

Проблемы использования спутниковой информации о концентрации хлорофилла для оценки биотических условий промысла нагульной рыбы¹

В.Р.Фукс, Т.В.Белоненко (Санкт-Петербург, СПбГУ)

В последние годы, благодаря развитию спутниковых методов исследования океана, возникла возможность оперативного расчета биомассы фитопланктона по концентрации хлорофилла. В свою очередь, зависимость биомассы кормового зоопланктона от концентрации фитопланктона и численности рыбы от концентрации зоопланктона формализованы. Эти зависимости могут быть представлены следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial \dot{I}}{\partial t} = \dot{I} \cdot (a - b \dot{I} + cZ), \quad (1)$$

$$\frac{dZ}{dt} = Z(fP - q\Pi), \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} + w \frac{\partial P}{\partial z} + w_q \frac{\partial P}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial P}{\partial z} \right) + A\Delta P + P(P_h - R_e - G), \quad (3)$$

$$P = dCl, \quad (4)$$

где t – время; x, y, z – декартовы координаты, ось Oz направлена вертикально вниз, Π – биомасса (численность) промыслового вида; a – коэффициент воспроизводства, b – коэффициент естественной и промысловой смертности, c – коэффициент, который мы назовем коэффициентом кормовой привлекательности, Z – биомасса кормового планктона; P – биомасса фитопланктона, f – коэффициент выедания фитопланктона зоопланктоном, q – коэффициент выедания зоопланктона рыбами; w_q – скорость гравитационного осаждения, k – коэффициент вертикальной турбулентной диффузии, A – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии, P_h – мгновенная скорость продуцирования органического вещества в процессе фотосинтеза, зависит от освещенности и дефицита биогенов, R_e – интенсивность дыхания ($R_e = 0,0175 \exp 0,069T^0$), T^0 – абсолютная температура, G – скорость выедания, косвенно выражает прирост биомассы зоопланктона, u, v, w – соответственно проекции скоростей течения на координатные оси.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 04-05-64876.

Первые два уравнения основаны на классических уравнениях Вольтерра (Вольтерра, 1976), описывающих взаимодействие видов типа хищник-жертва. Это взаимодействие основывается на принципах, подобных химической кинетике: скорость убыли количества жертв и скорость прироста количества хищников считаются пропорциональными их произведению. Подобные математические модели восходят к работам Баранова (1918), Риккера (1958), Бивертонна и Холта (1957). Большой вклад в моделирование рыбных популяций внес В.В.Меншуткин (1970). Следует учитывать, что модели хищник-жертва приняты при упрощающих допущениях:

- пренебрегаются возрастные, а также половые и генетические различия,
- результаты взаимодействия в пределах вида и между видами считаются мгновенными.

Третье уравнение - комбинированная математическая модель, включающая модель переноса – диффузии и биотическую модель Райли. Четвертое уравнение описывает зависимость биомассы фитопланктона от концентрации хлорофилла.

Ассимиляционное число d представляет собой отношение всего количества хлорофилла-а к скорости фотосинтеза и выражается в миллиграммах органического вещества, синтезированного за единицу времени на 1 мг хлорофилла в условиях освещенности, к которым данная система приспособлена. Ассимиляционное число принято выражать в мг·С/мг хлорофилла-а за сутки.

Реализация задачи складывается из нескольких этапов.

1 этап: Оценка полуэмпирических коэффициентов, входящих в систему на основе экспериментальных данных или априорных теоретических представлений путем решения обратных задач. Расчеты основных параметров полей биотических и абиотических характеристик могут основываться на следующей исходной биотической и океанографической информации:

- концентрация хлорофилла (спутниковая информация);
- планктонные и ихтиопланктонные съемки;
- акустические съемки;
- промысловые планшеты;
- вдольтрековая альтиметрия;
- альтиметрические карты;
- температурные карты.

Эта информация позволит выделить зоны повышенной продуктивности и установить статистические зависимости между биотическими и абиотическими полями.

Коэффициенты уравнения (1) находятся на основе следующей информации:

- уловы промысловых рыб;
- акустический поиск;
- лидарная авиаразведка.

Коэффициенты уравнения (2) определяются по данным зоо- и фитопланктонных съемок с учетом параметров, определяющих перенос и диффузию на основе спутниковой альтиметрической информации. Параметры уравнения (3) определяются по спутниковой информации о концентрации хлорофилла путем усвоения этих данных при помощи уравнения (4) в самой модели, либо концентрация хлорофилла принимается исходной в задачах (1), (2) и (4).

2 этап: Последовательная реализация уравнений (4), (3), (2) и (1) на основе информации о течениях, получаемых либо с помощью спутниковых альтиметрических данных, либо путем численной реализации отдельной гидродинамической модели, либо, что предпочтительнее, в результате численной реализации полной гидродинамической и биотической задачи с использованием спутниковой информации.

3 этап: Согласование и идентификация результатов расчета.

Практическое решение этой задачи сталкивается с серьезными трудностями. Назовем некоторые из них:

1. Недостаточная достоверность оценки первичной продукции по концентрации хлорофилла, измеряемой спутниковыми радиометрами.
2. Гидродинамическая и биотическая ограниченность гипотез, заложенных в системе уравнений (1)–(4).
3. Меняющаяся надежность и устойчивость для различных масштабов осреднения полуэмпирических и эмпирических параметров, входящих в уравнения (1)–(4).
4. Недостаточная точность конечно-разностной аппроксимации уравнений системы.
5. Трудности интерпретации результатов в связи с их существенной нелинейностью и нестационарностью.

Для численной реализации задачи оценки промысловой продуктивности непосредственно по концентрации хлорофилла удобно систему уравнений (1, 2, 4) свести к одному уравнению вида:

$$\frac{\partial^2 \ln \Pi}{\partial t^2} + b \frac{\partial \Pi}{\partial t} - fdCl \frac{\partial \ln \Pi}{\partial t} - (bfdCl + aq)\Pi + qb\Pi^2 + afdCl = 0 .$$

Так как концентрация хлорофилла – функция координат и времени: $Cl = Cl(x, y, t)$, это уравнение должно быть решено для каждого пункта промыслового района.

Методы определения хлорофилла в морской воде за последние годы претерпели значительные видоизменения и подверглись улучшению. Качественный прорыв в этом

направлении произошел, когда эту задачу стали решать на основе спутниковых методов дистанционного зондирования. Энергия, поглощенная на более длинных волнах (хлорофилл-а) прямо используется в фотохимических реакциях или излучается в виде флуоресценции (флуоресценция при 730 нм), в то время как энергия более коротких волн света сначала переносится вспомогательными пигментами хлорофилла-а 670 нм, а потом уже излучается как флуоресценция при 684 и 695 нм (Парсонс, Такахаши, Харгрейв, 1982). Это свойство флуоресценции используется приборами дистанционного зондирования ИСЗ при определении состояния и концентрации фитопланктона и позволяет давать оценки первичной продуктивности.

Первый подобный прибор был запущен на орбиту в 1978 г. на спутнике «Нimbus-C». В настоящее время реализуется программа NASA по исследованию цвета океана (SeaWiFS). Первый спутник, несущий спектрорадиометр, фиксирующий концентрацию хлорофилла, был запущен 1 августа 1997 г. Спектрорадиометры SeaWiFS и MODIS работают в видимых и ближних инфракрасных диапазонах. Для перевода исходной информации электромагнитного излучения в физико-биохимические показатели используются стандартные алгоритмы расчета, реализованные в программном пакете SeaDAS. Технические возможности спутника SeaStar позволяют сканировать каждый квадратный километр океана через 48 часов, что дает возможность производить мониторинг поверхности океана при условии отсутствия плотной атмосферной облачности. Есть основания считать, что флуоресценция хлорофилла, определяемая SeaWiFS и MODIS, является хорошим биологическим индикатором первичной продуктивности океана (Hoffman K., Intern S., 2003). Несмотря на обоснованную критику, не вызывает сомнения, что спутниковые измерения хлорофилла могут рассматриваться как уникальный метод оценки концентрации фитопланктона в океане.

В Интернете информацию о концентрации хлорофилла можно получить несколькими способами. Карты полей хлорофилла, полученные с SeaWiFS с разрешением 4096 на 2048 пикселей и разрешающей способностью 9 км, можно загрузить с их сайта в формате PNG:

<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/level3.pl?DAY=&PER=&TYP=swchl&RRW=16>

Карты полей хлорофилла, полученные с MODIS с тем же или более высоким разрешением 8640 на 4320 пикселей и разрешающей способностью 4 км, можно загрузить с сайта <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/level3.pl> в форматах PNG, HDF.

