

УДК 551.465.8

© В.А.Рябченко<sup>1</sup>, Н.А.Дианский<sup>2,3</sup>, А.В.Гусев<sup>2</sup>, А.Г.Архинов<sup>4</sup>, П.П.Чернышков<sup>4</sup>, 2013

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский филиал Института океанологии им. П.П.Ширшова РАН

<sup>2</sup>Институт вычислительной математики РАН, Москва

<sup>3</sup>Государственный океанографический институт им. Н.Н.Зубова, Москва

<sup>4</sup>Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, Калининград  
vla-ryabchenko@yandex.ru

## МОДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ МЕЖГОДОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ЦИРКУЛЯЦИИ ОКЕАНА НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛИЧИНОК ПРОМЫСЛОВЫХ РЫБ В РАЙОНЕ КАНАРСКОГО АПВЕЛЛИНГА

На основе трехмерной  $\sigma$ -модели циркуляции океана, разработанной в Институте вычислительной математики РАН, получены оценки влияния изменений в циркуляции на распространение пассивных гидробионтов (икры и личинок основных промысловых рыб) в районе Канарского апвеллинга. Согласно расчетам, весной 1995 г. в верхнем 75-метровом слое океана в этом районе концентрация икры и личинок рыб только за счет усиленной циркуляции была заметно выше, чем в тот же период 1997 г. В свою очередь, интенсификация циркуляции, включая апвеллинг, в 1995 г. вызвана более сильными ветрами.

**Ключевые слова:** циркуляция океана, личинки рыб, моделирование, Канарский апвеллинг.

Уровни пополнения популяций массовых пелагических рыб в основном определяют выживаемостью на ранних стадиях развития (икра–личинки–мальки), которая зависит от условий среды обитания. Выживаемость рыб на этих стадиях существенно зависит от особенностей гидродинамического режима, которые могут способствовать процессам их концентрации, удержания на определенной акватории и обогащения объектами питания как планктона в целом, так и ихтиопланктона (личинки рыб) в частности. При реализации этих процессов формируются высокие уровни пополнения популяций рыб [1].

В районе Канарского апвеллинга есть несколько областей нереста основных промысловых рыб, расположенных южнее крупных мысов, в зоне подводных каньонов. Поскольку период развития икры составляет 1.5–2 сут, основное внимание при определении уровней пополнения популяций пелагических рыб уделяется исследованию распределения личинок, живущих как минимум 1.5–2.0 мес. [2, 3]. Подавляющее число личинок дрейфует под воздействием Канарского течения в южном направлении. В разные месяцы и годы адвективный перенос в прибрежной зоне проявляется по-разному и в значительной степени определяет пространственную дисперсию личинок. Одним из основных факторов, отрицательно влияющих на выживание икры и личинок, по-видимому, является наличие их выноса за пределы шельфа, в непродуктивные районы океана [3]. Цель настоящей работы — оценить влияние изменений в циркуляции океана на распространение пассивных гидробионтов (икры и личинок основных промысловых рыб) в районе Канарского апвеллинга с помощью трехмерной  $\sigma$ -модели циркуляции океана INMOM (Institute of Numerical Mathematics Ocean Model), разработанной в Институте вычислительной математики РАН [4, 5]. Ранее различные версии этой модели использовались для оценки влияния взаимодействия Атлантики с Северным Ледовитым океаном на Гольфстрим [6], моделирования циркуляции воды и морского льда в системе

Северная Атлантика–Северный Ледовитый океан–Берингово море [7], воспроизведения сезонной изменчивости морской экосистемы в районе Центральновосточной Атлантики [8]. INMOM используется также в качестве океанического блока модели климатической системы ИВМ РАН [9], участвующей в международных программах МГЭИК по воспроизведению будущих изменений климата.

