

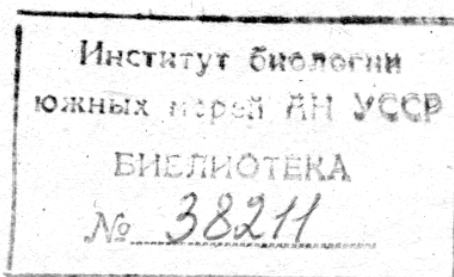
ДРОВ 98

ДРОВ 2010

**Национальная Академия наук Украины
Морской гидрофизический институт**

**ИССЛЕДОВАНИЯ ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЫ
АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКОГО БАССЕЙНА**

Сборник научных трудов



Севастополь 1995

ОСНОВЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПЛАНКТОННЫХ ПОЛЕЙ

В работе предложен статистический метод обработки данных о распределении планктона в шельфовой зоне моря. Разработана статистическая математическая модель планктонных полей с учетом взаимодействия адвективных, диффузионных и продукционных процессов.

Введение

В данной работе изложены методы статистической обработки данных и математического моделирования неоднородностей в планктонных полях.

Эти методы основаны на представлении о распределении планктона как о пространственном случайном поле и учете взаимодействия адвективных, диффузионных и продукционных процессов при формировании его статистической структуры. Такие взаимодействия определяют пространственную структуру планктонных полей в широком классе случаев в открытых и шельфовых частях морских акваторий.

Таким образом, есть основания для применения изложенных методов к исследованиям полей планктона в шельфовой зоне моря.

Пространственные неоднородности (планктонные скопления) являются типичным, часто встречающимся элементом пространственной структуры планктонных полей [1, 2, 3]. Неоднородности возникают как под действием процессов, протекающих в планктонном сообществе (этологические, трофодинамические, метаболические), так и под действием многочисленных биотических и абиотических факторов водной среды. В связи с этим диапазон их масштабов весьма широк (по известным данным, от метров до сотен километров).

Состояние исследований в настоящее время позволяет предложить следующую приближенную классификацию неоднородностей в планктонных полях. Прежде всего, это сравнительно маломасштабные (от метров до сотен метров) скопления организмов большой плотности. Биомасса и численность организмов в них могут на порядок превышать фоновые величины. Такие скопления являются типичной особенностью планктонных полей и обнаруживаются в самых различных условиях и регионах океана. Так, например, скопления обнаружены в морских проливах [4], замкнутых водоемах [5], районах коралловых рифов [6], открытых частях моря [7] и океана [8].

Другой тип — крупномасштабные (от десятков до сотен километров) неоднородности, возникающие под действием долгоживущих вихрей, в зонах вергенций и гидрологических фронтов [9, 10]. Возможно также возникновение крупномасштабных неоднородностей вследствие разделения зон развития основных компонент планктона между водными массами различного генезиса [11].

Наконец, существуют неоднородности промежуточных масштабов (порядка 1–50 км). В литературе высказывалось предположение, что такие неоднородности возникают под действием адвективно-диффузионных процессов в исследуемом районе [12, 13].

Важным при исследовании и моделировании неоднородностей является вопрос о том, как трактуется пространственная структура планктонного поля и какие ее элементы принимаются как объект изучения и моделирования.

В ряде исследований таким объектом является отдельное скопление особей [6,14]. В других работах пятна рассматриваются как элементы волновых или диссипативных структур, существующих в распределении биомассы или численности организмов [15,16,17]

В исследованиях [18,19,20] используется представление о распределении планктона как о пространственно-временном случайном поле. Основным объектом анализа является корреляционная и спектральная структура планктонных полей по данным, полученным на разрезах [21,22].

При моделировании мезомасштабных неоднородностей, по-видимому, наиболее представительной и перспективной является группа моделей, основанная на совместном учете эколого-физиологических процессов в планктонном сообществе и адвективно-диффузионных процессов.

