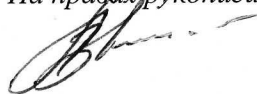


На правах рукописи



Алексеева Ирина Викторовна

**Физико-биогеохимическая модель динамики
экосистемы Северного моря**

Специальность 25.00.28 - Океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва - 2011

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН Ибраев Рашит Ахметзиевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор Зырянов Валерий Николаевич
Учреждение Российской академии наук Институт водных проблем РАН

кандидат биологических наук, старший научный сотрудник Арашкевич Елена Германовна
Учреждение Российской академии наук Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Ведущая организация: Институт водных проблем Севера Карельского научного центра РАН

Защита диссертации состоится 06 декабря 2011 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 002.239.02 при Учреждении Российской академии наук Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН, по адресу: 117997, г. Москва, Нахимовский пр-т, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения Российской академии наук Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан «2» ноября 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук

 А.И. Гинзбург

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Благодаря длительному всестороннему мониторингу Северное море считается одним из наиболее изученных. Несмотря на это, существующий уровень изученности недостаточен для описания основных экосистемных процессов и решения задач, связанных с оценкой изменчивости биологической продуктивности моря. Полагают, что основные биологические процессы и репродуктивность основных видов рыб в Северном море тесно связаны с мезомасштабными гидродинамическими процессами, которые обусловлены взаимодействием приливов с формами топографии дна. Отмечается, что повышенная продуктивность планктона в Северном море может быть связана с наличием приливных фронтов, а также с возникновением летнего подповерхностного максимума биомассы планктона в районах с устойчивой вертикальной стратификацией.

В отличие от методов изучения динамики морских экосистем, которые основаны на анализе данных натурных наблюдений, математические модели позволяют проводить комплексное исследование изменчивости абиотических и биотических факторов и их взаимодействия в морской экосистеме. Модели могут использоваться для изучения механизмов функционирования морских экосистем, синтеза комплексной информации мониторинга, проведения численных экспериментов сценариев развития экосистем и оценки экологических рисков. В международной морской политике широко применяется экосистемный подход в сферах осуществления контроля над рыбным промыслом и охраны морских ресурсов. Эффективность математических моделей в решении комплексных задач, связанных с формированием и осуществлением экосистемного подхода, предопределила их интенсивное развитие в последнее десятилетие.

Предметом исследования является динамика экосистемы Северного моря. На основе разработанной модели и полученных данных моделирования изучаются основные особенности динамики экосистемы моря и механизмы ее отклика на изменчивость внешних условий.

Основная цель диссертационной работы заключается в разработке модели морской экосистемы и ее применении для Северного моря. Для достижения основной цели были поставлены следующие задачи:

- Разработать трехмерную физико-биогеохимическую модель для имитации динамики нижних трофических уровней пищевой цепи экосистемы, учитывая влияние основных мезомасштабных гидродинамических процессов и

формирование сезонных приливных фронтов в Северном море. Требованием к биогеохимическому блоку модели было включение в него в качестве модельных прогностических компонент зоопланктона и основных для Северного моря биогенных элементов.

- Провести валидацию модели относительно данных наблюдений.
- На основе полученных модельных данных провести анализ сезонной и межгодовой изменчивости динамики планктона и выявить основные механизмы, регулирующие биологическую продуктивность в Северном море.

На защиту выносятся следующие результаты:

- Разработана математическая модель для исследования динамики морских экосистем. Данная модель, которая получила название ECOSMO (ECOSystem MOdel), была создана путем совмещения разработанного биогеохимического модельного блока с существующей трехмерной физической моделью (модель HAM SOM). Разрешение модели составляет 10 км по горизонтали, 20 вертикальных уровней, шаг по времени 20 мин.
- Получены результаты модельного расчета на период 1980–2004 гг., которые представляют собой массивы трехмерных суточных значений прогностических компонент модели (биомасса и продукция планктона, концентрации биогенных веществ, а также температура, соленость, поле скоростей и др. гидродинамические параметры и индексы). Создана база данных модели ECOSMO.
- Проведена валидация модельных прогностических компонент биогеохимического блока относительно данных наблюдений.
- На основе анализа модельных результатов выявлены: основные особенности сезонной и межгодовой изменчивости планктонного сообщества в Северном море и их связь с метеорологическим воздействием и характерными для моря мезомасштабными гидродинамическими режимами, определены районы моря, комплекс условий в которых обеспечивает высокую потенциальную репродуктивность шпрота.

Обоснованность научных результатов и выводов. Диссертационная работа основана на использовании комплекса современных физико-математических методов, а также сочетании анализа данных натурных измерений и данных численного моделирования. В ходе проведенной валидации модели было показано, что результаты, полученные обоими методами, хорошо согласуются.

Научная новизна. С помощью разработанной модели ECOSMO впервые была получена многолетняя динамика согласованных полей физических параметров и биогеохимических характеристик, включая зоопланктон, с высоким пространственно-временным разрешением, которым обладает модель. Полученные модельные данные и проведенный на их основе анализ дают более полное представление о функционировании морских экосистем.

Научная и практическая значимость. Разработанная модель может применяться для изучения широкого ряда процессов в динамике морских экосистем и их отклика на воздействие природных и антропогенных факторов. Одно из преимуществ модели заключается в возможности прогностического расчета динамики биомассы и продуктивности зоопланктона – основы пищевой базы для многих видов рыбы и марекультур. Модель ECOSMO для Северного моря и полученные данные моделирования могут использоваться для комплексного анализа в поиске взаимосвязи между изменчивостью моделируемых гидродинамики и динамики планктона с известной из наблюдений изменчивостью рыбных запасов. Модель также является основой для осуществления следующего шага в изучении морских экосистем – математического описания жизнедеятельности высших звеньев трофической пищевой цепи с учетом жизненного цикла и индивидуального поведения рыб. С практической точки зрения это означает возможность научно обоснованной эксплуатации рыбных ресурсов.

Личный вклад автора. Автором лично был разработан модельный биогеохимический блок, а также проведено совмещение биогеохимического блока с существовавшей физической моделью. Кроме этого, было разработано программное окружение для обработки топографии и граничных условий и анализа результатов моделирования. Автором были проведены многолетний модельный расчет с предшествующей калибровкой модели и анализ полученных результатов, включая валидацию модели и исследование изменчивости экосистемы Северного моря. Также была создана база данных модели ECOSMO.