Так же можно стать авторизованным пользователем и загрузить цифровую информацию с ftp-сервера или заказать ее на носителях информации. Все это только для некоммерческого использования и при условии упоминания источника используемой информации.

Чтобы не загружать изображение для всего Земного шара, можно воспользоваться ссылкой <http://seawifs.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?typ=GAC>, где существует возможность ввести координаты интересующего района. Результатом поиска будет набор треков-изображений, на которых есть заданные участки океана.

В недавнем времени появился замечательный сайт Колорадского центра астродинамических исследований ([Colorado Center for Astrodynamics Research](http://colorado.edu/~realtime/modis/)). По ссылке <http://argo.colorado.edu/~realtime/modis/> можно получать карты полей хлорофилла для районов с заданными координатами. Карты полей хлорофилла основываются на данных Aqua-MODIS, из раскрывающегося меню выбирается желаемая дата. Карты доступны, начиная с 2003 г.

Данные по уровню содержатся в совмещенном массиве данных спутников TOPEX/POSEIDON с 10-дневной дискретностью и ERS 2 с 17-дневной дискретностью. На сервере есть возможность задавать интересующий регион Мирового океана для любого диапазона долгот и для широт с 70° с.ш. до 70° ю.ш.

Существует возможность получения карт концентрации хлорофилла, совмещенных с картами аномалий уровня. Предлагаются различные варианты вывода карт: Color и Grayscale; различные форматы вывода: PostScript и GIF. Контуры SSH аннотируются в см, а шкала значений цветных карт хлорофилла аннотируется в мг/м³.

Для изучения влияния океанографических условий на формирование и развитие зон повышенной промысловой продуктивности в океане с использованием спутниковой океанографической информации (уровень моря, температура воды, концентрация хлорофилла) необходима разработка теоретических основ локальных динамических мезомасштабных процессов: зон вергенций течений; нелинейных эффектов в низкочастотных волнах и вихрях; особенностей вергенций в стоячих и стояче-поступательных волнах; нелинейности переноса; а также классификации типов локальной вергенции. Этот подход был испытан по нашему заданию дипломантом кафедры океанологии СПбГУ Улановым П.В. на промысловых объектах Норвежского моря (скупбрия, сельдь, путассу).

В качестве переменных принимались биомассы соответствующих промысловых планшетоу уловы соответствующих промысловых объектов (П), биомасса зоопланктона (Z) по данным планктонной съемки и концентрация хлорофилла (Cl) по спутниковым данным.

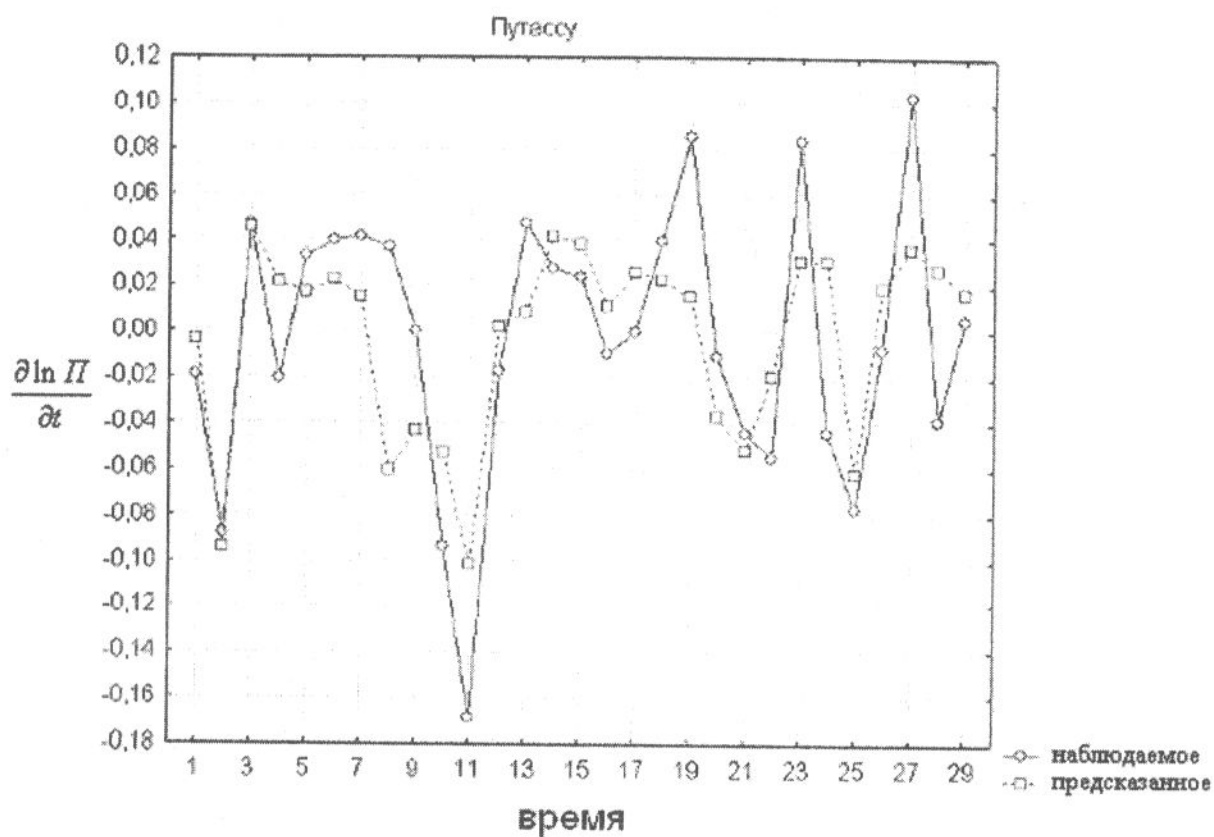
В соответствии с уравнениями (1), (2), (4) рассматривалась регрессия вида

$$\frac{\partial \ln \Pi}{\partial t} = a\Pi + bZ \text{ и } \frac{\partial \ln Z}{\partial t} = fdCl - q\Pi$$

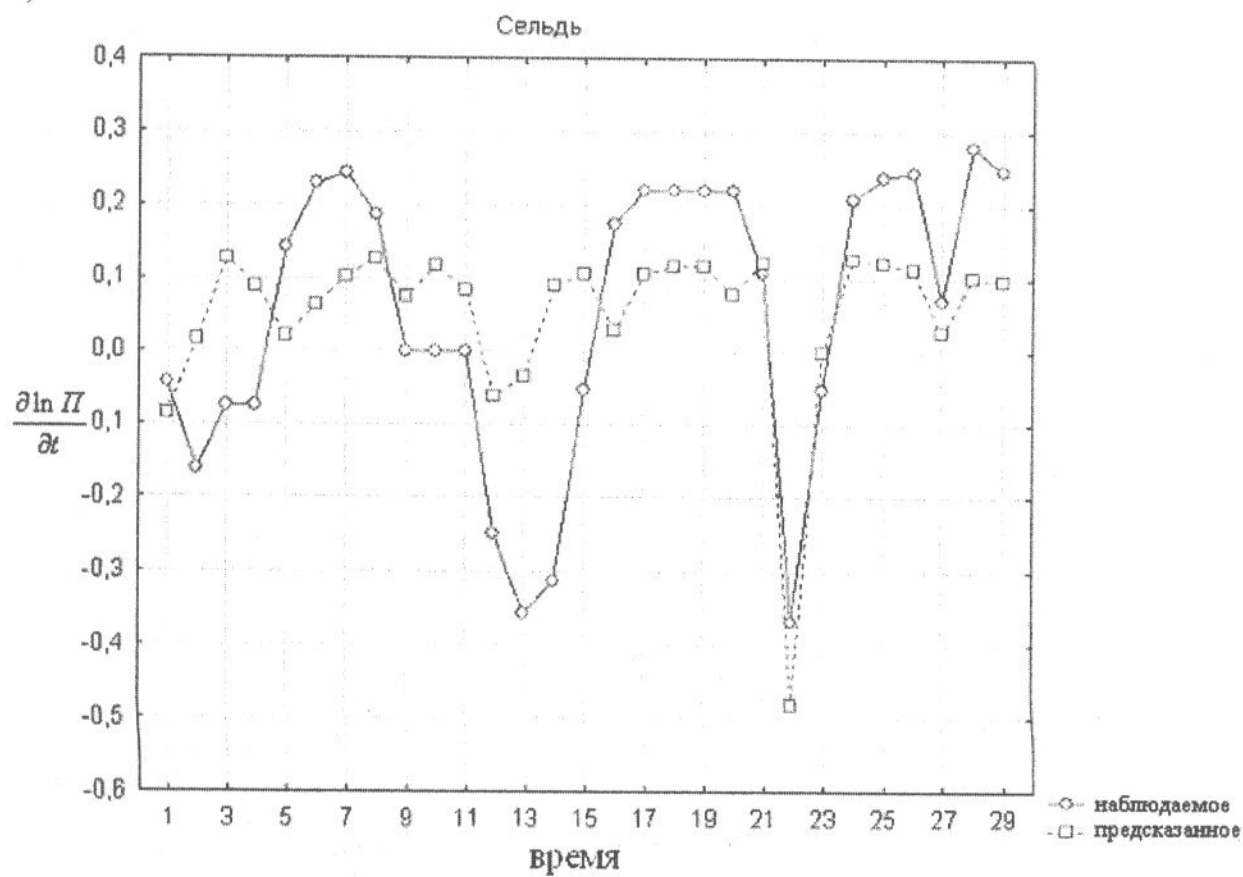
Таблица 1
 Коэффициенты уравнения множественной регрессии (a, b, fd, q; R – коэффициент множественной корреляции).

