

Санкт-Петербургский государственный университет

На правах рукописи

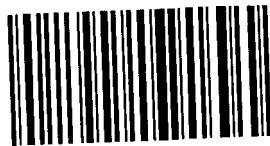


Колдунов Алексей Владимирович

**ПЕРЕНОС И ДИФфуЗИЯ ХЛОРОФИЛЛА В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ
ЧАСТИ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА**

специальность 25.00.28 - «океанология»

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата географических наук



005016121

3 МАЙ 2012

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете.

Научный руководитель: доктор географических наук, профессор кафедры океанологии СПбГУ **Фукс Виктор Робертович**

Официальные оппоненты: **Викторов Сергей Васильевич**, доктор географических наук, старший научный сотрудник, Санкт-Петербургский научно-исследовательский центр экологической безопасности РАН, главный научный сотрудник

Петров Кирилл Михайлович, доктор географических наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный университет, профессор кафедры биогеографии СПбГУ

Ведущая организация: Санкт-Петербургское отделение ФГУ "Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова"

Защита состоится « 29 » мая 2012 года в 15 часов 00 минут на заседании совета ДМ212.232.21 по защите докторских и кандидатских диссертаций при Санкт-Петербургском государственном университете по адресу: 199178, Санкт-Петербург, 10-я линия В.О., д. 33, центр дистанционного обучения «Феникс»; e-mail: spb.geograph@gmail.com; факс: (812) 328-41-59

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке им. А.М. Горького Санкт-Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт-Петербург, Университетская набережная 7/9

Автореферат разослан « 18 » апреля 2012 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета

к.г.н.



Г.В. Пряхина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Современные темпы роста численности населения Земли и активный морской промысел заставляют искать новые продуктивные зоны Мирового океана и рационально использовать уже известные. Таким образом, существует народно-хозяйственная проблема совершенствования методов оперативного научного обеспечения промысла и повышения точности промысловых прогнозов, решение которой позволит уменьшить затраты на добычу промысловых объектов и повысить её эффективность.

Одним из ключевых факторов морской среды, влияющих на поведение промысловых объектов, является насыщенность акватории организмами низшего трофического уровня, т.е. содержание в воде корма для организмов более высоких трофических уровней. Наиболее многочисленные организмы первого трофического уровня являются также и наиболее зависимыми от абиотических характеристик среды. Для качественного прогноза распределения биотических характеристик необходимо чётко представлять степень и форму зависимости этих характеристик от различных факторов окружающей среды. Изученность такой зависимости на данном этапе развития науки ещё недостаточна, что приводит к низкой эффективности промысла и невысокой точности экологических прогнозов. Прежде всего, слабая изученность вышеупомянутых зависимостей связана с недостаточной репрезентативностью биотической информации, полученной контактными методами измерений, на которых долгое время базировались все исследования. С развитием спутниковых методов измерения цвета океана начали появляться биотические данные с высокой дискретностью по времени и пространственным разрешением, которые позволяют разрабатывать и апробировать недоступные ранее подходы и методы анализа.

В пространственной неоднородности биотических характеристик, таких как концентрация хлорофилла, несомненно, значительную роль играют перенос и диффузия, однако из-за сложности получения репрезентативных данных для исследований переноса и диффузии хлорофилла, особенно для крупных масштабов изменчивости данный вопрос оставался долгое время весьма слабо изучен.

Цель исследования. Оценка особенностей переноса и диффузии хлорофилла в Северо-Восточной части Атлантического океана на основе спутниковых измерений.

Для достижения этой цели решались следующие основные задачи:

- 1) Систематизация по литературным источникам основных современных представлений о механизмах и степени воздействия адвективного переноса и диффузии на формирование зон повышенной биологической продуктивности.
- 2) Создание массива исходной спутниковой информации о концентрации хлорофилла и первичной продукции в Северо-Восточной части Атлантического океана.
- 3) Статистический анализ и описание на основе спутниковой информации основных закономерностей пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла и первичной продукции в Северо-Восточной части Атлантического океана.

- 4) Исследование статистической нестационарности пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла и первичной продукции на основе вейвлет-анализа.
- 5) Разработка метода оценки сравнительного вклада адвекции, диффузии и биотической трансформации в общую изменчивость концентрации хлорофилла и первичной продукции.
- 6) Определение зависимости формирования продуктивных зон в океане от крупномасштабных атмосферных процессов.

Научная новизна.

- Впервые для Северо-Восточной части Атлантического океана на основе спутниковых измерений описана многолетняя пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла и первичной продукции для различных масштабов осреднения, и изучена изменчивость наступления периодов цветения фитопланктона.