Публикации по теме диссертации. Было опубликовано 10 работ, 3 из которых опубликованы в журналах из списка ВАК, 7 публикаций – тезисы в трудах конференций.

Апробация работы. Работа проводилась в рамках нескольких европейских проектов и вошла в официальные отчеты. По теме диссертации сделаны доклады на научных конференциях и семинарах: Украинско-

русский семинар «Компьютерное моделирование динамики вод морей и Мирового океана: достижение и проблемы», МГИ НАНУ, 2011, Севастополь, Украина; Совместное заседание Ученых советов Физического направления и направления Экологии морей и океанов ИО им. П.П. Ширшова РАН, 2011, Москва, Россия; Семинар по изучению взаимодействия атмосфера-океан, Геофизический институт университета Бергена, 2009, Норвегия; Интернациональный совет по эксплуатации моря, Ежегодная конференция, 2009, 2007 и 2003, Хельсинки, Финляндия; Конференция Европейского Геофизического общества, 2007, Вена, Австрия.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и 1 приложения. Работа объемом 170 страниц включает 50 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 112 наименований.

Благодарности. Работа проводилась в сотрудничестве с соавторами статей по теме диссертации: проф. Коринна Шрум, проф. Михаэль Ст. Джон, др. Ута Довел. Важный вклад внесла проф. Коринна Шрум, которая была лидером группы. Данные наблюдений CPR для валидации модели были предоставлены др. Рабекой Дикман. Диссертация была написана под руководством член-корр. РАН Ибраева Рашита Ахметзиевича, которому я благодарна за ценные научные указания. Также я благодарна академику РАН Саркисяну Артему Саркисовичу за поддержку в работе и замечания при подготовке к защите диссертации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении раскрывается актуальность научной темы, формулируются цели и задачи работы, приводятся обоснования для выбранной методики решения поставленных задач, представлена научная новизна и практическое значение работы, сообщается о публикациях и докладах по теме диссертации. Описываются результаты работы, выносимые на защиту. В конце введения даются структура и краткое содержание работы.

В Первой Главе обсуждаются вопросы, связанные со степенью изученности динамики экосистемы Северного моря и современными научными возможностями и задачами в области изучения морских экосистем. В первую очередь, делается анализ данных наблюдений и выводы об их информативности, приводятся основные сведения о динамике экосистемы Северного моря. Далее рассматриваются современные подходы для построения моделей морских экосистем, основное внимание уделяется разработке биогеохимических модельных блоков, и дается обзор существующих моделей

экосистемы Северного моря. На основе указанного материала была построена стратегия разработки модели ECOSMO, которая описывается в конце главы.

Обширный обзор существующих данных наблюдений по Северному морю был сделан в ходе проекта SYCON (Synthesis and New Conception of North Sea Research). При относительно хорошей изученности гидродинамики Северного моря полученная оценка научного потенциала данных для исследования изменчивости планктона и биогенов и их использования в модельных исследованиях была невысокой.

Основные факторы влияния на динамику моря составляют метеорологическое воздействие, сток рек, приливы и водообмен с Атлантическим океаном и Балтийским морем. Комплексное влияние этих факторов обуславливает сложную картину пространственно-временной изменчивости экосистемы моря. Полагают, что влияние приливов и их взаимодействие с топографией дна в Северном море является доминантным. С этим связана важная особенность Северного моря - формирование различных сезонных гидродинамических режимов и вследствие этого сильная пространственная неоднородность мезомасштабных процессов.

Средняя глубина Северного моря составляет менее 100 м. Пологая поверхность морского дна характеризуется общим увеличением глубин к северу и множеством небольших подводных отмелей – банок в Средней части моря. Наиболее значимыми являются Доггер Банка и Большая Рыбная Банка, минимальные глубины над ними составляют 18 и 30 м соответственно. В Северном море высота приливов увеличивается от 0.2 м у берегов Норвегии до 7.5 м у побережья в районе пролива Ла-Манш. Приливные течения ориентированы параллельно береговой линии и достигают максимума 10 м с^{-1} в Южной части моря. За исключением Норвежского желоба, где взаимодействие североатлантической и балтийской водных масс обуславливает существование постоянного галоклина на глубине 70-200 м, с декабря по февраль верхний слой моря полностью перемешан. В Средней и Северной частях моря вертикальная стратификация устанавливается по ходу сезонного увеличения температуры, начиная с марта - апреля. Вместе с этим, в районах с глубиной менее 40-50 м в Южной части, вдоль берегов Великобритании и европейского берега, а также над банками преобладающее влияние оказывает приливное воздействие. Вследствие этого здесь формируются зоны постоянного перемешивания. Фронтальные зоны представляют собой области раздела между районами с устойчивой стратификацией и районами постоянного вертикального

перемешивания и четко выражены в Северном море. Таким образом, в Северном море образуются несколько типов мезомасштабных гидродинамических режимов, их локализация показана на рис. 1а. В центре моря выражен приливной фронт над Доггер Банкой.

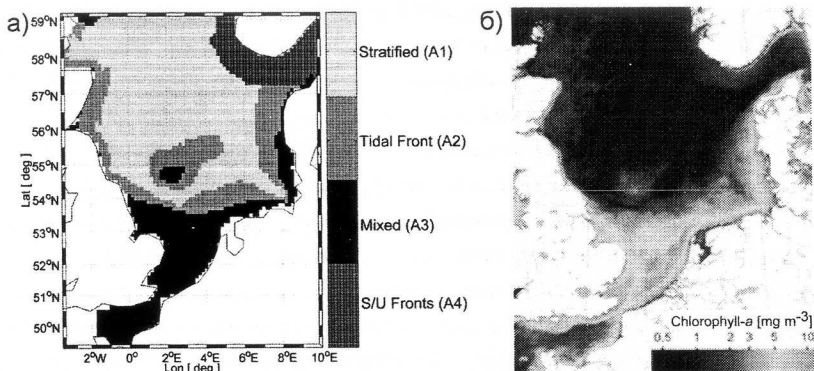


Рис. 1. а) Локализация районов гидродинамических режимов Северного моря: А1 – устойчивая вертикальная стратификация, А2 – приливной фронт, А3 – постоянное вертикальное перемешивание, А4 – система течений Норвежского Желоба. Составлено на основе многолетнего расчета модели ECOSMO [База данных ECOSMO, 2007]. б) Годовое распределение концентрации хлорофилла в верхнем 15-метровом слое в Северном море за 2003г из Атласа спутниковых данных MERIS.