**Описание модели.** Модель основана на примитивных уравнениях гидротермодинамики океана в приближениях Буссинеска и гидростатики, записанных в сферической изобатической  $\sigma$ -системе координат [5]. Численная дискретизация этих уравнений выполнена на сетке «С» в классификации Аракавы [10]. Прогностическими переменными модели служат горизонтальные компоненты вектора скорости, отклонения уровня, потенциальная температура, соленость, толщина и сплоченность морского льда. Для расчета плотности морской воды используется нелинейное уравнение состояния, учитывающее ее сжимаемость, специально предназначенное для моделей циркуляции океана [11]. Главная особенность используемой модели, которая отличает ее от известных зарубежных и отечественных моделей, заключается в том, что при ее численной реализации используется метод расщепления по физическим процессам, позволяющий эффективно реализовывать неявные схемы интегрирования по времени, тем самым увеличивать шаг по времени и, следовательно, повышать эффективность расчетов.

Параметризация крупномасштабной горизонтальной турбулентной диффузии для температуры и солености осуществлялась с помощью оператора 2-го порядка с коэффициентом  $100 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ . В качестве горизонтальной вязкости использовался оператор 4-го порядка с коэффициентом  $10^{10} \text{ м}^4/\text{с}$ . Коэффициенты вертикальной вязкости и диффузии выбирались согласно параметризации Пакановского и Филандера как функции числа Ричардсона [12].

В настоящей работе используется вихреразрешающая версия INMOM для Северной Атлантики с пространственным разрешением  $0.16 \times 0.08^\circ$  по долготе и широте, имеющая 20 неравномерно распределенных  $\sigma$ -уровней по глубине. Использование такого пространственного разрешения позволяет явно воспроизводить вихревую структуру циркуляции океана, которая в областях умеренных широт существенным образом отличается от воспроизводимой в расчетах с более грубым разрешением. Модели с подобным пространственным разрешением носят название вихреразрешающих. Расчетная область ограничена с запада и востока побережьями материков, а на севере и юге – жидкими границами на параллелях  $78^\circ \text{ с. ш.}$  и  $19^\circ \text{ ю. ш.}$  соответственно. Вдоль жидких границ модельной области были выделены полосы шириной  $0.5^\circ$ , где задавался годовой ход температуры и солености из архива [13], по которым рассчитывались геострофические компоненты скорости.

В работе [14] продемонстрирована адекватность этой модели при воспроизведении вихревого характера циркуляции Северной Атлантики. Проведен анализ модельного решения в аспекте образования и эволюции рингов Гольфстрима. Среди характеристических особенностей вихреразрешающей модели следует выделить ярко выраженное модельное меандрирование Гольфстрима и Североатлантического течения, образование в области меандрирования южных циклонических рингов и северных антициклонических линз.

Следует отметить, что для более точного описания Канарского апвеллинга необходимо пространственное разрешение модели 1–2 км. Однако моделей общей циркуляции океана, описывающих всю Северную Атлантику с таким разрешением, пока не существует. Более того, нелокальный характер формирования течений в этой области требует воспроизведения процессов во всей Центральновосточной Атлантике (ЦВА), для корректного описания межгодовой изменчивости которых, в свою очередь, необходимо моделирование всей Северной Атлантики. В настоящей работе рассматривается именно такая модельная область, а используемое пространственное разрешение позволяет с дос-

таточной точностью описать Канарский апвеллинг и его изменчивость: на область апвеллинга (поперек берега) приходится 6–7 узлов сетки.

Для расчета переноса личинок, рассматриваемых в настоящей работе в качестве пассивной примеси, от мест нереста по горизонтали использовалась гибридная схема переноса-диффузии, несколько отличная от уравнений переноса-диффузии для температуры и солености. Ее численная реализация осуществлялась при минимальных изменениях в структуре модели, построенной на алгоритмах расщепления. Для этого коэффициент боковой диффузии полагался прямо пропорциональным модулю скорости и половине шага пространственной сетки. При выборе коэффициента пропорциональности равного единице эта схема будет монотонной, аналогичной схеме направленных разностей [15]. Расчеты распространения личинок проведены с помощью гибридной схемы переноса-диффузии именно в этом варианте. Коэффициент вычислительной горизонтальной диффузии в данной схеме при использованных шагах расчетной сетки и характерных скоростях в районе Канарского апвеллинга составляет около  $100 \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$ , что вполне сопоставимо с эффективным коэффициентом крупномасштабной турбулентной диффузии. По вертикали перенос-диффузия личинок осуществлялся так же, как и для температуры и солености. Такая же методика переноса пассивной примеси использовалась в [16] при расчете переноса радиоактивного загрязнения от АЭС «Фукусима 1» и показала хорошие результаты.