Предиктор	скумбрия					сельдь					путассу				
	Своб. член	П	Z	CI	R	Своб. член	П	Z	CI	R	Своб. член	П	Z	CI	R
$\frac{\partial \ln \Pi}{\partial t}$	0,276027	-0,026993	-0,000055	-	0,690	-0,066853	-0,005171	0,000097	-	0,598	0,003712	-0,000204	0,000024	-	0,703
Π	0,191311	-0,028679	-	-	0,676	0,091590	-0,005410	-	-	0,571	0,041798	-0,000201	-	-	0,687
$\frac{\partial \ln Z}{\partial t}$	0,326739	-	-0,000120	-	0,319	-0,172800	-	0,000139	-	0,255	-0,030299	-	0,000017	-	0,105
Π	-1,87870	-	0,00244	-	0,274	20,48714	-	-0,00813	-	0,141	166,8712	-	0,0334	-	0,06
$\frac{\partial \ln Z}{\partial t}$	-	-4,6808	-	-34,3456	0,857	-	-0,1431	-	-47,4007	0,801	-	-0,0181	-	-47,7843	0,802

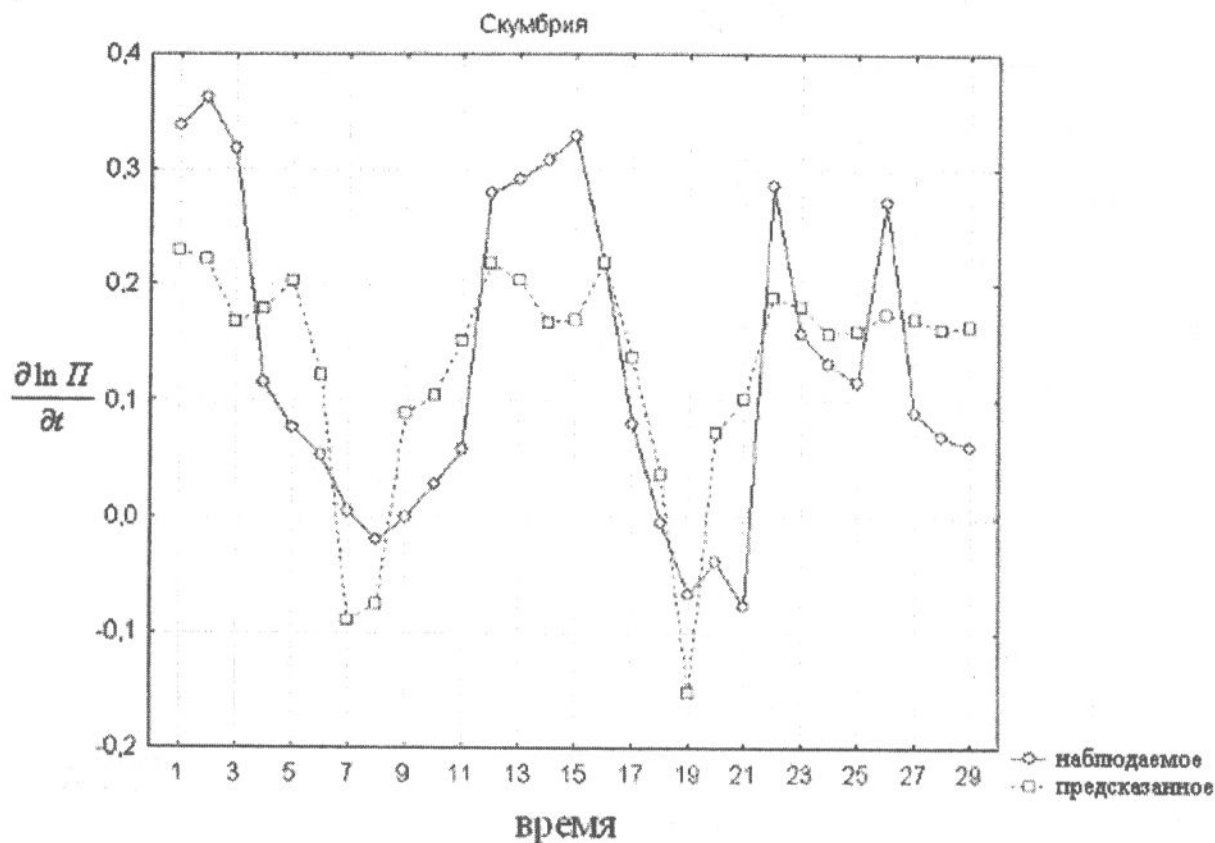
a)



б)



в)



г)

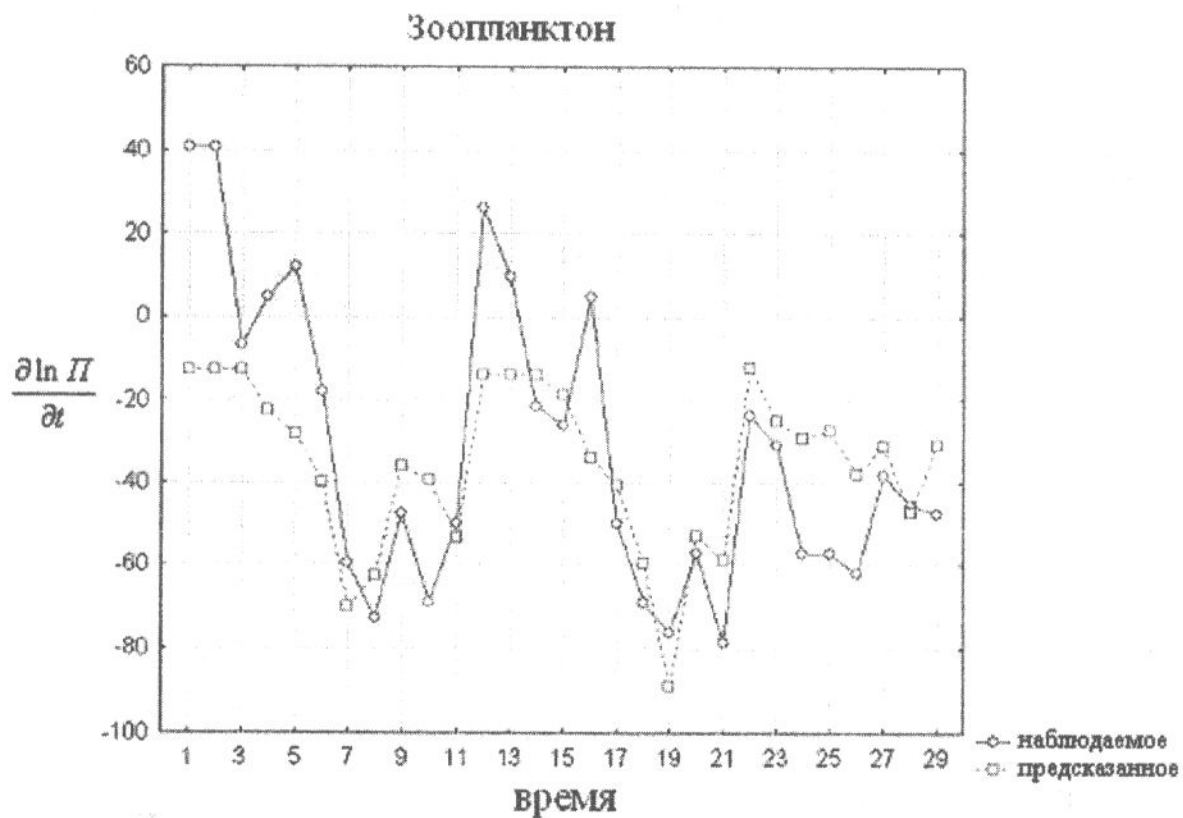


Рис. 1. Изменение во времени наблюдаемых и рассчитанных значений $\frac{\partial \ln I}{\partial t}$ для путассу (а), сельди (б), скумбрии (в) и зоопланктона (г).