Северное море - одно из наиболее продуктивных, здесь добывается 5 % от мирового улова. Распределение планктона по пространству в море неоднородно (рис. 1б). Районы повышенной первичной продукции и биомассы фитопланктона привязаны к береговым зонам благодаря притоку биогенов со стоком рек и зонам приливных фронтов, где вертикальное перемешивание и конвергенция на интерфейсе фронта обуславливают подкачку биогенов из-под пикноклина в эвфотическую зону. На рисунке видно, что вместе с максимумами значений хлорофилла вблизи берега, повышенные значения локализованы во фронтальных зонах при выходе из Южной части моря и над Доггер Банкой. Заметим, что спутниковые данные не отражают вклад подповерхностного хлорофилла во фронтальных районах, а также подповерхностный максимум, который образуется летом на глубине пикноклина в районах с устойчивой стратификацией. В настоящее время изученность фронтальных процессов и процессов в подповерхностном максимуме недостаточна, чтобы дать объяснение их внутренней динамике.

Полагают, что благодаря этим процессам создается большая часть годовой первичной продукции в Северном море.

В соответствии с поставленной в работе целью исследования основными требованиями к модели были: обеспечить разрешение мезомасштабных пространственных процессов и реалистично воспроизвести динамику планктона, учитывая зоопланктон и основные циклы биогенных элементов в Северном море (азота, фосфора и кремния). Важным принципом для построения моделей экосистем является оптимальный баланс между количеством модельных компонент, которое должно быть минимальным, чтобы избежать роста ошибки с ростом количества параметризаций, и наибольшим количеством процессов, которые можно при этом описать. Из нескольких существующих трехмерных моделей Северного моря необходимый набор модельных прогностических компонент включен только в модель POL3dERSEM [Lewis et al., 2006]. Биогеохимический блок этой модели описывает взаимодействие между более чем 40-а модельными компонентами, что было признано чрезмерным. Поэтому для ECOSMO был разработан собственный блок, который содержит минимальный набор модельных компонент в соответствии с поставленными требованиями к модели.

Основные принципы построения модели ECOSMO следующие:

- 1) высокое пространственно-временное разрешение, ориентированное на описание мезомасштабных гидродинамических процессов в Северном море;
- 2) ограниченный набор биогеохимических компонент и параметризаций;
- 3) использование доступных реалистичных данных при учете внешнего воздействия на модельную систему.

В Главе 2 дается описание модели ECOSMO и постановки задачи для моделирования динамики экосистемы Северного моря. Целью моделирования ставится воспроизвести сезонную и межгодовую изменчивость экосистемы максимально близко к реальной. Трехмерная совместная физико-биогеохимическая модель ECOSMO была разработана с использованием физического блока, который построен на основе существующей физической модели (модель HAMSOM, HAMBurg Shelf Ocean Model). Совмещение разработанного автором биогеохимического блока и данной физической модели потребовало преобразование программного кода HAMSOM, в результате созданная модель ECOSMO приобрела модульную структуру. Кроме этого для ускорения вычислений была проведена векторизация программного кода ECOSMO и осуществлен перенос модели на векторный суперкомпьютер.

Описание модели HAMSON, физического блока ECOSMO, и его валидации приводится в работе кратко и заимствовано из опубликованных ранее работ [Schrum and Backhaus, 1999; Janssen et al., 2001 и др.]. Модель HAMSON состоит из трех блоков:

Термо- и гидродинамика рассчитывается на основе полных уравнений гидродинамики в приближениях гидростатики и Буссинеска. Система уравнений включает трехмерные уравнения движения, неразрывности, гидростатики, переноса тепла и соли и состояния морской воды. В модели учитывается свободная поверхность уровня моря. При расчете коэффициентов вертикального турбулентного обмена подсеточные процессы параметризованы в рамках приближения $k-\varepsilon$, разработанного на основе работы Кочергина (1987). Численная реализация модельной системы уравнений удовлетворяет законам сохранения энергии и вещества. Численная аппроксимация уравнений осуществляется на пространственной сетке "C", вертикальные z-уровни располагаются неравномерно. Прогностические компоненты: трехмерные поля скорости (u, v, w), температуры, солёности, плотности, коэффициентов вертикальной турбулентной вязкости и диффузии (A_v и A_T) (горизонтальная диффузия не учитывается), а также относительная высота уровня моря.

Блок расчета льда представляет собой модель динамики-термодинамики льда с вязко-пластической реологией, которая построена на основе модели Хиблера. Вычисляются компактность, толщина и толщина торосов льда, двумерная скорость движения льда.

Блок расчета *турбулентного обмена на границе море/лед – атмосфера* вычисляет потоки импульса, тепла и воды на основании метеорологических условий (температура и удельная влажность на уровне 2 м над морем, скорость ветра на уровне 10 м) и температуры верхнего расчетного слоя модели.

Используемая в работе конфигурация модели прошла валидацию. Было показано, что HAMSON реалистично воспроизводит динамику Северного моря, как на синоптических пространственно-временных масштабах, так и межгодовую изменчивость. Например, был проведен пространственно-временной корреляционный анализ температуры поверхности моря, полученной из наблюдений и модельных расчетов, на период 1979-1990 гг. Использовались осредненные за неделю значения с разрешением 20 морских миль. Полученная линейная корреляция находится в пределах 0.74-0.86. При этом модель недооценивает климатическую изменчивость аномалий сезонного

цикла на ~ 0.2 °C. В ходе валидации модельной изменчивости уровня моря, которая была основана на суточных значениях измерений на гидрографической станции Дегерби в период 1980-1988 гг., были получены коэффициент корреляции 0.96 и среднеквадратическая ошибка 0.07 м. Основные выявленные недостатки модели обнаруживаются вблизи открытой жидкой северной границы модельной области.

