

ЭКОЛОГИЯ МОРЯ



19
—
1985

5. Кирюхин В. Г., Львов В. В., Коломийцев М. М. Циркуляция вод центральной части Аравийского моря в период северо-восточного муссона. — В кн.: Комплексные океанические исследования Индийского океана. Севастополь: МГИ АН УССР, 1981, с. 25—32.
6. Коснырев В. К., Шапиро Н. Б. Синоптическая изменчивость северо-западной части Индийского океана. — Севастополь: МГИ АН УССР, 1981. — 43 с.
7. Кузьменко Л. В., Георгиева Л. В. Продукция фитопланктона северо-западной части Индийского океана в весенний период. — Настоящий сб., с. 32—40.
8. Синоптический эксперимент в Индийском океане / Б. А. Нелепо, В. Е. Заика, В. К. Коснырев. — Докл. АН СССР, 1981, 258, № 5, с. 1216—1219.
9. Полонский А. Б., Шапиро Н. Б. Течения в экваториальной зоне Индийского океана в период юго-западного муссона. — В кн.: Комплексные океанологические исследования Индийского океана. Севастополь: МГИ, АН УССР, 1981, с. 32—40.
10. Сажина Л. И., Евстигнеев П. В., Мельник Т. А. Пространственная неравномерность распределения сестона в межмуссонный период. — Там же, с. 115—123.
11. Самышев Э. З. Закономерности развития зоопланктона в открытых водах Аравийского моря. — Там же, с. 124—132.
12. Урденко В. А., Федирко В. И., Кравцов Г. Л. Оптические характеристики вод Аравийского моря. — Там же, с. 60—69.
13. Rao T. S. Zooplankton studies in the Indian Ocean. — Biol. of the Indian Ocean, 1973, 3, p. 243—255.

Ин-т биологии
юж. морей
им. А. О. Ковалевского
АН УССР, Севастополь

Получено 22.06.82

L. I. S A Z H I N A, O. K. B I L E V A, E. Z. S A M Y S H E V

INFLUENCE OF SYNOPTICAL VARIABILITY ON A SPATIAL SESTON DISTRIBUTION IN THE INDIAN OCEAN

Summary

Data on the large-scale spatial distribution of a 100-meter layer seston biomass in the north-western, western and equatorial regions of the Indian Ocean, obtained according to the KIPRIO-80 program, are generalized. Rearrangement of the biological field begins with qualitative variations caused by changes in the wind and hydrological regimes which resulted 15—20 days later in quantitative variations. Against a comparatively homogeneous seston biomass background (approximately $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in March-May and $150 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ in June-August) rich (more than $150\text{--}300 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) and poor ($50\text{--}100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) «spots» are distinguished coinciding in water area with stable (30-60 days) cyclonic and anticyclonic rotations caused either by the large scale frontal zone meandering (north-west) or by jet streams (equator) under the influence of the wind rearrangement.

УДК 577.3.475

Г. А. ГОЛЬДБЕРГ, С. А. ПИОНТКОВСКИЙ

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ СТРУКТУРА ПОЛЯ МЕЗОПЛАНКТОНА В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ТРОПИЧЕСКОЙ ЗОНЫ ИНДИЙСКОГО ОКЕАНА

Одной из задач исследований в 8-м рейсе НИС «Профессор Водяницкий» было изучение пространственной неоднородности распределений мезопланктона в поверхностных слоях океана. В последние годы интерес к исследованиям пространственной неоднородности (или «пятнистости») распределения планктона заметно возрос. Это связано, с одной стороны, с принципиально новыми возможностями подхода к проблеме, которые появились после создания непрерывных регистраторов флуоресценции хлорофилла и численности фито- и зоопланктона,

с другой, — с растущей необходимостью оценить роль и экологическую значимость пространственных неоднородностей различного масштаба в функционировании морских экосистем.

Со времени становления концепции «пятнистости» распределения планктона изучение ее на уровне микрораспределения [5, 8] и других уровнях масштабности [6, 7] происходило изолированно. Лишь в последние годы в ряде теоретических работ [9, 10] была показана необходимость анализа характеристик пространственно-временной изменчивости распределения планктона на различных уровнях масштабности в рамках единой проблемы. Следующим шагом на пути оптимизации исследований в данной области является разработка единой методологии исследований пространственно-временной изменчивости в распределении планктона на различных уровнях масштабности пространства и времени. Поэтому наряду с анализом полученного материала нами сделана попытка сформулировать некоторые методологические принципы исследований при решении следующих задач: 1) соотношение пространственной и временной изменчивости планктонных полей; 2) морфометрические характеристики пространственных неоднородностей; 3) выявление факторов, определяющих пространственно-временную изменчивость планктонных полей и моделирование неоднородностей поля; 4) выявление и диагностика механизмов, формирующих пространственно-временные неоднородности планктонных полей.

