gov. Printing Office, 2002. 286 p.
14. *Ryabchenko V.A., Gorchakov V.A., Fasham M.J.R.* Seasonal dynamics and biological productivity in the Arabian Sea euphotic zone as simulated by a three dimensional ecosystem model // Global Biogeochemical Cycles. 1998. V.12. P.501–530.
15. *Eppley R.W.* Temperature and phytoplankton growth in the sea // Fisheries Bulletin 70, 1972. P.1063–1085.
16. *Cloern J.E.* et al. An empirical model of the phytoplankton chlorophyll: carbon ratio – the conversion factor between productivity and growth rate // Limnology and Oceanology. 1995. V.40. P.1313–1321.

Статья поступила в редакцию 05.04.2013 г.