Биогеохимических блок модели состоит из системы 12-ти уравнений вида:

$$C_t + (\mathbf{v} \cdot \nabla)C + (w + w_d)C_z = (A_T C_z)_z + R_C,$$

где C прогностические модельные компоненты: P_d - диатомовые водоросли, P_f - флагелляты, Z_s - гетеротрофный и Z_l - всеядный зоопланктон, D - детрит, NO_3 - нитрат, NO_2 - нитрит, NH_4 - аммоний, PO_4 - фосфат, SiO_2 - силикат, Opal - биогенный опал, O_2 - кислород, ∇ - двумерный оператор градиента, динамические параметры $\mathbf{v} = (u, v)$ - двумерный вектор скорости, а также w и A_T вычисляются в физическом блоке. В отличие от уравнений переноса физического блока, здесь имеются два дополнения: добавка к вертикальной компоненте скорости w_d , которая обозначает постоянную скорость гравитационного осаждения, ненулевую для детрита и биогенного опала, а также слагаемое R_C , которое обозначает прибыль/убыль локальных значений компонент из-за биологических и геохимических реакций:

$$R_{P_d} = \Phi_{P_d} P_d - G_1(P_d) Z_s - G_2(P_d) Z_l - m_{P_d} P_d \quad (1)$$

$$R_{P_f} = \Phi_{P_f} P_f - G_1(P_f) Z_s - G_2(P_f) Z_l - m_{P_f} P_f \quad (2)$$

$$R_{Z_s} = \gamma_1 [G_1(P_d) + G_1(P_f)] Z_s + \gamma_2 G_1(D) Z_s - G_2(Z_s) Z_l - \mu_s Z_s - m_{Z_s} Z_s \quad (3)$$

$$R_{Z_l} = \gamma_1 [G_2(P_d) + G_2(P_f) + G_2(Z_s)] Z_l + \gamma_2 G_2(D) Z_l - \mu_l Z_l - m_{Z_l} Z_l \quad (4)$$

$$\begin{aligned} R_D = & [(1 - \gamma_1) [G_1(P_d) + G_1(P_f)] - \gamma_2 G_1(D)] Z_s \\ & + [(1 - \gamma_1) [G_2(P_d) + G_2(P_f) + G_2(Z_s)] - \gamma_2 G_2(D)] Z_l \\ & + m_{P_d} P_d + m_{P_f} P_f + m_{Z_s} Z_s + m_{Z_l} Z_l - \varepsilon_D(T) D \end{aligned} \quad (5)$$

$$R_{\text{NH}_4} = \frac{1}{\text{REDF}_{C,N}} \left[-\Phi_{P_d} P_d + \Phi_{P_f} P_f \right] \frac{\beta_{\text{NH}_4}}{\beta_N} + \varepsilon_D D + \mu_s Z_s + \mu_l Z_l - \Omega_a(\text{O}_2, T) \text{NH}_4 \quad (6)$$

$$R_{\text{NO}_2} = \Omega_a(\text{O}_2, T) \text{NH}_4 - \Omega_n(\text{O}_2, T) \text{NO}_2 + \Omega_r(\text{O}_2, T) \text{NO}_3 - \Omega_d(\text{O}_2, T) \text{NO}_2 \quad (7)$$

$$R_{\text{NO}_3} = \frac{1}{\text{REDF}_{C,N}} \left[-\Phi_{P_d} P_d + \Phi_{P_f} P_f \right] \frac{\beta_{\text{NO}_3}}{\beta_N} + \Omega_n(\text{O}_2, T) \text{NO}_2 - \Omega_r(\text{O}_2, T) \text{NO}_3 \quad (8)$$

$$R_{\text{PO}_4} = \frac{1}{\text{REDF}_{C,P}} [-\Phi_{P_d} P_d + \Phi_{P_f} P_f] + \varepsilon_D(T) D + \mu_s Z_s + \mu_l Z_l \quad (9)$$

$$R_{SiO_2} = \frac{1}{REDF_{C, Si}} [-\Phi_d P_d + \varepsilon_{Si} Opal] \quad (10)$$

$$R_{Opal} = \frac{1}{REDF_{C, Si}} [G_1(P_d)Z_s + G_2(P_d)Z_l + m_d P_d - \varepsilon_{Si} Opal] \quad (11)$$

$$R_{O_2} = \Phi_{P_d} P_d + \Phi_{P_f} P_f \cdot \frac{6.625\beta_{NH_4} + 8.125\beta_{NO_3} - 6.625(\varepsilon_D D + \mu_s Z_s + \mu_l Z_l)}{\beta_N} - \frac{2}{3}(\Omega_o(O_2, T)NH_4 + \Omega_n(O_2, T)NO_2) + \Omega_r(O_2, T)NO_3 + \Omega_d(O_2, T)NO_2 + O_2 surf. \quad (12)$$

Таким образом, уравнениями 1-12 аппроксимируется продуктивно-деструктивный цикл в морской экосистеме, который описывает формирование фотосинтетической продукции органического вещества, его выедание зоопланктоном и последующий распад органики в составляющие ее минеральные формы. Модельные группы планктона определены как биомасса видов, которые обобщены по основным функциональным признакам.

Рассматриваются циклы жизнедеятельности двух модельных функциональных групп фитопланктона, диатомей и флагеллят (уравнения 1 и 2). Локальная первичная продукция фитопланктона (Φ_{P_d} и Φ_{P_f}) аппроксимируется зависимостью от лимитирующих фотосинтез факторов: солнечной радиации и концентрации основных для Северного моря лимитирующих биогенных элементов:

$$\Phi_{P_d} = \sigma_d \cdot \min(\alpha(I), \beta_N, \beta_P, \beta_{Si}), \quad \Phi_{P_f} = \sigma_f \cdot \min(\alpha(I), \beta_N, \beta_P).$$

Лимитирующий фактор солнечной радиации ($\alpha(I)$) рассчитывается по эмпирической экспоненциальной зависимости убыли фотосинтетически активной радиации (ФАР) от глубины с учетом поглощения радиации водой и фитопланктоном. На поверхности моря ФАР составляет 50 % от коротковолновой радиации, которая задается как граничное условие. В модели, как и в Северном море, диатомей характеризуются интенсивной продукцией и лимитированы тремя биогенными элементами, тогда как рост биомассы флагеллят менее интенсивный, но ограничен только азотом и фосфором. Соответственно задаются максимальные скорости роста для диатомей (σ_d) и флагеллят (σ_f). Лимитирующие факторы биогенов ($\beta_N, \beta_P, \beta_{Si}$) рассчитываются по зависимости Михаэлиса-Ментен от их концентраций.