- Впервые построены карты пространственного распределения интенсивности колебаний первичной продукции для разных периодичностей.

- Разработаны новые методы визуализации и интерпретации результатов вейвлет-анализа.

- Впервые для Северо-Восточной части Атлантического океана проведён сравнительный анализ статистической нестационарности пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла и индекса Северо-Атлантического колебания, а также исследована их статистическая связь.

- Разработан оригинальный динамико-стохастический анализ спутниковой информации, на основе которого оценён сравнительный вклад адвекции, диффузии и биотической трансформации в общую изменчивость концентрации хлорофилла и первичной продукции.

На защиту выносятся:

1. Новые методы анализа и интерпретации спутниковой информации о концентрации хлорофилла и первичной продукции.
2. Основные закономерности пространственно-временной изменчивости зон биологической продуктивности в Северо-Восточной части Атлантического океана.
3. Закономерности нестационарности основных периодичностей в пространственно-временной изменчивости хлорофилла и первичной продукции в Северо-Восточной части Атлантического океана.
4. Распределение районов с различным вкладом динамических и биотических составляющих в общую изменчивость первичной продукции и концентрации хлорофилла
5. Закономерности связи изменчивости концентрации хлорофилла с изменчивостью индекса Северо-Атлантического колебания.

Практическая значимость. Распределение первичной продукции фитопланктона, являющегося первым трофическим уровнем, оказывает ключевое влияние на распределение зоопланктона и консументов высших порядков. Знание основных закономерностей пространственно-временной изменчивости продукции моря, таким образом, очень важно для обеспечения морского промысла, а так же при экологических экспертизах.

Личный вклад автора. Все основные научные результаты исследования, изложенные выше, а также их интерпретация получены лично автором. Проводились: выбор, получение, подготовка к работе исходных массивов данных. Разработка программ (на языке программирования Matlab) для анализа и картирования натуральных и экспериментальных данных. Осуществлялся статистический анализ данных, систематизация результатов исследования, оценка вклада различных океанографических характеристик в формирование продуктивных зон в океане. В тех публикациях, где диссертант выступал как соавтор, все региональные результаты, а также методологическая и расчётная часть исследования выполнена А.В. Колдуновым.

Апробация результатов исследования. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на российских и международных научных конференциях и семинарах:

- Итоговая сессия Санкт-Петербургской секции Учёного совета «ГОИН» по результатам работ 2011 года. Санкт-Петербург, Государственное учреждение "Государственный Океанографический Институт" Санкт-Петербургское отделение. 2-3 февраля 2012 г.

- PICES-2011. Annual Meeting "Mechanisms of Marine Ecosystem Reorganization in the North Pacific Ocean" October 14-23, 2011, Khabarovsk, Russia.

- Научная конференция XIV съезда Русского географического общества Санкт-Петербург, 11-14 декабря 2010 г.

- Семинар ФАИ в рамках Программы поддержки молодых ученых ААНИИ Росгидромета, Санкт-Петербург, 1-3 декабря 2010.

- XI Всероссийской конференции с международным участием «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря». 9-11 ноября 2010 г. Санкт-Петербург.

- Симпозиум «Climate Change Effects on Fish and Fisheries: Forecasting Impacts, Assessing Ecosystem Responses, and Evaluating Management Strategies». April 25 – 29, 2010 Sendai, Japan.

- Итоговая научная конференция "Фундаментальные проблемы океанологии". Москва, Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 27-28 ноября 2008 г.

- Шестая всероссийская открытая ежегодная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 10-14 ноября 2008 г.

- Международная научная конференция «PEACE II», Циндао, Китай. 29-30 ноября, 2006; - International conference «Advances of satellite oceanography: understanding and monitoring of Asian Marginal Seas». Vladivostok, Russia 3-6 October, 2007;

- Международная научная конференция «Большие морские системы России в эпоху глобальных изменений (климат, ресурсы, управление)», Ростов-на-Дону, 10-13 октября 2007;

- X Международная конференция «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря», Архангельск, 2007.
- «PICES Thirteenth Annual Meeting (PICES XIII)», Hinolulu, Hawaii, USA; «PICES Fifteenth Annual Meeting (PICES XV)», Japan, Yokohama, 2006;
Работа над диссертацией была поддержана стипендией им. Ф. Нансена («The NANSEN Grant – 2006»). Исследования, представленные в диссертации проводились в рамках проекта LAMAR (LAMAR-DRCT/FRCT- M2.1.2/F/008/2007) и при поддержке грантов РФФИ № 04-05-64765 и № 04-05-64876. Работа выполнялась при поддержке ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России".