Начало этого направления положено в работе [23], основанной на предположении о существовании критического масштаба, при котором противоположные эффекты диффузии и роста уравниваются. В работах [19,24] проводились оценки этого масштаба по известным данным о значениях коэффициентов турбулентной диффузии и скорости роста планктона. При этом получены величины от сотен метров до километровых масштабов.

В работе [14] рассмотрена модель диффузии планктонного скопления с учетом характерной для условий океана зависимости коэффициента диффузии от масштаба явления. Показано, что при разумных оценках скорости роста в течение 10 сут скопление может достигнуть масштабов 20-30 км.

Далее диффузионная модель развита с учетом процессов адвекции в работах [1,25]. В последней работе выполнены оценки масштабов неоднородностей в зависимости от коэффициентов турбулентной диффузии, скорости течения и скорости роста планктона.

Важное значение имеют модельные оценки времени жизни неоднородностей различных масштабов, так как получение эмпирических оценок этой величины крайне затруднительно. Такие оценки на основе аналогии с пятнами пассивной примеси даны в работе [12].

Статистический подход к исследованию планктонных полей, по-видимому, наиболее точно отражает сложность и нерегулярность их пространственной структуры, множественность факторов, приводящих к формированию пространственных неоднородностей. Далее будет применяться представление о пространственной структуре планктонного поля как суперпозиции крупно-, мезо- и мелкомасштабных неоднородностей. На процессы стохастической временной изменчивости неоднородностей накладывается закономерный суточный ход биомассы, связанный с миграционными процессами. При этом неоднородности могут трактоваться двояко: во-первых, как выбросы случайных полей; во-вторых, как пространственные области, характеризующиеся единым типом изменения биомассы и численности планктона [1].

Метод статистической обработки данных

Введем некоторые обозначения. При обработке данных каждый разрез делится на ряд пространственных областей масштаба Δl миль (минимальный разрешающий масштаб измерений), к которым и относят результаты отдель-

ных измерений биомассы. Эти области нумеруются вдоль разреза и далее обозначаются $0_1, 0_2, \dots, 0_n$, где n — полное число наблюдений на разрезе. Величина отклонения биомассы от нормы в области 0_k обозначается как B_k . Основной этап анализа — построение пространственной ковариационной функции $C(k\Delta l)$ с использованием соотношения

$$C(k\Delta l) = 1/n \sum B_s B_{s+k}, \quad (1)$$

где Δl — разрешающий масштаб наблюдений.

В пределах пространственной области, близкой по масштабу к радиусу корреляции, между флуктуациями биомассы существуют относительно сильные положительные и отрицательные корреляции. Это значит, что в указанной области флуктуации биомассы взаимосвязаны, а распределение биомассы изменяется как некоторое целостное образование.

Исходя из этого определим характерную неоднородность, или пятно, как пространственную область, заполненную биомассой, изменяющейся как единое целое. Тогда радиус корреляции указывает масштаб типичного для данной структуры пятна.

Для ответа на вопрос о факторах, формирующих наблюдаемое распределение биомассы, рассмотрим статистическую модель этого распределения. Подобные модели предназначены для эмпирического описания механизмов, регулирующих связи между различными областями случайного поля, методика их построения описана, например, в [26].

Анализ ковариационных функций по методике [26] показывает, что адекватное описание процесса может быть получено на основе модели второго порядка: для каждой из областей 0_k достаточно описать только ее взаимодействие с двумя соседними областями 0_{k-1} и 0_{k+1} . Механизм формирования поля биомассы приближенно описывается соотношением

$$B_k = \pi_{-1} B_{k+1} + \pi_1 B_{k-1} + a_k, \quad (2)$$

где π_{-1} и π_1 — постоянные коэффициенты, подлежащие оценке по данным наблюдений.