Модельные циклы жизнедеятельности зоопланктона (уравнения 3 и 4) основаны на вычислении продукции зоопланктона ($G_i(C_j)$, $i=Z_s, Z_l, j=P_d, P_f, D$,

Z_s), которая рассчитывается как потребление пищи (выедание) в зависимости от комплексного рациона питания с учетом индивидуальных предпочтений источников пищи. В общем случае источниками пищи для зоопланктона служат биомассы фитопланктона и детрита, которые потребляются с различной интенсивностью. При этом более предпочтительным источником пищи является фитопланктон. Одна из функциональных особенностей всеядного зоопланктона - выедание им травоядного зоопланктона, которое учитывается наряду с его питанием из других указанных источников. Также учитывается потеря биомассы зоопланктона при метаболизме (μ_z , μ_{zl}).

Формирование детрита (уравнение 5) происходит за счет смертности планктона (m_{pd} , m_{pf} , m_z , m_{zl}) и потери при ассимиляции пищи зоопланктоном (γ_1 , γ_2). Убыль детрита происходит при его минерализации (ε_D). Чтобы учесть относительно медленную минерализацию панцирей диатомей в детрите в модель включен биогенный опал (уравнение 11), скорость его минерализации задается коэффициентом ε_{Si} . Смертность групп планктона и минерализация заданы линейно с учетом, как естественной смертности, так и влияния высших трофических уровней (рыбы), которые явно не входят в модель.

Процесс минерализации продолжается химическими реакциями, которые аппроксимируют в модели природные циклы биогенных элементов (уравнения 6 - 10). Поскольку рассматривается взаимодействие органического вещества с различными минеральными элементами, в модели приняты общие единицы, единицы органического углерода ммоль С (моль С=12.01 г С). Пересчет в общие единицы осуществлялся по постоянному отношению Редфильда: C:N:P:Si = 106:16:1:16. В уравнениях в соответствии с этим заданы коэффициенты $REDF_{C:N}$, $REDF_{C:P}$, $REDF_{C:Si}$. В моделируемом азотном цикле (уравнения 6-8) учитываются следующие геохимические реакции: нитрификация $NH_4 \rightarrow NO_2 \rightarrow NO_3$ и денитрификация $NO_3 \rightarrow NO_2 \rightarrow N_2$, при этом свободный азот (N_2) выделяется в атмосферу. Соответствующие обозначения скоростей нитрификации и денитрификации в указанных уравнениях Ω_a , Ω_n , Ω_r и Ω_d . В модели предусмотрена возможность зависимости этих скоростей от температуры и концентрации кислорода, однако в данной модели используются постоянные значения.

Модельный кислород (уравнение 12) связан с другими компонентами через азотный цикл, убыль и прибыль кислорода рассчитывается по молярным

отношениям. Процессы, которые рассматриваются в модели, по порядку слагаемых в уравнении следующие: выделение кислорода при фотосинтезе, потребление при минерализации детрита и метаболизме зоопланктона, потребление и выделение кислорода при реакциях нитрификации и денитрификации, а также обмен кислородом через поверхность моря. Как показали модельные эксперименты, влияние кислорода в Северном море на биогеохимические процессы в общем несущественно.

Значения параметров и коэффициентов, которые используются в модельных параметризациях, взяты близкими к найденным в литературе и уточнялись в ходе калибровки модели. В работе приводятся полученные результирующие значения параметров и коэффициентов, а точность соответствующего им модельного решения обсуждается при валидации модели.

Первичная и вторичная продукции (скорость образования органического вещества, $\text{mgC m}^{-3} \text{сут}^{-1}$) являются важными характеристиками динамики планктона и используются далее. Общая первичная (или просто первичная) продукция вычислялась как сумма продукций модельных групп диатомей и флагеллят. Также вычислялись два варианта вторичной продукции: вторичная продукция на фитопланктоне и (общая) вторичная продукция. Первая рассчитывалась как выедание фитопланктона зоопланктоном, вторая - как сумма выедания фитопланктона и выедания детрита зоопланктоном.

Постановка задачи для модели ECOSMO следующая. Модельная область включает систему Северного и Балтийского морей, которые соединены проливами. Жидкие границы модельной области при выходе Северного моря в Атлантический океан проходят с запада вдоль 1.3° з.д. через пролив Ла Манш и с севера вдоль 59.3° с.ш. Включение Балтийского моря позволяет учесть с помощью модели обмен между морями и избежать необходимости в третьей жидкой границе. Пространственно-временное разрешение модели составляет примерно 10 км по горизонтали, 20 вертикальных z-уровней и 20 минут. Это позволяет описать крупные вихри, т.к. бароклинный масштаб Россби в Северном море равен 3-50 км. Интегрирование модели осуществлялось с 1980 по 2004 годы. Модель интегрировалась с использованием доступных данных наблюдений в качестве внешних условий. Задавались метеорологические условия (данные NCEP с шагом часов 6 часов и пространственным разрешением $\sim 2^\circ$), сток основных рек и обмен с Атлантическим океаном. На открытых жидких границах задавались основные для Северного моря

гармоники приливов M2, S2 и O1 с модельным шагом 20 минут. При входе в модельную область задавались: среднемесячные значения климатического сезонного хода температуры, солености и биогенов. Для биологических модельных компонент такие данные отсутствуют. Для основных рек задавались величины пресного стока и стока биогенов, использовались среднемесячные значения, а в случае их отсутствия - среднеклиматический сезонный ход. Для инициализации модели использовались поля температуры, солености, скорости и уровня моря, полученные после длительного спуска модели, для биогеохимических компонент - данные атласа WOA2001 за январь.

В тестовых модельных расчетах был выявлен искусственный тренд биогеохимических модельных компонент на межгодовом масштабе из-за невозможности закрыть бюджет Северного моря по биогенам и органическому углероду. Это связано с недостатком данных для постановки граничных условий. Чтобы избежать проявления модельного тренда в многолетнем расчете решение модели приводилось к начальному состоянию планктона и биогенов в начале каждого годового цикла. Это предопределило невозможность корректно описать зимнюю климатическую изменчивость биогеохимических компонент. Однако, как показывают модельные расчеты, а также анализ наблюдений, процессы, протекающие в период повышенной сезонной активности планктона на подавляющей части акватории моря, в основном связаны с внутренней мезомасштабной динамикой моря и изменчивостью атмосферных условий. Что успешно воспроизводится моделью.