В таблице 1 представлены коэффициенты множественной регрессии $\frac{\partial \ln \Pi}{\partial t}$, Π и $\frac{\partial \ln Z}{\partial t}$ с предикторами: улов (Π) и зоопланктон (Z). Коэффициенты множественной корреляции (R) имеют порядок 0,6-0,7; при парной регрессии без учета зоопланктона коэффициент множественной регрессии понижается на сотые доли. В то же время коэффициенты множественной корреляции непосредственно улова с зоопланктоном не превышают 0,06-0,27.

Обнадеживает с точки зрения использования спутниковых данных о хлорофилле высокая его корреляция с биомассой зоопланктона. Сопоставление реальной биомассы промысловых рыб и рассчитанных по регрессионным зависимостям дает хорошие результаты (рис. 1, а-г).

Исследования показывают наличие статистической связи между биологической продуктивностью, уровнем и температурой поверхности океана. (Corinne Le Que'ré', Laurent Vopp, and Ina Tegen, 2002). Наблюдаемая зависимость между уровнем океана и концентрацией хлорофилла нуждается в физической трактовке, что может быть сделано на основе проинтегрированного по глубине уравнения неразрывности, определяющего зависимость скорости изменения уровня от дивергенции полного потока, а также с помощью уравнения переноса и диффузии, в которых необходимые скорости течения могут быть оценены при численной реализации динамической модели с использованием спутниковой альтиметрической информации.

Возможности оценки биологической продукции в океане на основе дистанционных измерений открывают перспективы описания и объяснения мезомасштабной пространственно-временной неоднородности в распределении первичной продукции, информация о которой до недавнего времени оставалась крайне ограниченной. Проблема распределения кормового планктона в динамических образованиях синоптического масштаба представляет интерес как с чисто биотических позиций, так и с точки зрения промысловых приложений, прежде всего при поиске промысловых скоплений рыбы. Среди вопросов, связанных с этой проблемой, особый интерес представляет изучение условий образования повышенной концентрации планктона в динамических образованиях синоптического масштаба. При этом остаются не исследованными особенности возникновения, распределения и концентрации планктона в антициклонических и циклонических системах, связанных с синоптическими вихрями и низкочастотными волнами.

Исходя из опыта промысла и общих представлений о распределении промысловых скоплений в период кормовых миграций, можно предполагать что:

- ✓ Скопления рыбы образуются в зонах конвергенций течений (положительных аномалий уровня), обуславливающих концентрацию кормового планктона, а также на периферии зон дивергенции (отрицательные аномалии уровня), где возникают благоприятные условия для развития продукции на всех трофических уровнях.
- ✓ В стационарных зонах конвергенции (например, фронтальная зона или стационарный антициклонический вихрь) планктон может постепенно выедаться, и скопления переходят в другие зоны конвергенции.
- ✓ Благоприятными условиями для развития кормовой базы является смена режима дивергенции, (обуславливающего подъем глубинных вод, богатых биогенами и соответствующих развитию низких трофических уровней жизни), и режима конвергенции, обуславливающего концентрацию кормового планктона. Такой режим может образовываться в областях захвата низкочастотных шельфовых волн или при прибрежном апвеллинге, на его океанской периферии.

Задача состоит в теоретической интерпретации этих положений и в их оценке на основе представительных наблюдений. Для этого требуется исследовать сравнительную роль вертикального и горизонтального переноса хлорофилла при волновой и вихревой адвекции, оценить коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентной диффузии при разных масштабах временного и пространственного осреднения. В численных экспериментах с биотической частью модели необходимо проверить для разных условий чувствительность модели к выбору эмпирических и полуэмпирических коэффициентов при расчетах скорости продуцирования органического вещества в процессе фотосинтеза, интенсивности дыхания в зависимости от температуры воды и скорости выедания фитопланктона зоопланктоном. Также необходимо оценить зависимости биотических характеристик от абиотических условий путем линейной и нелинейной регрессии между уловами промысловых рыб, первичной, вторичной биопродукцией и абиотическими факторами; методом взаимокорреляционного анализа биотических и абиотических факторов оценить фазовые сдвиги в их изменчивости; с помощью многомерного статистического анализа провести классификацию океанографических и биотических полей и выявить вклад изменчивости океанографических параметров в формирование полей хлорофилла.

Эти оценки целесообразно получить не только для исходных характеристик, но и для их производных, читая уравнения исходной системы, как уравнения множественной регрессии, разрешенные относительно производных во времени.

При выделении и классификации локальных зон повышенной биологической и промысловой продуктивности и описании их динамики необходимо различать:

- нестационарные и квазистационарные продуктивные зоны,

- зоны, связанные с климатическими фронтами и особенностями донной топографии;
- сезонные зоны, обусловленные сезонным ходом биотических процессов и сезонной изменчивостью анемобарических условий;
- синоптические вихри в океане;
- градиентно-вихревые волны типа топографических волн Россби;
- остаточные приливные эффекты типа прибрежных приливных фронтов и зон локального приливного перемешивания.

Классическое представление о повышенной биологической продуктивности в областях интенсивного вертикального перемешивания или подъема глубинных вод связано с представлением об обогащении фотического верхнего слоя моря биогенными элементами и развитием на этой базе жизни на всех трофических уровнях. Локализация таких зон существенно зависит от горизонтального переноса как самих биогенов, так и продуцентов.

Проблема распределения кормового планктона в динамических образованиях синоптического масштаба представляет интерес как с чисто биотических позиций, так и с точки зрения промысловых приложений, прежде всего при поиске промысловых скоплений рыбы (Парсонс и др., 1982; Фещенко, Бочаров, 2002; Фещенко, 2002; Шатохин, 1999; Шатохин и др., 2002).

Среди вопросов, связанных с этой проблемой, особый интерес представляет изучение условий образования повышенной концентрации планктона в вихрях и низкочастотных волнах как доминирующих динамических образованиях синоптического масштаба. При этом остается не совсем ясным вопрос об особенностях возникновения, распределения и концентрации планктона в антициклонических и циклонических системах, связанных с синоптическими вихрями и низкочастотными волнами.

По мнению Б.М. Шатохина и др. (2002 г.), 90% основных локальных промысловых участков в Норвежском море приурочены к зонам антициклонических вихрей, учет этого факта при промысле скумбрии вдвое увеличивает эффективность работы промысловых судов. К подобным же выводам приводит анализ промысла сайры в Южно-Курильском районе Тихого океана (Старицын, Филатов, Фукс, 2003; Старицын, Фукс, Самко, Филатов, 2006).

Достаточно хорошо известна привязанность районов повышенной биологической и промысловой продуктивности в морях к фронтальным зонам, зонам дивергенций и конвергенций течений, зонам апвеллингов и даунвеллингов, к синоптическим вихрям.

Для поиска промысловых скоплений по знаку скорости изменения уровня можно выделить квазистационарные зоны конвергенций и районы смены режима конвергенций и дивергенций. Первые связаны, главным образом, со стационарными вихрями топографического происхождения, вторые свидетельствуют о низкочастотном волновом режиме. В проблеме синоптической изменчивости океанологических полей дискуссионным остается вопрос об особенностях и сравнительном энергетическом вкладе синоптических вихрей и низкочастотных волн. Наш опыт говорит о том, что сложившиеся представления об энергетическом доминировании синоптических вихрей в общей динамике океана кажутся несколько преувеличенными.

Хотя поток публикаций, в которых используется спутниковая информация для интерпретации изменчивости океанографических и биологических процессов в океане, постоянно увеличивается, остаются крайне ограниченными исследования, посвященные роли динамических процессов синоптического масштаба в формировании зон повышенной продуктивности в отдельных районах Мирового океана.

В настоящий момент совместное использование спутниковых методов определения хлорофилла, спутниковой альтиметрической и ИК-температурной информации открывает широкие перспективы для анализа и прогноза океанографических условий, благоприятных для образования промысловых скоплений рыбы, путей и сроков кормовых и нерестовых миграций.