Соотношение (2) показывает, что биомасса B_k в области 0_k определяется биомассами в соседних областях 0_{k+1} и 0_{k-1} , а также локальными флуктуациями a_k биомассы в области 0_k . Процессы горизонтального обмена биомассой приближенно описываются так: вклад в биомассу B_k от каждой из областей 0_{k+1} и 0_{k-1} пропорционален содержащимся в них биомассам B_{k+1} и B_{k-1} .

Такое упрощенное представление об обмене лежит в основе линейных моделей случайных полей [26].

Флуктуации a_k в различных областях считаются некоррелированными, так как они обусловлены процессами необменного характера и малого масштаба (меньшего, чем масштаб области 0_k). К таким процессам могут быть отнесены рождаемость, смертность, выедание, "прирост" (т.е. увеличение биомассы в слое за счет вертикальных миграций) и другие процессы.

Полученные значения π_{-1} и π_1 позволяют привести соотношение (2) к следующему виду (диффузионной форме):

$$k(B_{k+1} - 2B_k + B_{k-1}) - u(B_{k+1} - B_{k-1})/2 + nB_k + a_k = 0. \quad (3)$$

Это уравнение выводится путем приравнивания коэффициентов при B_k в соотношениях (2) и (3). При этом можно показать, что при соблюдении условия $\pi_{-1} + \pi_1 > 1$ параметры k и n получаются положительными, а соотношение (3) является разностным аналогом уравнения

$$udB/dx = kd^2B/dx^2 + nB + a(x). \quad (4)$$

Величины k , u и n можно понимать как безразмерные коэффициенты диффузии, переноса и скорости увеличения биомассы в слое. По данным k и u можно оценить число Шмидта $Sh = u/k$, характеризующее соотношение вкладов от переноса и диффузии в процесс распространения примеси в море.

Оценки безразмерного параметра $G = kn/u^2$ характеризуют относительное значение эффектов диффузии и производства биомассы по сравнению с эффектом переноса.

Поскольку достаточно репрезентативных данных о распределении биомассы зоопланктона на шельфе Черного моря еще не имеется (их сбор планируется в рамках программы "Ресурсы шельфа"), мы продемонстрируем применение изложенного метода на примере данных, полученных в 8-м рейсе НИС "Профессор Водяницкий" по 5 широтным разрезам в тропической зоне Индийского океана в марте-мае 1980 г.

Корреляционные функции строились с шагом $\Delta l = 10$ миль. Во всех случаях радиусы корреляций были близки к 20 милям. В соответствии со сказанным выше это значит, что характерные масштабы неоднородностей порядка 20 миль. С использованием ковариационных функций получены первичные эмпирические оценки коэффициентов π_{-1} , π_1 и других параметров. Их величины приведены в таблице. Полученные оценки согласуются по порядку величин со значениями Sh , характерными для океанических областей при масштабах явлений порядка десятков миль. Параметры Sh и G в совокупности определяют все основные характеристики процесса, описываемого соотношением (4). В то же время они мало изменяются от разреза к разрезу (таблица).

Характеристика коэффициентов по биомассе зоопланктона
для широтных разрезов в Индийском океане

Разрез, ° с. ш.	π_{-1}	π_1	k	u	n	Sh	G
8	0,19	5,81	3,00	5,62	5,00	1,87	0,46
7	0,09	2,75	1,42	2,66	1,84	1,86	0,37
6	0,37	3,07	1,72	2,70	2,44	1,58	0,31
5	-0,22	5,33	2,65	5,75	4,31	2,16	0,35
4	-0,16	4,40	2,12	4,56	3,24	2,15	0,37

Отсюда следует, что формирование поля биомассы можно рассматривать как единый для всего полигона физико-экологический процесс, подчиняющийся закономерностям, характерным для процессов распространения неконсервативных примесей в море.