**Условия расчетов.** Описанная модель использовалась для расчета путей переноса гидродинамически пассивных икринок и личинок европейских сардины и ставриды в зимне-весенний период 1995 и 1997 гг. в ЦВА в районе Канарского апвеллинга. Выбор указанных лет был обусловлен основной целью исследования – проверкой работы модели в различающихся условиях: согласно данным ихтиопланктонных съемок [3], указанный район в 1995 г. характеризовался повышенной (по сравнению со средним значением) численностью икринок и личинок европейских сардины и ставриды, а в 1997 г. – пониженной.

Численность подсчитывалась для всей вышеописанной модельной области. Модель циркуляции приводилась в движение потоками импульса, тепла и влаги на океанской поверхности, а также речным стоком. Эти потоки рассчитывались по данным об атмосферных характеристиках, подготовленным в рамках программы CORE [17]. Подробно-сти задания атмосферных характеристик и речного стока можно найти в [8].

Для задания мгновенных источников пассивной примеси (икры и личинок европейских сардины и ставриды) было выбрано три прибрежных участка, где наблюдались повышенные концентрации икринок и личинок промысловых рыб ( $>500 \text{ шт./м}^2$ ). Согласно данным наблюдений АтлантНИРО, места наиболее активного и массового нереста европейских сардины и ставриды локализируются в прибрежной зоне там, где глубины дна составляет 100–300 м. Эти места для указанных выше прибрежных участков показаны на рис.1 (черные прямоугольники). Области источников, в которых в начальный момент времени задавались единичные значения безразмерной концентрации примеси, залиты черным цветом. Первый, второй и третий районы нереста, в которых глубина океана составляет от 100 до 300 м, расположены соответственно между параллелями 25.0 и 25.2°с.ш., 26.8 и 28.2°с.ш. и 29.8 и 30.2°с.ш. В выполненных расчетах предполагалось, что безразмерная концентрация личинок в начальный момент времени в местах нереста равна единице, а вне этих мест – нулю, причем толщина слоя нереста в начальный момент принималась равной 50 м. На жидких границах, расположенных далеко от района исследования – ЦВА, задаются нулевые концентрации икринок и личинок рыб.