Результаты модельного расчета вошли в базу данных модели ECOSMO, которая находится в свободном доступе в интернете [База данных ECOSMO, 2007]. Кроме основных физических и биогеохимических модельных параметров в нее вошли индексы степени вертикальной стратификации (глубины залегания термоклина/пикноклина, значения максимальных вертикальных градиентов температуры/плотности, индекс фронтальной активности), рассчитанные по модельным распределениям температуры и плотности. Описанные индексы используются далее в Главе 4.

Цель Главы 3 заключалась в валидации биогеохимического блока ECOSMO. Рассматривался сезонный ход концентраций биогенов и биомассы планктона, годовые распределения биомассы и продукции фитопланктона по морю. Относительно зоопланктона был сделан сравнительный анализ модельных данных с пространственно-временной съемкой зоопланктона в 1986 и 1987 гг. и с данными многолетнего мониторинга.

Валидация модельного сезонного хода проводилась по данным базы Северного моря ECOMOD и цифрового Атласа WOA2001. Использовались модельные значения, рассчитанные на 1984 г., который характеризуется как климатически умеренный для Северного моря. В трех районах моря площадью $1 \times 1^\circ$ сравнивались модельная суточная биомасса фитопланктона и концентрации биогенов с соответствующими среднемесячными значениями из указанных баз данных, пример дан на рис. 2. Валидация показала, что модель успешно воспроизводит сезонный ход. Исключением является возможная недооценка моделью зимних значений биомассы фитопланктона во всех районах, а также относительно небольшое завышение концентраций нитрата и силиката в осенний период в районе приливного фронта при сохранении выявленного по наблюдениям летнего годового минимума.

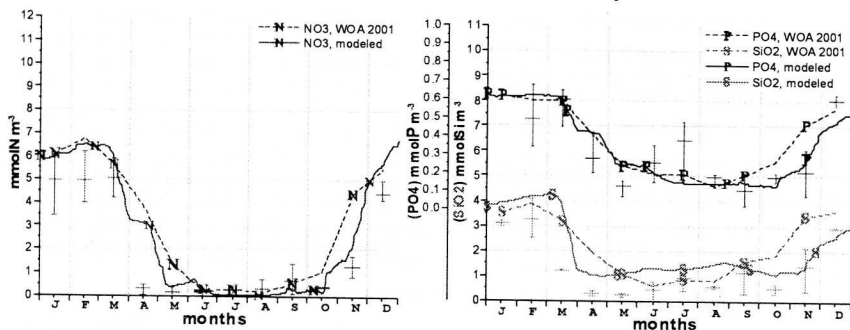


Рис. 2. Валидация модельного годового цикла биогенов (сплошная линия) с данными атласов WOA2001 (пунктир) и ECOMOD (интервалы с границами 17 и 83 % квантилей и медианой) в районе с устойчивой стратификацией с центром 55.5° с.ш. и 2.5° з.д.: сравниваются концентрации нитрата (слева), фосфата и силиката (справа).

Валидация модели по горизонтальному годовому распределению фитопланктона в верхнем 30-метровом слое Северного моря проводилась с использованием данных Атласа WOA2001 и карты годового распределения хлорофилла из Атласа спутниковых данных MERIS. Оригинальные единицы измерения фитопланктона в Атласе WOA2001 (мг Chl-a m^{-3}) были трансформированы в единицы биомассы (мг C m^{-3}) с использованием коэффициента 40 C/Chl-a . Сравнение показывает (рис. 3), что модельные результаты адекватны значениям данных наблюдений как качественно, так и количественно. В общем по морю, годовая биомасса уменьшается с юго-востока на север. Максимум (до 150 мг C m^{-3}) локализован вдоль европейской

береговой зоны, область минимальных значений (менее 50 мг С м^{-3}) наблюдается в средней открытой части моря. Поскольку Атлас WOA2001 имеет невысокое горизонтальное разрешение (1°), модель превосходит его по детальности пространственного распределения биомассы фитопланктона. Это видно при качественном сравнении модельного распределения с распределением хлорофилла из спутникового Атласа MERIS (рис. 1б): в центральной части моря в районе Доггер Банки, у европейского берега и у берега Великобритании наблюдаются синхронные локальные максимумы.

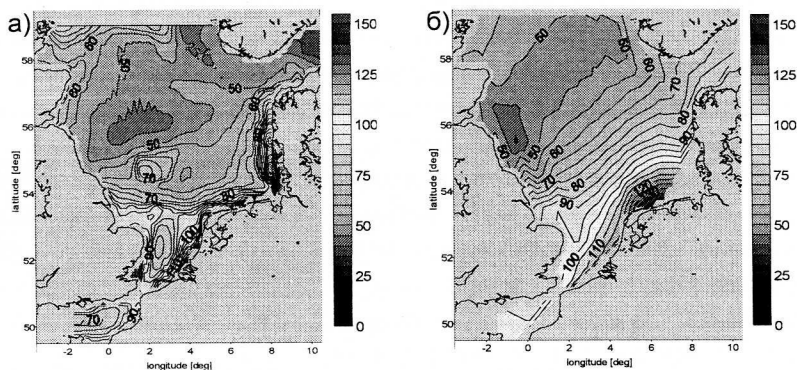


Рис. 3. Распределение годовой биомассы фитопланктона в верхнем 30-метровом слое Северного моря [мг С м^{-3}]: а) модельная за 1984г., б) климатическая из Атласа WOA2001.

Для валидации модели по годовой первичной продукции имеются оценки немногочисленных разрозненных данных наблюдений и моделей. Модельная годовая продукция ECOSMO изменяется по морю от 40 до $150 \text{ гС м}^{-2} \text{ год}^{-1}$, что находится в пределах данных наблюдений. ECOSMO дает заниженные значения продукции в центре моря $40 \text{ гС м}^{-2} \text{ год}^{-1}$ относительно значений, полученных разными моделями - от 50 до $100 \text{ гС м}^{-2} \text{ год}^{-1}$.