По материалам диссертации автором опубликовано **24 работы**, из них **14** в материалах конференций, **одна** монография, **9** статей в периодических изданиях, **7** из них в ведущих периодических изданиях из перечня ВАК. Результаты исследований отражены также в научно-технических отчётах СКБ САМИ ДВО РАН, Южно-Сахалинск (2006 и 2007 гг.) и СПбГУ (2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010 и 2011 гг.).

Объём и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературных источников. Объём диссертации 128 страниц и содержит, кроме основного текста, 47 рисунков и список литературы из 115 наименований, в том числе 87 на иностранных языках.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы задачи исследования, показана научная новизна работы, а также практическая значимость результатов.

В **первой главе** «Влияние динамики вод на пространственно-временную изменчивость фитопланктона в Северо-Восточной части Атлантического океана» рассматриваются особенности основных динамических процессов, влияющих на пространственно-временную изменчивость фитопланктона и на формирование зон повышенной биологической продуктивности в шельфовых районах и в открытом океане. Рассматривается влияние на биотическое состояние акватории конвекции, океанских течений, турбулентности, апвеллинга, вихрей и фронтальных зон. Выделяются основные закономерности условий роста численности фитопланктона в океане.

Из динамических факторов, влияющих на распределение фитопланктона наиболее значимыми являются горизонтальная адвекция (Abraham, 1998; Vrasso et al., 2000), низкочастотная изменчивость, присущая мезомасштабной динамике (Levy and Klein, 2004), и вертикальная мезомасштабная адвекция (Mahadevan and Archer, 2000; Le'vy et al., 2001; Mahadevan and Campbell, 2002; Mahadevan and Tandon, 2006). Остаётся невыясненным вопрос о сравнительном вкладе в пространственно-временную изменчивость фитопланктона переноса, диффузии и биологических взаимодействий (Denman et al., 1977; Folt and Burns, 1999).

Приводится описание особенностей района исследования с общегеографической, океанологической и биологической точек зрения. В главе описывается динамическая картина региона, особенности основных океанских течений, их направления и средние скорости, расположение и изменчивость водных масс региона. Описываются основные особенности пространственно-

временной изменчивости фитопланктона, сезонной цикличности и условий весенне-летнего и осеннего цветения в Северо-Восточной части Атлантического океана.

Делается сравнение спутниковых измерений с измерениями *in situ* в Северо-Восточной части Атлантического океана. Спутниковые значения первичной продукции лежат в тех же пределах что и значения измеренные *in situ* для соответствующих широт однако обычно имеют тенденцию к завышению относительно *in situ* значений, причём разница эта практически отсутствует в тропических водах и возрастает к северу. Сравнение спутниковых значений концентрации хлорофилла с соответствующими *in situ* измерениями для субтропической части Северо-Восточной Атлантики говорит о соответствии контактным измерениям как данных SeaWiFS так и данных MODIS. В целом можно отметить, что алгоритмы MODIS имеют тенденцию немного занижать значения концентрации хлорофилла в этом регионе, в то время как данные SeaWiFS иногда завышены. В среднем, разница между *in situ* и спутниковыми измерениями концентрации хлорофилла имеют порядок от нескольких процентов до нескольких десятков процентов, однако для исследований пространственно-временной изменчивости на крупных масштабах эти ошибки менее критичны, нежели при рассмотрении абсолютных значений в отдельные моменты времени.

Во второй главе «Использование спутниковых методов для изучения пространственно-временной изменчивости фитопланктона в океане» даётся описание показателей, характеризующих биотическое состояние океана, рассчитываемых по спутниковым данным. Даётся обзор методов измерения концентрации хлорофилла и первичной продукции *in situ* и при помощи спутниковых наблюдений.

Приводятся основные особенности спутниковых измерений спектральных характеристик океана спекторорадиометрами SeaWiFS и MODIS.

В третьей главе «Исходная океанологическая спутниковая информация. Методы анализа океанографических условий» описывается исходная спутниковая информация. В работе были использованы объединённые спутниковые данные о концентрации хлорофилла-А, полученные из базы HERMES за 1997-2010 гг. дискретностью по времени 8 суток и пространственным разрешением 25 км.

Описываются методы анализа спутниковой информации использованные в работе. Излагаются предложенные автором модификации и усовершенствования визуального представления результатов вейвлет-анализа географических данных. Даётся описание метода динамико-стохастического анализа биотической информации, предложенного В.Р.Фуксом и реализованного впервые автором диссертации для различных районов Мирового океана. Суть метода заключается в нахождении эмпирических и полуэмпирических коэффициентов, входящих в уравнение переноса, диффузии и биотической трансформации методами множественной регрессии.