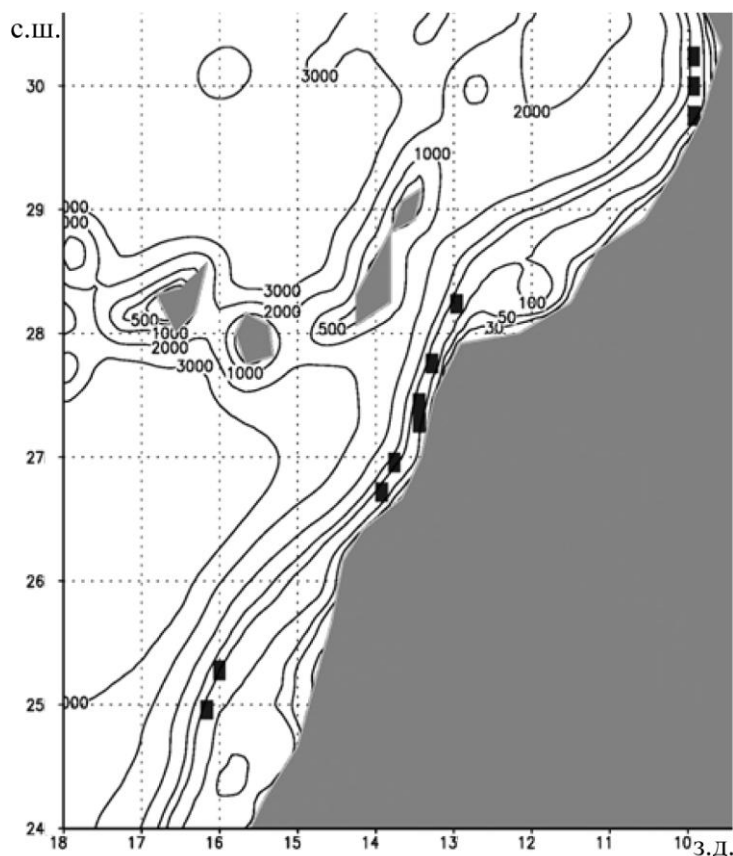


Рис. 1. Модельное расположение мгновенных источников пассивной примеси (икры европейских сардины и ставриды) для трех районов нереста в ЦВА, нанесенное на батиметрическую карту исследуемой области в соответствии с фактическими данными АтлантНИРО.

Согласно имеющимся данным, пик нереста европейских сардины и ставриды в ЦВА приходится на февраль. В обоих рассматриваемых случаях (1995 и 1997 гг.) расчеты производились на 1.5 месяца, начиная с 15 февраля. В начальный момент времени поля гидротермодинамических характеристик (скорость течений, температура, соленость, уровень) брались из предварительного выполненного расчета для акватории Северной и Центральной Атлантики на период 1985–1998 гг.

**Результаты расчетов.** Рассчитанные распределения концентрации личинок на горизонтах 10, 30 и 50 м как в 1995 г., так и в 1997 г. показали, что распределения на указанных горизонтах для всех трех районов нереста мало отличаются друг от друга. Сравнение картин распространения личинок от разных мест нереста (см.рис.1) как в 1995 г., так и в 1997 г. свидетельствует о том, что наибольший перенос личинок от мест нереста наблюдался в случаях второго и третьего районов нереста. В качестве примера на рис.2А (см.цв.вклейку) представлены поля концентрации личинок на горизонте 10 м в различные моменты времени 1995 г. (случай второго района нереста). Безразмерная концентрация примеси (цветная заливка) в начальный момент времени равна единице. Как видно, в течение рассмотренного 1.5-месячного периода личинки преимущественно переносились интенсивным поверхностным юго-западным вдольбереговым течением из шельфовых районов нереста в более глубоководные районы континентального склона. Отметим, что существование циклонической циркуляции вокруг островов Фуэртевентура и Лансороте (Канарские острова) приводило к тому, что личинки распространялись не только в юго-западном, но и в северо-западном направлении.

Аналогичные расчеты распространения концентрации личинок рыб в зимне-весенний период 1997 г. (рис.2Б) свидетельствуют о менее интенсивном переносе личинок по горизонтали, особенно в поперечном берегу направлении. Вследствие этого конфигурации областей, занятых личинками, в определенные моменты времени в 1995 и 1997 гг. заметно отличаются друг от друга: в 1997 г. эти области вытянуты вдоль берега, тогда как в 1995 г. западная граница распространения личинок сдвинута примерно на  $0.5-1^\circ$  к западу в открытое море (ср. рис.2А и 2Б). В результате площади областей, занятых личинками, в 1997 г. оказались заметно меньше, чем в 1995 г.

Основная причина указанных различий в пространственном распределении личинок в 1995 и 1997 гг. – различие в ветре, средняя (по району ЦВА) скорость которого в 1995 г., как правило, была больше, чем в 1997 г. (рис.3). Более сильные ветры в 1995 г. способствовали усилению дрейфовых течений и апвеллинга в рассматриваемый период годового цикла: этот эффект проявлялся во всех трех регионах, выделенных для анализа по результатам расчетов распространения личинок от трех районов нереста (ср. рис.4, а, в). В свою очередь, усиление циркуляции в 1995 г. привело к росту концентрации личинок в верхнем 75-метровом слое (ср. рис.4, б, г). На первый взгляд, полученный результат противоречит очевидным представлениям о том, что направленные от берега более интенсивные поверхностные горизонтальные течения должны уменьшить концентрации пассивных гидробионтов в выделенном районе, а более интенсивный апвеллинг не приведет к увеличению их концентраций. Здесь, однако, следует принять во внимание, что каждый из рассматриваемых регионов содержит области как апвеллинга, так и даунвеллинга, причем расположение этих областей меняется год от года. Например, в прибрежном районе между  $25$  и  $26^\circ$  с.ш. поверхностные течения в марте 1995 г. направлены от берега на юго-запад, указывая на существование прибрежного апвеллинга, тогда как в марте 1997 г. они направлены к берегу (на восток), способствуя развитию даунвеллинга и уменьшению концентрации пассивных гидробионтов в верхнем слое океана (ср. рис.2А, в, г и 2Б, в, г). Приводимые на рис.4 графики временной эволюции вертикальной скорости и концентрации личинок в слое  $0-75$  м характеризуют изменения *осредненных* по регионам характеристик.