Из валидации модельного зоопланктона с данными пространственно-временной съемки по Северному морю ZISCH, проведенной в мае-июне 1986 г. и январе-марте 1987 г., следует, что ECOSMO с высокой точностью воспроизводит абсолютные значения биомассы зоопланктона во второй половине мая – июне. Заметим, что для этого периода, на который приходится сезонный пик биомассы, выявленная ошибка между моделью и данными существенно ниже, чем межгодовая модельная изменчивость. Например, во

второй половине мая относительная ошибка составляет около 5 % при межгодовой изменчивости модельной биомассы в этот период до 100 %.

Единственным источником данных наблюдений по межгодовой пространственно-временной изменчивости зоопланктона является уникальная по продолжительности и территории охвата программа постоянного измерения планктона CPR (Continuous Plankton Recorder). ECOSMO воспроизводит в среднем по морю 83 % сезонной изменчивости в данных CPR и в зависимости от района моря - от 36 до 69 %. По сравнению с этим модель POLCOM3dERSEM воспроизводит от 16 до 48 %. Линейная корреляция многолетних рядов биомассы зоопланктона, вычисленных по среднегодовым значениям, составила 0.35, а для рядов, составленных по средним значениям за март-май, 0.78. Низкая корреляция рядов, составленных по годовым значениям, объясняется невозможностью модели учитывать зимнюю климатическую изменчивость биогеохимических компонент.

В заключительной части работы, Главе 4, данные представленного модельного расчета используются для изучения сезонной и межгодовой динамики экосистемы Северного моря. Кроме этого рассматривается пример применения модели для оценки влияния условий обитания на репродуктивность шпрота в Северном море.

Рассматривается среднегодовое сезонное развитие биомассы и продукции планктона, усредненное по Северному морю (рис. 4). Увеличение общей биомассы фитопланктона и первичной продукции начинается в середине февраля. Максимумы продукции и биомассы соответствуют весеннему цветению, в котором преобладают диатомеи, и второму летнему цветению, в котором преобладают флагеллаты. В сентябре-октябре наблюдается небольшое увеличение первичной продукции диатомей, которое составляет осеннее цветение. Сезонное развитие зоопланктона начинается в конце марта, с отставанием по времени от начала цветения фитопланктона примерно в один месяц. Видно, что вклад травоядного зоопланктона в общую биомассу зоопланктона невелик и проявляется во второй половине года.

Годовое развитие фитопланктона по вертикали (рис. 5) характеризуется максимальными значениями первичной продукции на поверхности в начале весеннего и летнего цветений, далее максимумы планктона наблюдаются на глубинах от 15 до 60 м в зависимости от района и сезона. Можно отметить, что во фронтальной зоне первичная продукция выше. Кроме этого видно, что в сезонном развитии наблюдаются периодические вспышки цветений

длительностью от нескольких дней до недели. В работе показано, что вспышки цветения тесно связаны со штормовыми явлениями и последующим кратковременным разрушением пикноклина.

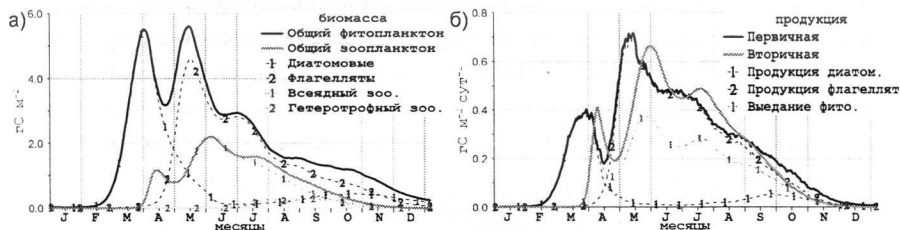


Рис. 4. Годовой среднеегодеглетний ход модельных интегральных по вертикали а) биомассы планктона и б) первичной и вторичной продукции планктона в Северном море.

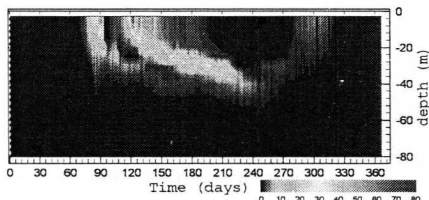


Рис. 5. Суточный годовой ход первичной продукции в районе с устойчивой стратификацией севернее (слева) и фронтальной зоне южнее Доггер Банки (справа).

На рис. 6 показана динамика модельных суточных осредненных по морю значений первичной продукции на период 1980-2004 гг. Видно, что основная межгодовая изменчивость проявляется с конца апреля по август, аномальные значения продукции носят кратковременный характер и, скорее всего, связаны со вспышками цветений. Эти кратковременные явления, возможно, обуславливают основные отличия межгодовой динамики планктона от климатического сезонного хода. Для оценки межгодовой изменчивости были построены временные ряды годовых осредненных по морю характеристик планктона на рассматриваемый период. Межгодовая изменчивость составила 9.5 % для биомассы фитопланктона, 10 % для первичной продукции, 13.5 % для вторичной продукции и 14.7 % для биомассы зоопланктона. Был проведен корреляционный анализ между указанными рядами характеристик планктона и индексами степени вертикальной стратификации, межгодовая изменчивость которых была построена по осредненным в отдельные месяцы значениям. Анализ показал, что индексы степени стратификации слабо коррелируют с

годовыми значениями биомассы зоопланктона, а также с первичной и вторичной продукцией и не коррелируют с биомассой фитопланктона. Максимальная корреляция наблюдается между указанными характеристиками и глубиной термоклина в июне (0.64-0.66), при этом углубление термоклина связано с уменьшением биомассы и продукции. Такой результат может быть связан с тем, что полученные при осреднении сигналы отклика планктона на изменение условий стратификации могут быть неоднозначными из-за характерной для моря сильной пространственно-временной неоднородности.

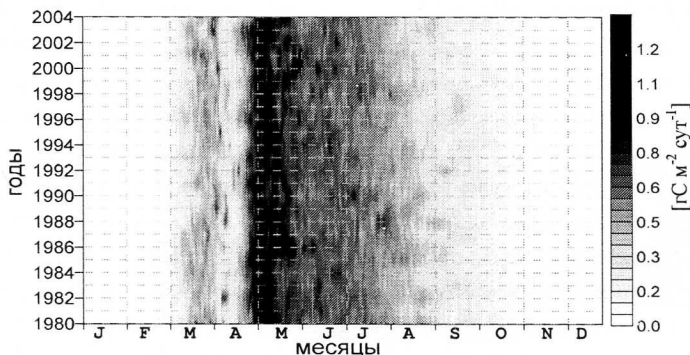


Рис. 6. Временная динамика первичной продукции в Северном море на период 1980-2004 гг., представлены суточные значения в $\text{гC м}^{-2} \text{сут}^{-1}$.