Один из механизмов связи между различными характеристиками океанологических полей удалось найти Meric A. Srokosz et al, (2005) и Cipollini, P. Cromwell, D. et al, (2000, 2001), которые изучали спутниковые данные уровня, концентрации хлорофилла и температуры в Индийском океане. На рисунке 2 представлены пространственно-временные разрезы этих характеристик по 32°S. В изменениях уровня океана наряду с сезонной изменчивостью уровня выражен волновой характер этой изменчивости, причем направление распространения волн – на запад (рис. 2а). Однако поля других характеристик отражают только сезонный характер изменчивости. При этом четко прослеживается обратный характер зависимости между концентрацией хлорофилла и температурой поверхности воды: низкое значение температуры поверхности воды соответствует высокому содержанию хлорофилла. Зависимость между уровнем и хлорофиллом не выражена: в одних случаях высокое содержание хлорофилла соответствует высоким значениям уровня, в других – наоборот.

Более тесная связь была найдена для аномалий этих характеристик, полученных в результате применения специального фильтра Ханнинга (полосно-пропускающее пространственное долготное фильтрование данных), который позволяет устранить доминирование сезонной изменчивости и подчеркнуть изменчивость меньших временных

масштабов (Cipollini, P., Cromwell, D., et al, 2001). Авторы пришли к выводу, что в полученный в результате применения фильтра Ханнинга полях аномалий уровня океана, концентрации хлорофилла и температуры поверхности воды содержится информация о распространяющихся на запад волнах Россби приблизительно с одними и теми же скоростями. Наиболее отчетливо распространяющиеся волны проявляются в поле аномалий уровня (рис. 3а). Амплитуда этих волн изменяется от 2 до 6 см, длина волн достигает 700 км, период 7 месяцев, а фазовая скорость 3-4 км/сут. Для аномалий в поле хлорофилла (рис. 3б) наличие распространяющихся на запад волн Россби несомненно, хотя и не столь очевидно, как для уровня. Значительные внутригодовые изменения

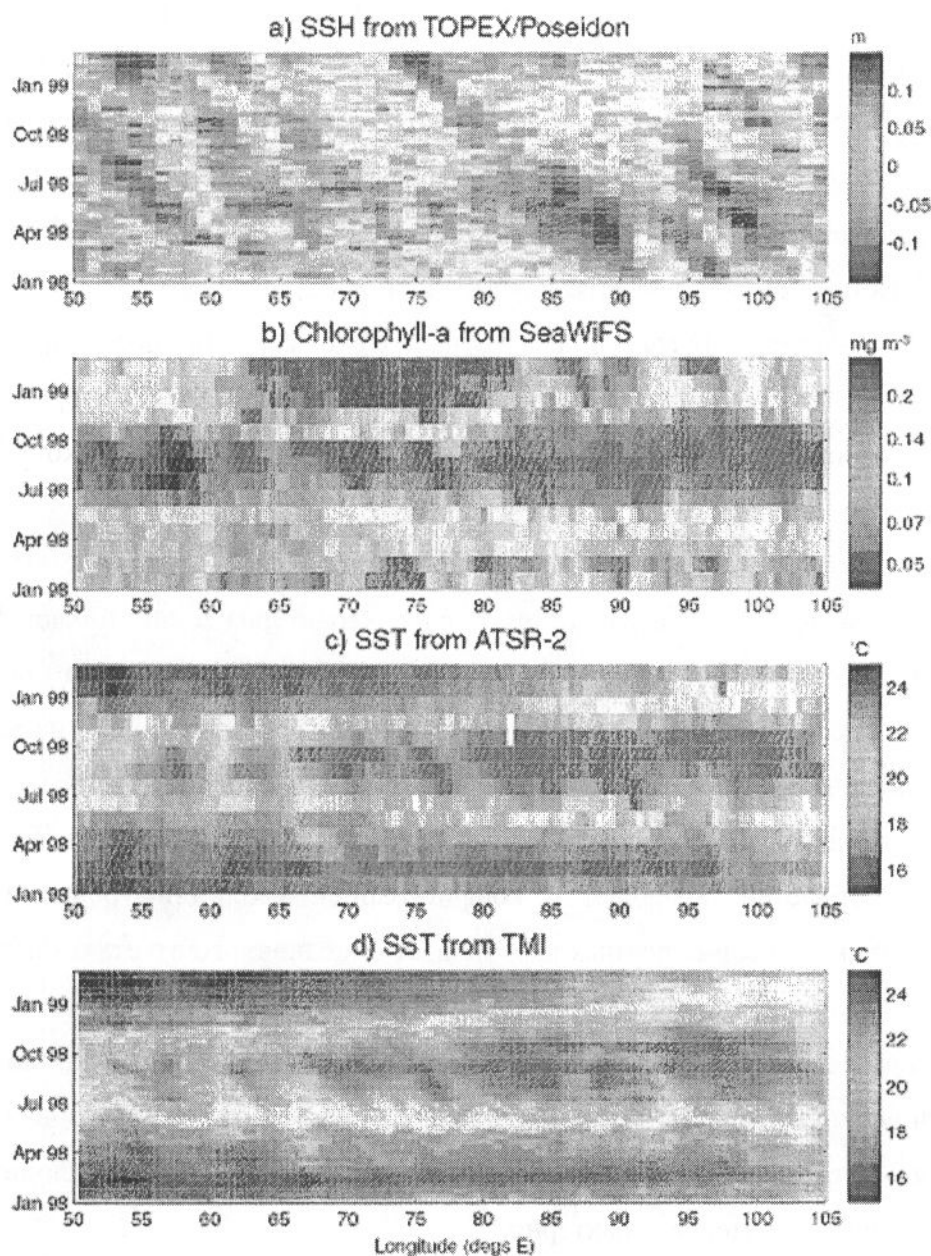


Рис. 2. Пространственно-временные разрезы уровня океана (а), содержания хлорофилла (б) и температуры воды в инфракрасном (с) и микроволновом спектре (д) для 32°S в Индийском океане. (Концентрация хлорофилла представлена в логарифмической шкале).

аномалий хлорофилла в западной части акватории выражены лишь в сентябре 1998 г., а на востоке – в начале 1999 г.; сильные аномалии для 70°-80° в январе-марте 1998 г. не повторились в 1999 г.

На рис. 3 (с,d) представлены также карты аномалий температуры для данного района, из которых следует, что рассматриваемые авторами различные данные хорошо согласованы, а в аномалиях температуры также проявляются волны Россби с теми же характеристиками. Инфракрасные (ATSR) и микроволновые (ТМ) датчики температуры приблизительно одинаково фиксируют особенности волн Россби в западной части акватории 58°Е, для которой характерны более низкие значения аномалий температуры. Таким образом, существует зависимость между аномалиями различных характеристик, которые могут быть связаны с возмущениями в поле волн Россби. Об этом свидетельствуют многие исследования последних лет (Cipollini, Cromwell at el, 2000; 2001; Corinne Le Que' re', Vopp at el, 2002; Srokosz, Quartly at el, 2005).

Рассмотрим в качестве другого примера несколько карт Колорадского центра астродинамических исследований, представляющих совмещенную информацию о концентрации хлорофилла и уровня океана для северо-западной части Тихого океана (рис.4).

Анализ последовательности таких карт с 17 сентября до 28 октября 2005 г. с 8-суточным осреднением показал, что изолинии уровня, характеризующие циклонические или антициклонические образования, во многих случаях соответствуют областям повышения или понижения концентрации хлорофилла (см. рис. 4). Как видно из рисунка, положительным значениям уровня могут соответствовать как повышенные, так и пониженные концентрации хлорофилла. Особый интерес представляет тот факт, что конфигурация этих областей совпадает с конфигурацией изолиний уровня. Однако феноменологический анализ совмещенных карт не дает однозначного ответа о знаке связи между аномалиями уровня и концентрацией хлорофилла.

Ситуации, при которых происходит локализация области повышения (понижения) концентрации хлорофилла, практически повторяющая форму изолиний уровня, чаще всего встречаются в антициклонических образованиях, в то время как для циклонических образований это значительно менее характерно.

На картах распределения концентрации хлорофилла можно обнаружить различные примеры локальных изменений концентрации хлорофилла в антициклонических и циклонических образованиях. Для антициклонических образований характерны локальные как повышение, так и понижение концентрации хлорофилла, в то время как

для циклонических образований характерно незначительное повышение (относительно общего фона) концентрации хлорофилла.