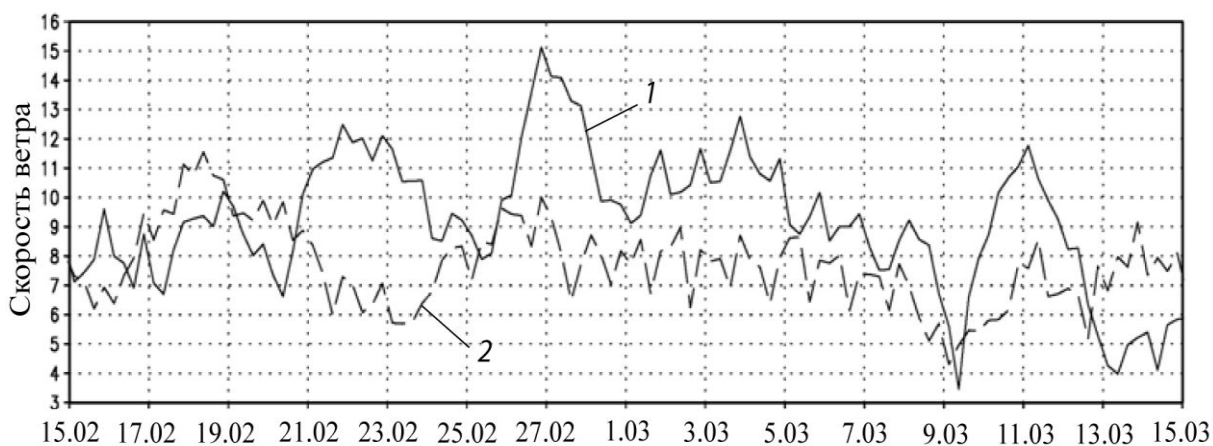


Рис.3. Временной ход среднего по ЦВА ( $22-32^\circ$  с.ш.,  $20-14^\circ$  з.д.) модуля скорости ветра на высоте 10 м (м/с) в период с 15 февраля по 15 марта 1995 г. (кривая 1) и в тот же период 1997 г. (кривая 2).