В качестве основного уравнения, описывающего пространственно-временную изменчивость концентраций хлорофилла принято уравнение переноса, диффузии и биотической трансформации вещества:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + w \frac{\partial P}{\partial z} + w_q \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial P}{\partial z} \right) + AP + aP + bP^2,$$

где t - время, x, y, z - декартовы координаты, ось OZ направлена вертикально вниз, P - концентрация хлорофилла, w_q - скорость гравитационного осаждения, k - коэффициент вертикальной турбулентной диффузии, A - коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии. a и b - биотические члены, описывающие поведение популяции с помощью логистического уравнения, предложенного Ферхюльстом, a - коэффициент скорости продуцирования хлорофилла за счёт фотосинтеза, b - коэффициент ограничивающий скорость роста концентраций хлорофилла за счёт внутривидовой конкуренции.

При интегрировании исходного уравнения до нижнего горизонта фотического слоя оно принимает следующий вид:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + A \Delta P + a_1 P + a_2 P^2$$

В предложенном динамико-стохастическом анализе полученное уравнение рассматривается в следующем виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = a_0 + a_1 \frac{\partial P}{\partial x} + a_2 \frac{\partial P}{\partial y} + a_3 \Delta P + a_4 P + a_5 P^2,$$

где $\frac{\partial P}{\partial t}$ - предиктант; $\frac{\partial P}{\partial x}$, $\frac{\partial P}{\partial y}$, ΔP , P , P^2 - предикторы; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ - коэффициенты регрессии. Коэффициенты регрессии имеют определённый физический смысл: a_0 - средняя фоновая скорость изменения концентрации хлорофилла (учитывающая воздействие всех неучтённых факторов, включая вертикальную турбулентную диффузию и выедание), $a_{2,3}$ - зональные и меридиональные составляющие скоростей течений, a_4 - коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии, a_5 - коэффициент скорости продуцирования хлорофилла, a_6 - коэффициент ограничивающий скорость увеличения концентраций хлорофилла за счёт внутривидовой конкуренции фитопланктона.

Аппарат множественной регрессии позволяет оценить адекватность принятой модели, получить оценки коэффициентов регрессии, входящих в уравнение, численное значение которых должно соответствовать составляющим скоростей течения, коэффициенту горизонтальной турбулентной диффузии и эмпирическим коэффициентам биотической части уравнения. Точность модели оценивается стандартными методами принятыми в множественном регрессионном анализе.

В четвёртой главе «Перенос и диффузия первичных продуцентов в Северо-Восточной Атлантике» рассматриваются особенности переноса и диффузии фитопланктона в Северо-Восточной части Атлантического океана. В первом разделе выявляются общие закономерности пространственно-временной изменчивости фитопланктона. В целом отмечается зональный характер пространственной изменчивости концентрации хлорофилла и первичной продукции, с выраженным фронтом в районе 37°с.ш. Наибольшая изменчивость исследуемых характеристик наблюдается в северной части исследуемого района. При рассмотрении сезонной изменчивости можно выделить три различных области открытого океана с характерными режимами - южный район, соответствующий тропической водной массе, северный район с преобладанием умеренных водных масс и переходный район на широте Азорских островов, который можно назвать субтропическим. В сезонной изменчивости как северного,

так и южного района можно наблюдать начало весеннего цветения в марте с пиком продуктивности в июне, а затем медленный спад продуктивности вплоть до января. Весеннее цветение в центральном районе медленно начинается уже в январе-феврале, достигая максимума цветения в апреле-мае. Начиная с мая максимум цветения переходит в более северные районы, а в центральном идёт на спад, достигая минимальных значений в октябре. Начиная с ноября в северной части в районе 38–44° с.ш. начинается осеннее цветение. Район повышенной продуктивности в декабре-январе смещается южнее в широты 32 – 38° с.ш., давая начало новой вспышке весеннего цветения.

Для исследования межгодовой изменчивости первичной продукции были построены диаграммы «широта-время» вдоль 4 меридианов – 15°, 20°, 27°, 32° з.д. За рассматриваемый промежуток времени наименее продуктивными являлись 2005 и 2007 годы. Также обнаружено наличие двух вспышек цветения в самых южных частях района (23–26° с.ш.), которые были плохо заметны на осреднённых по месяцам картах.

Для выявления основных энергонесущих периодов, вносящих вклад в общую изменчивость концентрации хлорофилла в отдельных точках района был проведён спектральный анализ. Во всех рассматриваемых точках (рис. 1), как и следовало ожидать, доминирует годовая составляющая колебаний. В центральной части района наблюдаются явно выраженные полугодовые колебания, в то время как в южной точке и особенно в северной полугодовая составляющая выражена слабо. Также, в северной и южной точке можно заметить ярко выраженный пик спектральной плотности на периоде 3-4 года. Во всех точках можно наблюдать относительно слабо выраженный пик на периоде 1.5 – 1.8 года.