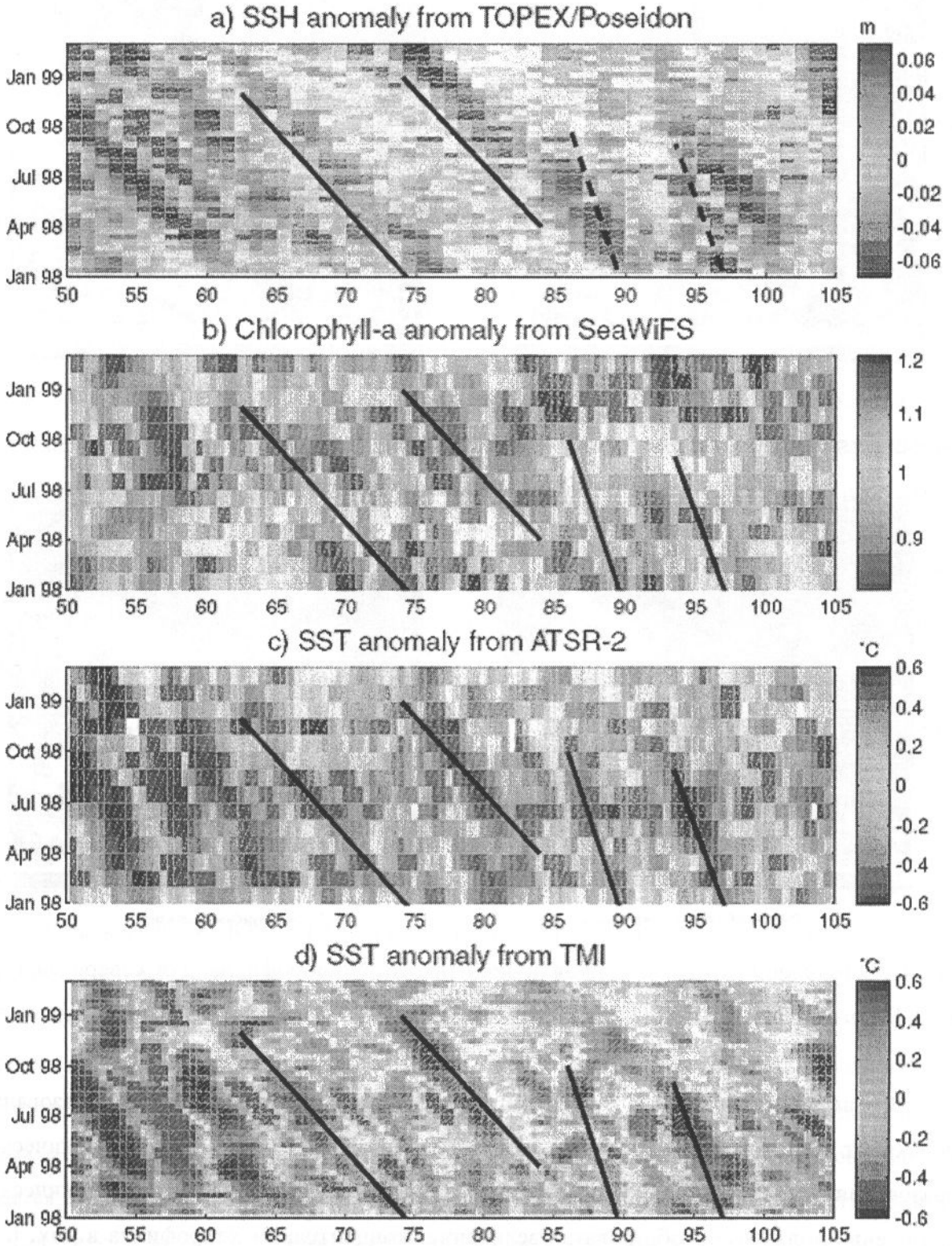


Рис. 3. Пространственно-временные разрезы аномалий уровня SSH (а), концентрации хлорофилла (б) и температуры поверхности воды SST (с,д) для 32°S в Индийском океане (Cipollini, P., Cromwell, D., et al, 2000).

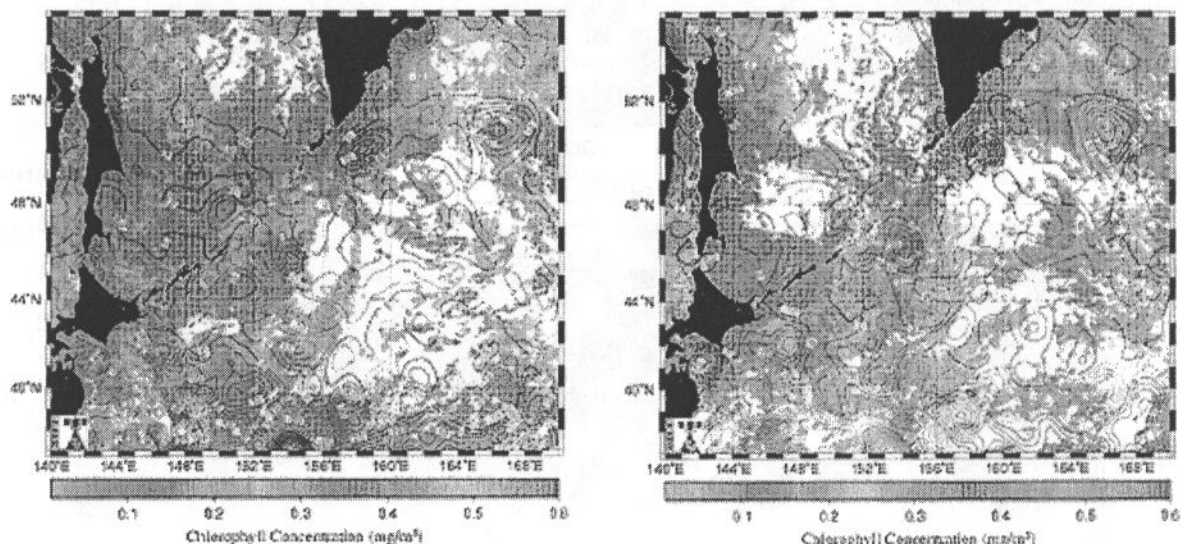
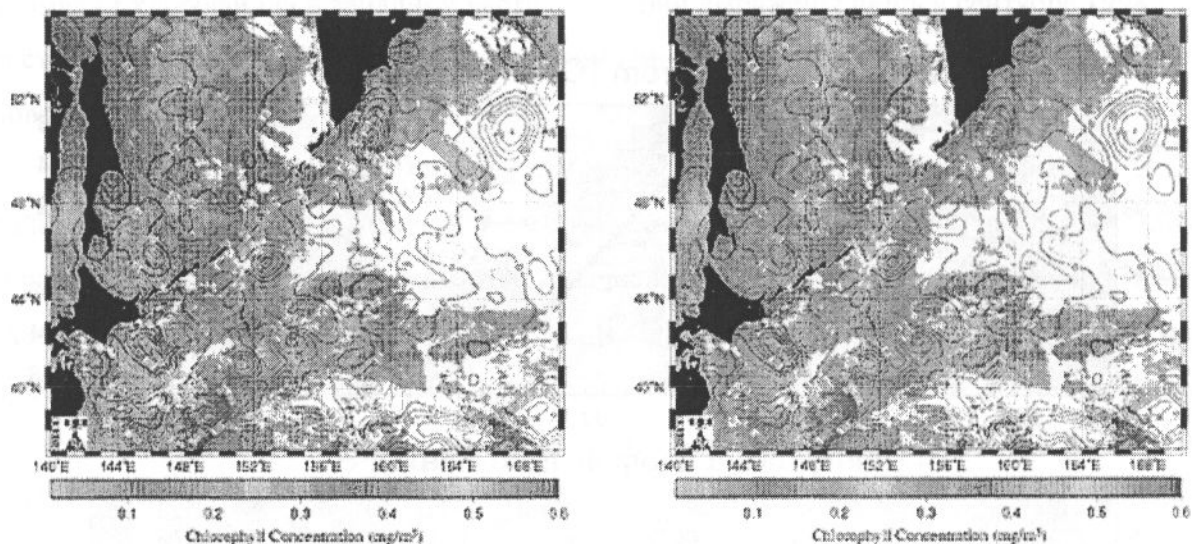


Рис. 4. Совмещенные карты уровня и концентрации хлорофилла для северо-западной части Тихого океана с 8-суточным осреднением.

Очевидно, данный факт можно объяснить так. В антициклонических образованиях происходит конвергенция течений, которые направлены внутрь антициклонического образования, и, казалось бы, перенос хлорофилла внутрь антициклонического образования должен способствовать увеличению концентрации хлорофилла в них, такая ситуация зафиксирована на многих картах распределения концентрации хлорофилла. Однако в других случаях происходит и обратное: концентрация не увеличивается, а уменьшается и в центре антициклонического образования «обособлены» области с пониженной концентрацией хлорофилла

Вероятно, это связано с тем, что концентрация хлорофилла определяется не только динамическими, но и биотическими механизмами, а также тем, что в формировании полей участвуют как волновые, так и вихревые процессы. Кроме того, существенными могут быть нелинейные эффекты переноса.