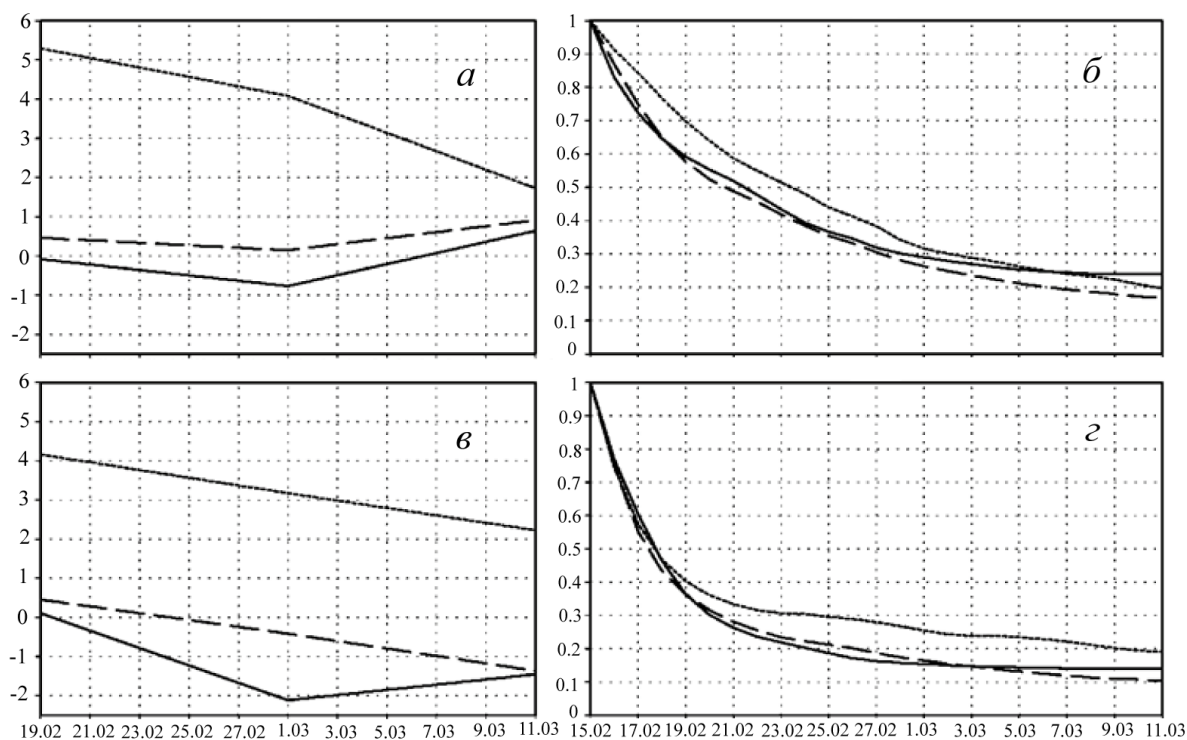


Рис.4. Временной ход средней по трем выделенным регионам вертикальной скорости ( $10^{-5} \cdot \text{см} \cdot \text{с}^{-1}$ ) на горизонте 75 м (а, в) и безразмерной концентрации личинок в слое 0–75 м (б, г).  
 Графики (а, б) соответствуют 1995 г., (в, г) – 1997 г. Сплошные линии, штриховые и пунктирные соответствуют регионам 1 (22–27°с.ш., 20–14°з.д.), 2 (23–30°с.ш., 18–11°з.д.) и 3 (28–32°с.ш., 13.5–9°з.д.).

Таким образом, согласно результатам расчетов, в 1995 г. в верхнем 75-метровом слое океана (основная часть фотического слоя) в ЦВА концентрация личинок рыб только за счет усиленной циркуляции должна была быть заметно выше, чем в 1997 г. В природе усиление апвеллинга должно способствовать увеличению площадей, благоприятных для выживания личинок промысловых рыб, так как приводит к росту биогенов в верхнем фотическом слое океана и последующему увеличению биомассы фито- и зоопланктона, т.е. корма для личинок. Заметим, что между численностью икры и выловом промысловых рыб существует прямая зависимость: чем больше нерестовое стадо, тем больше оно вымечет икры, и наоборот. Поэтому полученные результаты находятся в согласии с тем фактом, что вылов промысловых рыб в 1995 г. был выше среднего уровня.

\*\*\*

Таким образом, гидродинамические условия в начальный период роста молоди рыб оказывают значительное влияние на ее развитие и могут способствовать как увеличению, так и уменьшению рыбных запасов. Более точные количественные оценки гидродинамических эффектов могут быть получены при дальнейшем развитии модельного подхода и включением в модельную систему не только модели морской экосистемы, как это сделано в [8, 18], но и моделей рыбных запасов (см., напр., [19]).

Альтернативный подход к прогнозу рыбных запасов, основанный на установлении корреляционных связей, до сих пор не привел к существенным результатам для района ЦВА [19]. Недостаточное количество и неполнота экспедиционных данных не позволяют установить надежных корреляционных связей между численностью и распределением молоди, с одной стороны, и параметрами среды – с другой. Для установления таких

связей для района ЦВА помимо данных о запасах промысловых рыб необходимо располагать не только данными о гидрологических и гидрохимических характеристиках (температура, соленость, концентрация биогенов), но и количественными оценками биомассы фито- и зоопланктона – кормовой базы промысловых рыб.