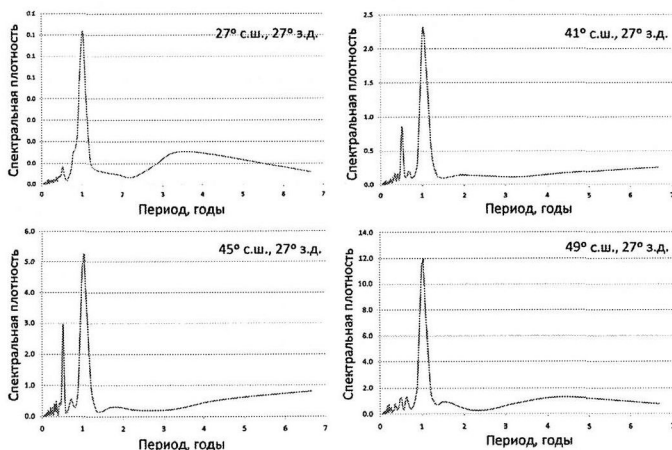


Рис. 1. Графики спектральной плотности концентрации хлорофилла в отдельных пунктах района.

Для выявления пространственных неоднородностей в распределении интенсивности колебаний различных периодов изменчивости концентрации хлорофилла были построены спектрограммы концентрации хлорофилла вдоль различных долгот в пределах исследуемого района. В северо-западной части

района помимо описанной ранее годовой и полугодовой изменчивости наблюдаются также участки с заметными 3-летними колебаниями, прослеживающимися вплоть до 32° с.ш. В пределах 26–40° можно наблюдать наличие слабовыраженного 3.5-4-летнего колебания.

На спектрограммах, соответствующих более восточным районам, вклад 3-летних колебаний в изменчивость хлорофилла медленно снижается и к 27° з.д. колебание заметно лишь в небольшом участке вблизи 43° с.ш. В то же время, в прибрежных районах интенсивнее проявляются 3.5-4-летние колебания, которые по вкладу уже сравнимы с полугодовой составляющей. В отдельных районах можно также заметить 2-летнее и 2.5-летнее колебания. При непосредственной близости к континенту, на долготе 10° з.д. 3.5 – 4-летние колебания начинают проявляться в ещё более обширном регионе и по интенсивности уже могут быть сравнимы с годовыми колебаниями.

Для изучения зон с доминирующими колебаниями различных периодов были построены карты их пространственного распределения (Рис. 2).

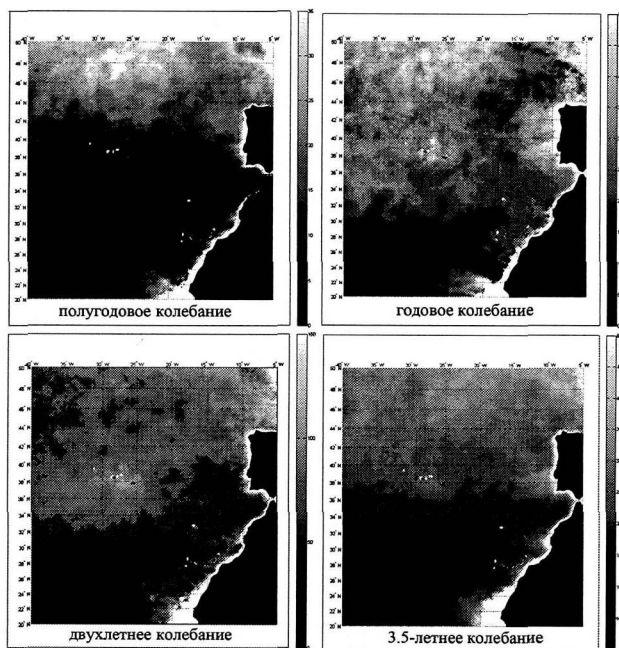


Рис. 2. Распределение интенсивности колебаний первичной продукции на разных периодах в пространстве

Для исследования статистической нестационарности пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла в отдельных точках региона был проведён вейвлет-анализ временных рядов первичной продукции.

В межгодовой изменчивости следует отметить 2-2.5 летнее колебание и 3.5 летнее колебание, которое довольно чётко выделяется на всём временном отрезке.

Около двухлетние колебания имеют тенденцию к изменению периодичности от 2.3 года, до 1.8 лет.