Математическая модель пространственно-временной структуры планктонного поля

При построении модели используется следующее общее представление о пространственно-временной структуре поля концентрации биомассы планктона. Концентрация биомассы в точке x в момент времени t обозначается $B(t, x)$ и складывается из двух основных компонент. Во-первых, это осредненное, фоновое значение концентрации $B(t)$, общая величина для всего рассматриваемого района в целом, характеризующая общую эволюцию поля биомасс во времени. Например, $B(t)$ может описывать суточный ход биомассы на полигоне. На этом фоне формируется сложное, пятнистое пространственное распределение $b(t, x)$, описывающее отклонение биомассы в точке x от своего "нормального" среднего значения $B(t)$. Следовательно, общее поле концентрации биомассы представляется в виде разложения

$$B(t, x) = B(t) + b(t, x). \quad (5)$$

Сложность пространственно-временной структуры распределения $b(t, x)$ приводит к выводу, что в качестве его теоретической модели необходимо применить пространственно-временное случайное поле [27]. Это предположение о $b(t, x)$ и применяется в данной работе. Мы полагаем, что в какой-то период времени планктонное поле может стабильно существовать в виде равенства (5). Эта гипотеза математически выражается положением о том, что поле $b(t, x)$ является стационарным во времени. Четкий смысл этого условия выяснен в работе [27]. Практически же оно означает, что, хотя поле $b(t, x)$ изменчиво во времени, данная изменчивость не имеет никакой определенной тенденции. В частности, пространственная корреляционная структура этого поля вообще не зависит от времени.

Распределение $b(t, x)$ предполагается статистически пространственно однородным. С практической точки зрения это означает, что распределение определяется едиными для всего рассматриваемого района закономерностями. С теоретической точки зрения пространственная однородность есть предпосылка корректного применения корреляционного и спектрального анализов. Статистическая структура этого поля определяет как характерные масштабы, так и время существования пространственных неоднородностей. В частности, области повышенных значений величины $b(t, x)$ — это теоретические аналоги пятен планктона.

Далее рассмотрим мезомасштабные процессы, протекающие в планктонных полях, с масштабами 1–50 км. В этом диапазоне масштабов преобладающее влияние на распределение биомассы имеют процессы адвективного переноса, турбулентной диффузии и роста биомассы [13].

Приведенный выше анализ литературы и экспериментальных данных показывает, что в настоящее время далеко не ясен вопрос о том, в каких диапазонах масштабов существенны нелинейные описания эколого-физиологических процессов в планктонном сообществе. Вполне возможно, что в мезомасштабном диапазоне нелинейные модели не имеют преимуществ перед классическими моделями типа предложенной в [14] при удачно подобранной константе роста биомассы [13].

В данной работе для описания поля $b(t, x)$ также используется уравнение турбулентной диффузии неконсервативной примеси

$$\partial b / \partial t + u \partial b / \partial x = k \partial^2 b / \partial x^2 + nb + a(t, x), \quad (6)$$

где t — время; x — горизонтальная координата; u — скорость переноса течением; k — коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии. Величина n — эффективная удельная скорость увеличения биомассы планктона, отражающая в интегрированном виде процессы размножения, отмирания и выедания.

Случайное, стационарное, однородное поле $a(t, x)$ описывает локальный поток биомассы в точке x , не связанный ни с адвективно-диффузионными процессами, ни с ростом. Это поле в интегрированном виде отражает перенос биомассы по вертикали волнами или локальными подъемами и опусканиями вод, вертикальную турбулентную диффузию частиц планктона, влияние локальной неоднородности фоновых условий в океане на жизнедеятельность организмов, миграционные процессы. В соответствии со сказанным будем искать такие решения уравнения (6), которые являются стационарными и пространственно однородными случайными полями. Техника вычисления основана на спектральной теории случайных полей, изложенной в стандартных руководствах [27], и в данной работе представлена не будет.