Для детального изучения особенностей межгодовой изменчивости планктона исследовалась связь между основными ЭОФ модами первичной продукции, вычисленными из модельного пространственно-временного распределения в разные месяцы, с изменчивостью среднемесячных метеорологических параметров. Атмосферные параметры были получены из данных NCEP. В результате анализа было выявлено, что вторые и третьи ЭОФ моды (в среднем 12 и 8 % от изменчивости в данных) слабо коррелируют с изменчивостью атмосферы. Максимальная корреляция достигается между изменчивостью первой ЭОФ моды (27 %), которая связана с процессами во фронтальных и стратифицированных по вертикали районах моря, и скоростью ветра в летние месяцы (май, июль-сентябрь) и составляет от 0.6 до 0.8. Соответствующая корреляция с другими параметрами не превышает 0.6.

В качестве примера применения модели ECOSMO для оценки репродуктивности рыбных ресурсов в работе приводятся результаты моделирования с подключением в ECOSMO модульного блока для расчета

индивидуального развития икры шпрота. В данном блоке икра аппроксимируется лагранжевыми частицами, для которых индивидуально рассчитываются пространственный перенос и биоэнергетический баланс в зависимости от влияния локальных параметров окружающей среды, которые в свою очередь рассчитываются ECOSMO. Модельный зоопланктон рассматривается как источник питания для икры на стадии личинок. Рассчитанные распределения икры по морю совпадают с данными наблюдений. Показано, что вертикальная турбулентная диффузия существенно влияет на пространственный перенос икры. Икра переносится и скапливается в зонах с комфортными условиями, что потенциально обеспечивает ее выживаемость. Это фронтальные зоны вдоль европейского берега, над Доггер Банкой и Большой Рыбной Банкой, и продуктивные районы в Южной части моря.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы:

- **Разработана трехмерная физико-биогеохимическая модель.** Модель ECOSMO позволяет рассчитывать основные гидродинамические и биогеохимические процессы в экосистеме Северного моря на широком спектре пространственных и временных масштабов под действием изменчивости внешних условий, которые взяты из наблюдений. Модель реалистично воспроизводит комплексные процессы в гидродинамических режимах, характерных для моря, включая приливные фронты.

- **Выполнен модельный расчет на период 1980-2004 гг.** Полученные результаты представляют собой массивы трехмерных суточных значений прогностических компонент модели (биомасса и продукция планктона, концентрации биогенных веществ, а также температура, соленость, поле скоростей и др. гидродинамические параметры и индексы). Многолетняя динамика согласованных полей физических и биогеохимических характеристик, включая зоопланктон, с высоким пространственно-временным разрешением, которым обладает модель, была получена впервые. Создана база данных ECOSMO, которая находится в открытом доступе в интернете.

- **Проведена валидация модели** относительно прогностических компонент биогеохимического блока, которая показала адекватность модельного решения. Впервые удалось воспроизвести пространственно-временную динамику зоопланктона близко к наблюдаемой. В сезонном ходе биомассы зоопланктона в зависимости от района моря ECOSMO воспроизводит от 39 до 69 % изменчивости в данных наблюдений. Единственная в классе таких моделей трехмерная модель POLCOM3dERSEM, которая рассчитывает

зоопланктон, воспроизводит от 16 до 48%. Вместе с этим выявлено, что ECOSMO недооценивает зимнюю климатическую изменчивость, что связано с недостатком данных для постановки граничных условий.

- **Проведен анализ сезонной и межгодовой изменчивости планктона** на основе модельного расчета. Показано, что горизонтальные распределения биомассы и продукции планктона по морю связаны с локализацией гидродинамических режимов, существование которых в Северном море обусловлено активностью приливов. Были выявлены механизмы влияния метеорологического воздействия и мезомасштабных гидродинамических режимов на изменчивость первичной продукции фитопланктона и потенциальную выживаемость личинок икры шпрота в Северном море. Установлено, что зоны приливного фронта характеризуются повышенной биологической продуктивностью. Межгодовая изменчивость первичной продукции определяется комплексным влиянием ряда факторов, из которых доминирует действие ветра, усиление которого вызывает разрушение устойчивой вертикальной стратификации.

Список публикаций по теме диссертации (первые 3 опубликованы в журналах из списка ВАК, 7 – тезисы в трудах конференций):

1. Daewel U., Peck M.A., Alekseeva I., St. John M.A., Kühn W., Schrum C. Coupling ecosystem and individual-based models to simulate the influence of climate variability on potential growth and survival of larval fish in the North Sea // *Fisheries Oceanography*. 2008. V. 17. № 5. P. 333-351.
2. Schrum C., Alekseeva I., St. John M. Development of a coupled physical-biological ecosystem model ECOSMO: Part I: Model description and validation for the North Sea // *Journal of Marine Systems*. 2006. V. 61. № 1-2. P. 79-99.
3. Schrum C., St. John M., Alekseeva I. ECOSMO, a coupled ecosystem model of the North Sea and Baltic Sea: Part II. Spatial-seasonal characteristics in the North Sea as revealed by EOF analysis // *Journal of Marine Systems*. 2006. V. 61. № 1-2. P. 100-113
4. Alekseeva I. Implication of air-sea boundary layer interactions in regional 3-D ecosystem models for the evaluation of future climate change impact on the North Sea ecosystem // *Seminar - atmosphere-ocean interaction*. Geophysical Institute, University of Bergen. 2009.
5. Alekseeva I., Schrum C. Physical controls of lower trophic level production // *International Council for the Exploration of the Sea, Annual Science Conference*. 2007. ICES CM 2007/G:22.

Подписано в печать: 28.10.11
Объем: 1,5 усл.п.л.
Тираж: 50 экз. Заказ № 477
Отпечатано в типографии «Реглет»
119526, г. Москва, Рождественка, 5/7, стр.1
(495) 623-93-06; www.reglet.ru