Для исследования пространственно-временной изменчивости первичной продукции методика вейвлет-анализа временных рядов была дополнена построением вейвлет-изоплет. На большинстве меридиональных разрезов полугодовых вейвлет-изоплет первичной продукции в Азорском регионе чёткая граница между ярко выраженной полугодовой периодичностью и практическим отсутствием таковой проходит не на широте Азорского фронта (разделяющего тропические и субтропические воды), а на 37-38° с.ш. Наличие этой границы связано с тем, что в отличие от более высоких широт, в тропиках сезонная изменчивость численности фитопланктона характеризуется годовой гармоникой, с летним минимумом и зимним максимумом, а весенняя и осенняя вспышки цветения практически отсутствуют. Зимний максимум связан с сезонным усилением пассатов, которые, усиливая вертикальное перемешивание, всё же не могут разрушить «сезонный» термоклин. Таким образом, верхний перемешанный слой весь год остается меньше фотического слоя, что приводит к отсутствию условий для формирования весенней и осенней вспышек цветения, и объясняет слабую выраженность полугодовых колебаний в тропиках – там доминируют годовые циклы.

Результаты спектрального и вейвлет анализов демонстрируют периодичности, отмечаемые рядом авторов при исследовании явления Северо-Атлантического колебания, поэтому нами были предприняты попытки выявления численной связи между изменчивостью первичной продукции и индексом Северо-Атлантического колебания. Схожие периоды в изменчивости индекса NAO и первичной продукции по данным вейвлет-анализа позволяют нам говорить о вероятной их связи. Для количественной проверки связи в каждой точке исследуемого региона был рассчитан коэффициент корреляции, которые в среднем для всего региона невелик, однако достигает значений 0.5 в отдельных областях. В северной части района связь между значениями обратная, в южной части связь прямая.

В четвёртом разделе главы приводятся результаты динамико-стохастического анализа проведённого в каждой узловой точке сетки (19200 точек). Были рассчитаны и картированы значения коэффициентов регрессии, а также значение коэффициента множественной корреляции. В среднем по району для всего периода времени значения коэффициента множественной корреляции не велики и не превышают 0.5, хотя в отдельных районах могут достигать 0.6. При проведении анализа для отдельных сезонов, коэффициенты выросли до 0.7-0.8. Полученные значения коэффициентов уравнения регрессии не противоречат известным их оценкам по данным натуральных измерений. Так, значения коэффициентов, характеризующих скорости течения имеют порядок 10-20 см/с. Значения коэффициентов горизонтальной турбулентной диффузии имеют порядок 10^6 см²/с. Сравнительный вклад биотических и абиотических факторов в пространственно-временную изменчивость первичной продукции крайне неравномерен по акватории и не имеет выраженной локализации. В целом, наибольший вклад вносят биотические факторы, а среди динамических факторов наиболее значима горизонтальная турбулентность.

В конце главы даётся описание пространственно-временной изменчивости биотических полей в других районах мирового океана, где автором также были

проведены исследования и дан сравнительный анализ этих результатов с результатами исследований по Северо-Восточной части Атлантического океана. Наибольшая адекватность модели проявляется вблизи динамически активных районов с большой продуктивностью, а также вблизи фронтальных зон. Наибольший вклад в пространственно-временную изменчивость первичной продукции вносят биогические факторы, достигая 50% и выше, а среди динамических факторов наиболее значима горизонтальная турбулентность (её вклад достигает 30%).

В заключении излагаются основные результаты работы:

- 1) На основе проведённого обзора литературных источников обобщены основные представления о механизмах и степени воздействия переноса и диффузии на формирование зон повышенной биологической продуктивности. Показано, что вопрос о влиянии адекватности и турбулентной диффузии на распределение фитопланктона в океане остаётся малоизученным.
- 2) На основе пространственного распределения математического ожидания и среднеквадратического отклонения концентрации хлорофилла и первичной продукции, полученных по спутниковым данным и обзоров оценок этих характеристик по литературным источникам описаны основные закономерности пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла и первичной продукции в Северо-Восточной части Атлантического океана. На основе спутниковых измерений описана многолетняя пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла и первичной продукции для различных масштабов осреднения. В поле концентрации хлорофилла на широтах 35-36° и около 37° с.ш. проявляются биотические фронты, разделяющие акваторию на северную (более высокие значения концентрации хлорофилла) и южную части (более низкие значения концентрации хлорофилла). Установлено достаточно хорошее соответствие спутниковых и контактных оценок концентрации хлорофилла и первичной продукции для исследуемого региона.
- 3) Разработаны новые методы визуализации и интерпретации результатов вейвлет-анализа и на их основе выявлены пространственные особенности распределения нестационарности циклов изменчивости концентрации хлорофилла с масштабами полугода, год, 3.5 года и два года. Для годовых циклов отмечается уменьшение интенсивности колебаний в 2002-2003 гг. Для четырёхлетних и двухлетних циклов нестационарность выражена незначительно. Для всех масштабов отмечается выраженное увеличение интенсивности колебаний в северной части региона.
- 4) Установлена связь особенностей биотических циклов первичной продукции в Северо-Восточной части Атлантического океана с Северо-Атлантическим колебанием (NAO). Для исследования индекса NAO впервые был применён метод вейвлет-анализа, выявивший сложную структуру изменчивости индекса NAO: наличие многих масштабов изменчивости, тренды, перераспределение во времени энергии колебаний индекса по временным масштабам. Показано, что в промежутке 1998-2010 гг. в изменчивости NAO доминируют также полугодовые, годовые, двухлетние и 3.5-4-летние циклы.
- 5) Разработан и применён к Северо-Восточной части Атлантического океана оригинальный динамико-стохастический анализ спутниковой информации о концентрации хлорофилла и первичной продукции. Коэффициент множественной корреляции, как показатель связи исходных данных и полученных по уравнению для центральной части района достигает 0.6 - 0.7, а на отдельных отрезках времени