Обозначим через $g(\omega, \lambda)$ пространственно-временную спектральную плотность поля $a(t, x)$. Здесь ω — частота, λ — волновое число. Тогда пространственно-временной спектр поля получается из выражения (6). Он имеет вид

$$h(\omega, \lambda) = \left[(k\lambda^2 - n)^2 + (\omega + u\lambda)^2 \right]^{-1} g(\omega, \lambda). \quad (7)$$

Поле $b(t, x)$ существует как стационарное, если спектральная плотность $h(\omega, \lambda)$ интегрируема [27]. Однако спектральная плотность (7) имеет неинтегрируемую особенность в точке

$$\lambda_0 = (n/k)^{1/2}, \quad \omega_0 = -u\lambda_0. \quad (8)$$

Волновому числу λ_0 соответствует масштаб l_0 , где

$$l_0 = 2\pi(k/n)^{1/2}. \quad (9)$$

Уравнения (8) и (9) приводят к выводу, что стабильное существование поля концентрации биомассы возможно лишь при отсутствии возмущений поля локальных потоков $a(t, x)$ с масштабами, близкими к l_0 , распространяющихся в направлении течения со скоростью u .

Рассмотрим результаты исследований распределения биомассы зоопланктона путем сбора проб с дискретностью 10 миль в тропической зоне Индийского океана. Таким масштабам соответствуют коэффициенты диффузии порядка $5 \cdot 10^6 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ [14]. Если принять удельную скорость увеличения биомассы порядка 1 сут^{-1} , то из равенства (9) следует, что $l_0 = 35 \text{ км}$.

Возникновение таких неоднородностей вполне вероятно. В частности, они могут быть обусловлены турбулентными движениями вод. Согласно схеме [14], в диапазоне масштабов порядка десятков миль имеются такие источники

энергоснабжения турбулентности, как инерционные, приливные колебания и ряд других.

Заключение

Изложенная модель существования планктонного поля представляется как ряд периодов относительной стабильности, прерываемых перестройками под действием возмущений с масштабами, определяемыми соотношением (9).

Она дает возможность оценить время жизни пространственных неоднородностей различных масштабов. Положения, лежащие в основе модели, показывают, что целесообразно ее применение к исследованиям планктонных полей в шельфовой зоне моря. При этом появляется возможность установить связи характеристик адвективного переноса и диффузии в шельфовой зоне с реальными особенностями строения планктонных полей. В дальнейшем предполагается построение двух- и трехмерных моделей статистической структуры планктонных полей. Это позволит учесть влияние режима диффузии (т.е. зависимости коэффициентов диффузии от масштаба явления).

Это обобщение может дать ответы на такие вопросы, как соотношение диффузионных и продукционных процессов при формировании пятен, причины и характер видового различия в составе неоднородностей, описание зависимости времени жизни неоднородностей от фоновых условий и ряд других.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goldberg G.A.* Theoretical model of spatial-temporal structure of plankton aggregations// *Pol. Arch. Hydrobiol.*— 1985.— 32, N 3-4.— P. 351-356.
2. *Haurv L., McGowan I.A., Wiebe P.H.* Patterns and processes in the time- space scales of plankton distribution// *Spatial patterns plankton communit.: Proc.NATO cont.mar.biol.Erice, 1977.*— New York, 1978.— P. 415-442
3. *Longhurst A.R.* Significance of spatial variability// *Analysis of Marine ecosystems.*— London: Acad.Press, 1981.— P. 415-441.
4. *Cassie R.M.* Some correlations in replicate plankton samples// *N.Z.J.Sci.*— 1959.— 2.— P.478-484.
5. *Richerson P.J.* Spatial Heterogenity in Closed Basins// *Spat.Pattern.Plankton Commun.Erico.*— 1978.— P. 239-276
6. *Hamner W.M., Carleton I.H.* Copepod swarms: attributes and role in coral riff ecosystems// *Limnol. and Oceanogr.*— 1979.— 24, N 1.— P. 1-14.
7. *Щербатенко П.В., Гольдберг Г.А., Серегин С.А.* К методике изучения распределения зоопланктона на мелкомасштабном уровне/ *Депон. рукопись N 3717-84.*— М.: ВИНТИ, 1984.— 12 с.
8. *Haurv L.R., Wiebe P.H.* Fine-scale multispecies agregations of oceanic zooplankton// *Deep-Sea Res.*— 1982.— 29, N 7.— P. 915-921.
9. *Флинт М.В., Якушев Е.В.* Особенности пространственной структуры мезопланктона и распределение растворенного аммиака в районе подводной горы Пулковская // *Океанология.*— 1988.— 27, Вып. 5.— С. 843-849.
10. *Корненко А.Н., Лапшин В.Б., Симонов А.И., Шкудова Г.Я.* Гидрологические условия и мезомасштабное распределение зоопланктона в тропической зоне восточной части Тихого океана / *Депон. рукопись N 822-ГМ 88.*— М.: ВИНТИ, 1988.— 14 с.
11. *Дружков Н.В., Макаревич П.В.* Особенности пространственного распределения пелагических водорослей в водах Восточного Мурмана (Баренцево море) в весенний период 1989 г. // *Основы формирования биопродуктивных экологий северных морей / Депон. рукопись N 492-B89.*— М.: ВИНТИ, 1989.— С.35-52.
12. *Denman K.L., Platt T.* Biological prediction in the sea // *Modelling and prediction of the upper layers of the ocean / Proc.NATO adv.study inst.*— New York: Pergamon Press, 1979.— P.299-311.
13. *Okubo A.* Diffusion and ecological problems. Mathematical models// *Biomathematics.*— 1980.— 10.— P.255.