Зафиксировав отдельное антициклоническое образование, можно проследить его эволюцию и соответствующие изменения концентрации хлорофилла. Как правило, вихревое образование типа антициклона в течение месяца незначительно смещается в направлении на северо-восток вдоль Курильской гряды. В течение этого промежутка времени меняется конфигурация изолиний: если вначале изолинии, например, вытянуты в направлении, перпендикулярном Курильской гряде, то затем – вдоль Курильской гряды. Вначале антициклоническое образование совпадает с областью незначительной концентрации хлорофилла, приблизительно 0.3 мг/м^3 и с незначительной областью высокой концентрации 0.6 мг/м^3 с стороны юго-восточной части рассматриваемого образования. Позднее меняется конфигурация антициклона, а область повышенной концентрации хлорофилла, постепенно увеличиваясь, смещается сначала к югу, а затем к юго-западу, не затрагивая лишь центр этого образования. Через месяц (в начале октября) ситуация резко меняется: в центре антициклона наблюдается область минимальных значений хлорофилла $0.1-0.2 \text{ мг/м}^3$, окруженная областью повышенной концентрации, во второй половине октября пятно минимальных значений постепенно «растворяется» на общем фоне, а сам антициклон смещается к северо-западу. Очевидно, что рассмотренное явление не может быть объяснено простым переносом пассивной примеси, и существуют иные, в том числе биотические причины явления.

Представляет интерес совместный анализ распределения промысловых рыб в период их нагула и концентраций хлорофилла. Рассмотрим этот вопрос на примере сайрового промысла. В Южно-Курильском районе (ЮКР) интенсивный нагул сайры происходит у фронта Соя и в зоне Прибрежных фронтальных образований, где, как и у Курильского фронта, в летне-осенний период формируются наиболее продуктивные в кормовом отношении участки. Здесь сайровые косяки задерживаются. Увеличение количества косяков на таких участках приводит к формированию скоплений, особенно плотных с 3 декады августа по 1 декаду октября. В дальнейшем сайра из района ЮКР смещается с водами течений Ойясио в юго-западном направлении по первой его ветви, продолжая нагуливаться и формировать скопления вдоль Японии. В этот же период (сентябрь-октябрь) часть косяков смещается к югу с водами второй ветви Ойясио и оказывается у северной периферии субарктического фронта, где также формируются скопления, особенно плотные в октябре-ноябре (см. рис. 5).

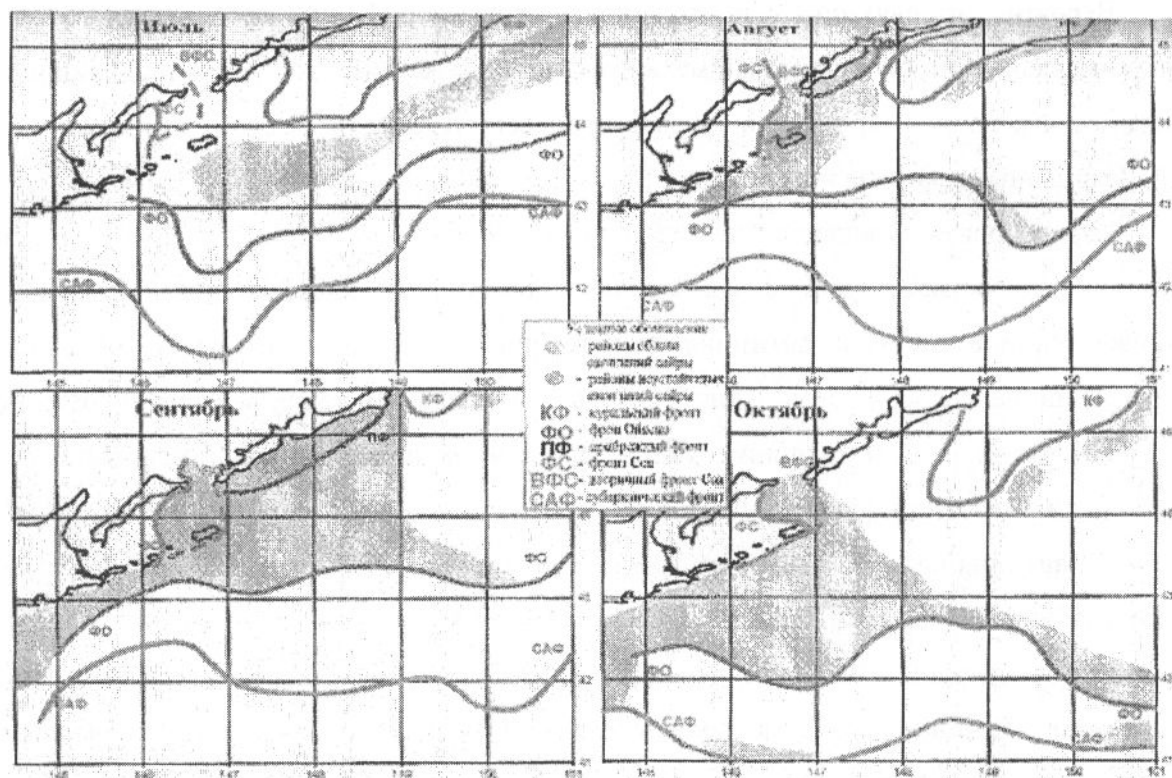


Рис. 5. Скопления тихоокеанской сайры по промысловым планшетам 2002 г. в ЮКР и положение гидрологических фронтов (Филатов В.Н., 2002).

В.Н. Филатов утверждает, что комплекс благоприятных для нагула и образования сайровых скоплений фоновых условий определяется, прежде всего, особенностями термоструктуры и количеством планктона. Он отмечает, что в районе ЮКР сайра, как и другие рыбы, избегают участков повышенного содержания фитопланктона. Причины этого избегания остаются неясными (Филатов В.Н., 2002).

На рис. 5 схематично представлены районы скопления тихоокеанской сайры в ЮКР и положение гидрологических фронтов за промысловый период июль – октябрь 2002 г. Отметим, что все выделенные области скоплений рыбы, как правило, соответствуют значениям превышения уровня океана на альтиметрических картах в пределах от –4 до 4 см.

Обратимся к картам распределения хлорофилла в ЮКР за те же месяцы 2002 г. В июле и августе зоны самой высокой концентрации хлорофилла, как правило, не являются зонами скоплений косяков и уловов рыбы. В частности, в июле, когда концентрация хлорофилла была максимальной у береговой черты Хоккайдо и Курильской гряды, скопления рыбы вообще не отмечены. В августе наблюдается максимум концентрации хлорофилла в районе 42° с.ш., 148° в.д., но скопления сайры отсутствуют. В сентябре и октябре картина несколько иная. Повышенные концентрации хлорофилла характерны для обширной зоны вод ЮКР, участки вылова и скоплений рыбы также увеличены по площади. Однако в характерном максимуме хлорофилла в районе 44° с.ш., 150° в.д.

рыбные скопления отсутствуют. В октябре промысел и скопления косяков рыбы смещаются к югу акватории, и в целом район высокого содержания хлорофилла соответствует областям наибольших уловов и скоплений косяков сайры.

Таким образом, в июле и августе 2002 г. области наибольших уловов сайры не совпадают с областями максимальных концентраций хлорофилла, что согласуется с выводами В.Н.Филатова об избегании сайровыми косяками участков повышенного содержания фитопланктона, но в сентябре и октябре это не так.

Установить на феноменологическом уровне анализа последовательность трофических связей “фитопланктон – зоопланктон – сайра” для 2002 г. не удалось. Вероятно, это можно будет сделать при моделировании этих зависимостей. Однозначная зависимость для таких связей не обнаруживается и в Норвежском и Баренцевом морях в районах промысла скумбрии, сельди, путасу, хотя их привязанность к зонам вергенций достаточно очевидна.

Сложное соотношение пространственно-временного распределения концентрации хлорофилла и уровня моря, помимо очевидных биотических причин, может быть объяснено также особенностями динамики вод и эффектами нелинейности переноса субстанций. Уравнение переноса и диффузии даже для течений, имеющих гармонический характер, имеет достаточно сложное решение даже для одномерного случая из-за его нелинейности (см., например, Белоненко, Фукс, 1992). Рассмотрим для простоты эти эффекты в одномерном приближении.