0.7 – 0.8, что говорит об адекватности предлагаемой модели для данных районов и временных периодов. Также модель адекватна по критерию Фишера. Наибольшая адекватность модели проявляется вблизи динамически активных районов с большой продуктивностью, а также вблизи фронтальных зон. Наибольший вклад в пространственно-временную изменчивость первичной продукции вносят биотические факторы, достигая 50% и выше, а среди динамических факторов наиболее значима горизонтальная турбулентность (достигая 30%).

Публикации автора в изданиях по перечню ВАК:

1) Белоненко Т.В., **Колдунов А.В.**, Фукс В.Р. Адвекция хлорофилла “А” волнами Россби. Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2011. Вып. 4. С. 107-110.

2) Белоненко Т.В., **Колдунов А.В.** Исследование спутниковой информации о первичной продукции в Азорском регионе при помощи вейвлет-анализа. Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2010. Вып. 2. С. 109-116.

3) Старицын Д.К., Фукс В. Р., **Колдунов А.В.** Дивергенции течений и формирования зон повышенной биологической продуктивности в Японском море. Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2010. Вып. 4. С. 58-73.

4) **Колдунов А.В.**, Черкашѐва А.Г. Исследование пространственно-временной изменчивости первичной продукции Азорского района по данным спутниковых измерений. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Том 1, Выпуск 6. 2009. с. 392-399

5) Белоненко Т.В., **Колдунов А.В.** Стерические колебания уровня океана в северо-западной части Тихого океана при различных климатических сценариях. Изв. РГО. 2009. Т.141. Вып.1. с. 29-33.

6) Белоненко Т.В., **Колдунов А.В.** «Стерические колебания уровня в северо-западной части Тихого океана». Вестник СПбГУ. Сер. 7. 2006. Вып. 3. С. 81-88.

7) Белоненко Т.В., **Колдунов А.В.** Взаимосвязь колебаний уровня и температуры воды в северо-западной части Тихого океана. «Известия ТИНРО». 2005. С. 273-280.

Прочие публикации автора:

8) Белоненко Т. В., **Колдунов А. В.**, Колдунов В. В., Май Р. И., Рубченя А. В., Старицын Д. К., Фукс В. Р. Атлас изменчивости уровня северной части Тихого океана. Издательство СММО-ПРЕСС, СПб, 2011. 304 с.

9) Belonenko T. and **Koldunov A.** Non-stationary cycles of primary productivity in the Northeastern Atlantic. PICES-2011. Annual Meeting Mechanisms of Marine Ecosystem Reorganization in the North Pacific Ocean October 14-23, 2011, Khabarovsk, Russia, 2011.

10) Belonenko T., Foux V., Koldunov V., **Koldunov A.** and Staritsyn D. Sea-surface levels in the Northwestern Pacific as indicators of local and global tendencies in climate change. PICES-2011. Annual Meeting Mechanisms of Marine Ecosystem Reorganization in the North Pacific Ocean October 14-23, 2011, Khabarovsk, Russia, 2011.

11) Белоненко Т.Б., Захарчук Е.А., **Колдунов А.В.**, Смирнов К.Г., Старицын Д.К., Тихонова Н.А., Фукс В.Р. Опыт использования спутниковой информации для оценки и прогноза биологической и промышленной продуктивности различных

районов Мирового океана. Вопросы промысловой океанологии. Вып.7, №1. Москва, ВНИРО. 2010. С.206-225

12) **Koldunov A.V.** Variability of the biotic material flow divergence patterns of the Azores. International Symposium on «Climate Change Effects on Fish and Fisheries: Forecasting Impacts, Assessing Ecosystem Responses, and Evaluating Management Strategies. April 25 – 29, 2010 Sendai, Japan». Book of Abstracts p. 194.