14. Озмидов Р.В. Горизонтальная турбулентность и турбулентный обмен в море. — М.: Наука, 1968. — 195 с.
15. Домбровский Г.С., Маркман Г.С. Пространственная и временная упорядоченность в экологических и биохимических системах. — Ростов: Изд-во РГУ, 1983. — 118 с.
16. Струнин Д.В. О стационарных распределениях биогенных веществ и фитопланктона в океане // Океанология. — 1988. — 27, вып. 5. — С. 835–839.
17. Chow P.L., Fam W.C. Periodic and travelling wave solutions to Volterra-Lotka equation with diffusion // Bull.Math.Biol. — 1976. — 38. — P. 643–658.
18. Mackas D.Z., Boyd C.M. Spectral analysis of zooplankton spatial heterogeneity // Science. — 1979. — 204, N 4388. — P. 62–64.
19. Platt T., Denman K.L. A general equation for the mesoscale distribution of phytoplankton in the sea // Memor.Soc.Roy.des Sci.de Liege. — 1975. — 6-e serie, 7. — P. 31–42.
20. Spatial scales of current speed and phytoplankton biomass fluctuations in Lake Tahoe / Powell T.V., Richerson P., Dillon T. et al // Sci. — 1975. — 189. — P. 1088–1090.
21. Гольдберг Г.А., Пионтковский С.А. Пространственно-временная структура поля мезопланктона в поверхностном слое тропической зоны Индийского океана // Экология моря. — 1985. — Вып. 19. — С. 86–110.
22. Denman K.L. Covariability of chlorophyll and temperature in the sea // Deep-sea Res. — 1976. — 23. — P. 539–550.
23. Kierstead H., Slobodkin L.B. The size of water masses containing plankton blooms // J.Mar.Res. — 1953. — 12. — P. 141–147.
24. Okubo A. Diffusion induced instability in model ecosystems : another possible explanation of patchiness // Tech.Rep.Chesapeake Bay Inst.Ref. — 1974. — 74. — 3. — 17 p.
25. O'Brien J.S., Wroblewski J.S. On advection in phytoplankton models // J.Theor.Biol. — 1973. — 38. — P. 197–202.
26. Box G.E., Jenkins G.M. Time series analysis. Forecasting and control. — San Francisco etc.: Acad.Press, 1970. — 402 p.
27. Вентцель А.Д. Курс теории случайных процессов. — М.: Наука, 1975. — 319 с.

Институт биологии южных морей НАН Украины,
Севастополь