Примем уравнение переноса и уравнение неразрывности движения в виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -u \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\partial uH}{\partial x} \quad (6)$$

Из этих уравнений, во-первых, очевидно следует нелинейность связи θ с u и ξ . Во-вторых, если принимать гипотезу о концентрации пассивных примесей θ в местах конвергенции течений $\frac{\partial \xi}{\partial t} > 0$, $\frac{\partial uH}{\partial x} < 0$, то из (6) очевидно, что фаза пространственно-временных колебаний уровня и концентрации хлорофилла не будут совпадать.

Исключим далее из системы (5) – (6) скорость течения:

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[H \frac{\partial \theta}{\partial t} / \frac{\partial \theta}{\partial x} \right] \quad (7)$$

Уравнение (7) связывает концентрацию субстанции с уровнем моря достаточно сложной зависимостью.

Зададим возмущение уровня в виде гармонической волны:

$$\xi = A \cos(\sigma t - kx)$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\sigma A \sin(\sigma t - kx)$$

Заметим, что фаза конвергенции полного потока здесь сдвинута на 90° относительно фазы колебаний уровня моря.

Интегрируя уравнение (7) по x , найдем

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{H} (c\xi + C_0) \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0, \quad (8)$$

где C_0 – некоторое начальное возмущение, которое можно без нарушения общности принять равным 0, $c = \frac{\sigma}{k}$ – фазовая скорость волны.

Аналитическое решение этого уравнения имеет весьма сложный вид. Однако приближенное аналитическое решение в виде разложения в ряд по малому параметру допускает достаточно простую интерпретацию:

возмущение в поле концентрации субстанции складывается из гармонического возмущения с той же частотой и волновым числом, что и у возвышений уровня, но сдвинутой относительно него по фазе на 90° . На это гармоническое во времени и пространстве возмущение накладывается стационарная волна с удвоенным волновым числом, а также «остаточное» постоянное значение концентрации, зависящее от начальных условий.

Таким образом, даже для таких простых стилизованных условий нелинейная адвекция приводит к сложному соотношению между возмущениями в поле концентрации примеси и динамическими возмущениями.

В реальных условиях трехмерных нестационарных и нелинейных возмущений при их динамической неустойчивости, вихреобразовании и турбулентном перемешивании картина пространственно-временной изменчивости в поле концентрации хлорофилла может быть весьма сложной. Вероятно, во многом именно этим можно объяснить неоднозначное соответствие возмущений в поле концентраций хлорофилла и в поле течений.

Соответственно этому зависимость численности рыбы от концентрации хлорофилла в местах ее скопления, определенная системой уравнений (1)-(4), должна быть существенно нелинейной и нестационарной. Однако усилия по реализации этой задачи для конкретных промысловых рыб в период их кормовых миграций представляются перспективными.

Литература

- Алексеев В.В., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Физическое и математическое моделирование экосистем// Санкт-Петербург// Гидрометеиздат// 1992.
- Белоненко Т.В., Фукс В.Р. Нестационарные фронтальные зоны в океане, вызванные волновой адвекцией// В сб. «Физическая океанология и проблемы биологической продуктивности. 1992. с. 5-22.
- Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.Р. Вихри или волны? // Вестник Санкт-Петербург. ун-та. 1998. Сер.7. Вып. 3 (№ 21). С. 37-44.
- Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Фукс В.Р. «Градиентно-вихревые волны в океане»// Издательство Санкт-Петербургского ун-та. 2004. 215 с.
- Биология Тихого океана, кн. 1. Планктон// М., 1967.
- Виноградов М.Е. Биопродуктивность Тихого океана// В сб. «Биологические ресурсы Тихого океана». М. 1986.
- Вольтерра В. Математическая теория борьбы за существование. М., Наука. 1976. 286 с.
- Гершанович Д.Е., Елизаров А.А., Сапожников В.В. Биопродуктивность океана. М.: Агропромиздат. 1990.
- Кушинг Д.Х. Морская экология и рыболовство // Пер. с англ. под ред. В.П.Серебрякова. М., 1979.
- Дмитриев В.В. Диагностика и моделирование водных систем// Изд С.-Петербур. ун-та. СПб., 1995.
- Елизаров А.А., Кочкиков В.Н., Ржонсницкий В.Б. Океанологические основы рыболовства. Л., 1983. Изд-во ЛГУ. 224 с.
- Киселев И.А. Планктон морей и континентальных водоемов. Т. 1. Общие вопросы планктологии. Л., 1969.
- Константинов А.С. Общая гидробиология. М., 1972.
- Меншуткин В.В. Математическое моделирование популяций и сообществ водных животных. Л., 1971
- Моделирование морских систем // Пер. с англ. Л., Гидрометеиздат. 1978.
- Моисеев П.А. Биологические ресурсы Мирового океана // Моногр. М.: Агропромиздат. 1989.
- Озмидов Р.В. Диффузия примесей в океане. Гидрометеиздат. 1986. 279 с.
- Парсонс Т.Р., Такахаши М., Харгрейв Б. Биологическая океанография. М., 1982.
- Ризниченко Г.Ю. Математические модели в биофизике и экологии. Москва-Ижевск.2003.

Самовский С.В. Водные экосистемы. От космических наблюдений к математическому моделированию. Иркутск, 1999.

Сергеев Ю.Н., Кулеш В.П., Савчук О.П., Дмитриев В.В. и др. Имитация поведения пространственно-неоднородной экосистемы Северного моря // Математическое моделирование пелагической экосистемы Северного моря. Калининград, 1982.

Старицын Д.К., Фукс В.Р., Филатов В.Н. Опыт использования спутниковой альтиметрической информации для оценки океанологических условий промысла сайры. 2003.

Старицын Д.К., Фукс В.Р., Самко Е.В., Филатов В.Н. Особенности концентрации промысловых организмов в зонах волновой и вихревой конвергенции течений. - В сб. «Вопросы промысловой океанографии». Вып. 2. Москва. 2006.

Фещенко О. Б., Бочаров Л.Н. Семантическая модель формирования концентрации промысловых гидробионтов, основанная на концепции оптимального пищевого поведения // Вопросы рыболовства. 2002. Т. 3. № 5(9). С. 149-161.

Фещенко О. Б. Формирование концентраций стайных рыб во время нагула и миграций как геоэкологическое явление: Автореф. канд. дис. Владивосток, 2002. 21 с.

Филатов В.Н. Особенности распределения, поведения, косяков и образования скоплений сайры в период нагула и преднерестовых миграций. Организация поисковой работы (Пособие для капитанов). Владивосток. 2002.

Шатохин Б.М. Результаты исследования влияния гидрометеорологических циклов на формирование промысловой обстановки // Тезисы Всероссийской конференции промысловой океанографии. М. 1999.

Шатохин Б.М., Мишкин В.М., Ключков Д.Н., Ванюшин Г.П., Котенев Б.Н., Черноок В.И., Забавников В.Б. Методология оценки биомассы и распределения нагульных скоплений далеко мигрирующих видов и их поведение в синоптическом масштабе изменчивости как основа рыбопромыслового прогнозирования // Материалы Всероссийской конференции «Пути решения проблемы изучения, освоения и сохранения ресурсов Мирового океана» 20-22 марта 2002 г., М., ВНИРО, С.44-57.

P. Cipollini, D. Cromwell, G.D. Quartly and P.G. Challenor, "Remote sensing of oceanic extra-tropical Rossby waves"// in Satellites, Oceanography and Society, D. Halpern ed., Elsevier, pp. 99-123, 2000.

Cipollini, P., Cromwell, D., Challenor, P. G. & Ruffaglio, S. Rossby waves detected in global ocean colour data// Geophys. Res. Lett.,28, 323-326, 2001.

Corinne Le Que' re', Laurent Bopp, and Ina Tegen Antarctic circumpolar wave impact on marine biology: A natural laboratory for climate change study// Geophysical Research Letters, V. 29, N. 0, 10.1029/2001GL014585, 2002

Hoffman K., Intern S. Chlorophyll Fluorescence as a Biological Indicator of Primary Productivity// Monterey Bay Aquarium Research Institute. 2003.

Meric A. Srokosz, Graham D. Quartly and Justin J.H. Buck. A possible plankton wave in the Indian Ocean.// Southampton Oceanography Centre, 2005.

Ryabchenko V.A., Gorchakov V.A. Seasonal dynamics and biological productivity in the Arabian Sea euphotic zone as simulated by a three-dimensional ecosystem model // Global Biogeochemical Cycles. 1998. Vol. 12, N 3.

Vaynard J. Smith. Models in ecology// Cambridge. University Press. 1974.