Авторы благодарят рецензентов за ценные критические замечания.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 07-05-13578-офи-ц, 09-05-00668-а, 12-05-00810-а и 13-05-00652).

## Литература

1. Чернышков П.П., Сирота А.М., Тимохин Е.Н. Структура и динамика вод районов Канарского и Бенгальского апвеллингов в связи с состоянием популяций пелагических рыб. Калининград: Изд. АтлантНИРО, 2005. 215 с.
2. Калинина Э.М. Ихтиопланктон района Канарского течения. Киев: Наукова думка, 1981. 116 с.
3. Архипов А.Г. Динамика численности и особенности распределения ихтиопланктонных сообществ северной части Центрально-восточной Атлантики и морей Средиземноморского бассейна. Калининград: Изд-во АтлантНИРО, 2006. 232с.
4. Алексеев В.В., Залесный В.Б. Численная модель крупномасштабной динамики океана // Вычислительные процессы и системы. Вып.10 / Ред. Г.И.Марчук. М.: Наука, 1993. С.232–252.
5. Дианский Н.А., Багно А.В., Залесный В.Б. 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.
6. Мошонкин С.Н., Дианский Н.А., Гусев А.В. Влияние взаимодействия Атлантики с Северным Ледовитым океаном на Гольфстрим // Океанология. 2007. Т.47, № 2. С.197–210.
7. Moshonkin S.N., Bagno A.V., Gusev A.V., Diansky N.A. Numerical modelling of oceanic circulation and sea ice in the North Atlantic-Arctic Ocean-Bering Sea region // Russ. J. Numer. Anal. Math. Modelling. 2006, V.21, N 4. P.421–443.
8. Горчаков В.А., Рябченко В.А., Дианский Н.А., Гусев А.В. Моделирование сезонной изменчивости морской экосистемы в районе Центрально-восточной Атлантики // Океанология. 2012. Т.52, № 3. С.348–361.
9. Володин Е.М., Дианский Н.А., Гусев А.В. Воспроизведение современного климата с помощью совместной модели общей циркуляции атмосферы и океана INMCM 4.0 // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. Т.46, № 4. С.1–17.
10. Mesinger F., Arakawa A. Numerical methods used in atmospheric models // JOC, GARP Publication Series. 1976. V.1, N 17. Geneva, World Meteorological Organization. С.Р. № 5, CH-1211. 64 p.
11. Brydon D., San S., Bleck R. A new approximation of the equation of state for seawater, suitable for numerical ocean models // J. Geophys. Res. 1999. V.104, N C1. P.1537–1540.
12. Pacanovsky R.C., Philander G. Parametrization of vertical mixing in numerical models of the tropical ocean // J. Phys. Oceanogr. 1981. V.11. P.1442–1451.
13. Boyer T.P., Levitus S. Objective analysis of temperature and salinity for the world ocean on a 1/4 degree grid. NOAA Atlas NESDIS 11. 1997.
14. Анисимов М.В., Дианский Н.А. Физический механизм западного дрейфа рингов фронтальных течений в океане // Океанология. 2008. Т.48, № 3. С.325–332.
15. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. СПб.: Лань, 2009. 608 с.
16. Дианский Н.А., Гусев А.В., Фомин В.В. Особенности распространения загрязнений в северо-западной части Тихого океана / Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т.48, № 2. С.247–266.
17. Large W.G., Yeager S.G. 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.
18. Lachkar Z., Gruber N. What controls biological production in coastal upwelling systems? Insights from a comparative modeling study // Biogeosciences. 2011. N 8. P.2961–2976. doi:10.5194/bg-8-2961-2011.
19. Fréon P., Alheit J., Barton E.D., Kifani S., Marchesiello P. Modelling, forecasting and scenarios in comparable upwelling ecosystems: California, Canary and Humboldt // Large Marine Ecosystems, V.14 / Eds. V.Shannon, G.Hempel, P.Malanotte-Rizzoli, C.Moloney, J.Woods. Elsevier B.V. 2006. P.187–223.

Статья поступила в редакцию 29.03.2013 г.