13) Belonenko T.V. and **Koldunov A.V.** The North-Atlantic Oscillation and biotical cycles within the Azores region. International Symposium on «Climate Change Effects on Fish and Fisheries: Forecasting Impacts, Assessing Ecosystem Responses, and Evaluating Management Strategies. April 25 – 29, 2010 Sendai, Japan». Book of Abstracts p. 65.

14) Фукс В.Р., **Колдунов А.В.** Динамические и биотические фронты Белого моря. В сборнике «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря». Материалы XI Всероссийской конференции с международным участием. 9-11 ноября 2010 г.». СПб: ЗИН РАН. 2010. - 223 с. (196-197).

15) Белоненко Т.В., Колдунов В.В., **Колдунов А.В.**, Старицын Д.К., Фукс В.Р. Спутниковая альтиметрия северо-западной части Тихого океана. Мореходство и морские науки-2009: избранные доклады Второй Сахалинской региональной морской научно-технической конференции (23 сентября 2009 г.) / Под ред. В. Н. Храмушина. – Южно-Сахалинск: СахГУ, 2010. – 292 с. (стр. 105-119)

16) Башмачников И.Л., Белоненко Т.В., **Колдунов А.В.** Северо-Атлантическое колебание и его влияние на формирование биотических циклов в Азорском регионе. Вопросы промысловой океанологии. Выпуск 6, №2. Под ред. А.П. Алексеева, Б.Н. Котенева, В.Н. Кочкива, В.В. Масленникова. - М.: Изд-во ВНИРО, 2009. 214 с. 48-70 с.

17) **Колдунов А.В.**, Фукс В.Р. Динамико-стохастический анализ пространственно-временной изменчивости первичной продукции в Японском море. В сборнике "Достижения в спутниковой океанографии: изучение и мониторинг окраинных морей Азии (к 50-летию запуска первого искусственного спутника Земли)". Материалы международной научной конференции. Владивосток: Дальнаука, 2007. 160 с. (стр. 73-75)

18) **Колдунов А.В.**, Фукс В.Р. Динамико-стохастический анализ изменчивости первичной продукции в океане на основе спутниковой информации. В сборнике «Большие морские системы России в эпоху глобальных изменений (климат, ресурсы, управление): Материалы международной научной конференции (Ростов-на-Дону, 10-13 октября 2007 г.)». Ростов-на Дону: Изд-во ЮНЦ РАН, 2007. 312 с. (стр. 70-72).

19) Фукс В.Р., **Колдунов А.В.** Динамико-стохастический анализ первичной продукции Белого моря на основе спутниковой информации. В сборнике «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. Материалы X Международной конференции.» Архангельск: Изд-во СГМУ, 2007. - 478 с. (230-233).

20) **Колдунов А.В.**, Кузьмина А.А., Фукс В.Р. Спутниковый мониторинг фронтальных зон Белого моря. В сборнике «Проблемы изучения, рационального использования и охраны природных ресурсов Белого моря. Материалы X Международной конференции.» Архангельск: Изд-во СГМУ, 2007. - 478 с. (31-33).

21) Belonenko T. V. and **Koldunov A.V.** Steric level of a northwest part of pacific ocean at various climatic scenarios. PEACE III, Qingdao, China. 29-30 November, 2006.

22) Belonenko T.V. and **Koldunov A.V.** Rates of steric sea-level variation for the Kuril area in the North Pacific. North Pacific Marine Science Organization. 15th Annual Meeting, Japan, Yokohama. (POC_Paper-2770). PICES XV. 2006. P. 159.

23) Белоненко Т.В., **Колдунов А.В.** Исследование взаимосвязи колебаний уровня и температуры воды в северо-западной части Тихого океана на основе спутниковой информации. Тезисы докладов семинара «Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов мирового океана» 14-17 сентября 2004 г. Владивосток, ТИНРО-Центр. С. 41-43.

24) Belonenko T. V. and **Koldunov A.V.** Research of the interrelation of a sea level deviations and water temperature fluctuations in the northwest part of the Pacific on the satellite information basis. North Pacific Marine Science Organization. Thirteenth Annual Meeting, Hinolulu, Hawaii, USA. (S11-1806) PICES XIII. 2004. P. 151.

Подписано в печать 17.04.2012г.
Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз.
Заказ № 2594.

Отпечатано в ООО «Издательство “ЛЕМА”»
199004, Россия, Санкт-Петербург, В.О., Средний пр., д. 24
тел.: 323-30-50, тел./факс: 323-67-74
e-mail: izd_lemma@mail.ru
<http://www.lemaprint.ru>