Метод сбора планктона. Основной материал собран на 1-м полигоне, имеющем размер 660×550 км. Пробы мезопланктона собирали из поверхностного слоя (2—6 м) с помощью центробежного насоса с частотой одна проба за 50 мин с пространственной дискретностью 10 миль (19 км). При этом судно двигалось по одному из разрезов полигона со скоростью 12 узлов. При сборе одной пробы фильтровали 10 м^3 воды.

Полигон был обследован за 14 сут (21.03 — 4.04.81 г.), в течение которых при движении судна производился непрерывный сбор проб. Общее количество их на полигоне составило 223. Непосредственно после сбора взвешиванием на торсионных весах $WT=1000$ определялась сырая масса пробы. Более детальная их обработка была выполнена на берегу по стандартной методике. Предшествующие работы с насосом данной конструкции показали возможность его использования для относительных оценок численности организмов мезопланктона в диапазоне размеров 0,3—5,0 мм. Доля организмов, поврежденных при сборе, по нашим данным, не превышала 15%.

Суточные изменения биомассы планктона в исследуемом слое. При обследовании полигонов большой площади неизбежным оказывается то, что пробы на разрезах полигона собраны в различное время суток. Часто (и в данном случае) это является существенной помехой при оценке горизонтальной неоднородности распределения планктона в связи с искажениями, которые вносятся в распределение суточными ритмами двигательной, пищевой и другими видами активностей особей. Для введения соответствующих поправок первоначально устанавливали характер суточных изменений биомассы планктона в исследуемом слое. Для этого все измеренные значения биомассы на полигоне разделили на 12 групп. В первой группе объединены наблюдения, выполненные за период от 0 до 2 ч, во второй — от 2 до 4 ч и т. д. Внутри каждой группы наблюдения приближенно считаются статистически однородными и производится их осреднение. В результате получили оценки среднего значения биомассы для каждого из двухчасовых периодов суток.

На рис. 1 показан график зависимости среднего значения биомассы от времени. Его можно интерпретировать как описание суточного хода биомассы, полученное с периодом сглаживания равным 2 ч. Суточный ход биомассы на полигоне характеризуется двумя четко выра-

женными максимумами на периодах 6—8 и 18—22 ч и двумя минимумами на периодах 2—4 и 10—14 ч. Размах колебаний биомассы составляет около 60% ее среднесуточной величины.

Особенности временного хода биомассы связаны, по-видимому, с вертикальными миграциями организмов. Так, вечерний максимум 18—20 ч обусловлен перемещением планктона к поверхности, а утренний максимум 6—8 ч связан с движением организмов вниз через исследуемый слой воды. Возможны и другие интерпретации кривой. Известны,

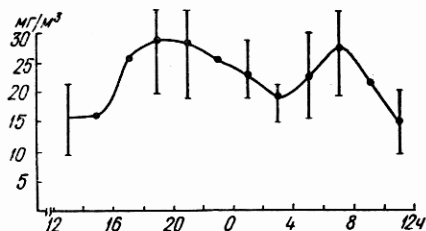


Рис. 1. Суточные изменения биомассы мезопланктона в исследуемом слое.

соотношения проведен двухфакторный дисперсионный анализ [4]. Он позволил установить степень влияния пространственной и временной переменных на распределение планктона. Оказалось, что дисперсия по фактору Б (временная изменчивость) значительно больше, чем дисперсия по фактору А (пространственная изменчивость). Это говорит о том, что временная изменчивость оказывает на распределение планктона большее влияние, чем пространственная. Следовательно, необходимо найти способы устранения помех, вносимых временными (суточными) циклами.

Морфометрическая характеристика пространственных неоднородностей. Зависимость, описывающая временной ход осредненного значения исследуемой величины, называется в математической статистике трендом [1]. Если рассматривать тренд в целом, то он характеризует общую тенденцию изменений биомассы в течение суток. Если же рассматривать значение тренда, характерное для определенного времени суток (например, периода 18—20 ч), то его можно интерпретировать как «нормальную» для этого времени величину биомассы. Отклонения биомассы от «нормы» на различных участках полигона вызываются физическими и экологическими процессами.

На основании сказанного можно приблизительно выделить временную и пространственную компоненты, обуславливающие общую изменчивость биомассы на полигоне, путем устранения тренда. С этой целью в каждой точке полигона из измеренной величины биомассы вычитается значение тренда для соответствующего времени суток. В результате получаем пространственное распределение флуктуаций (отклонений от «нормы») биомассы на полигоне.

На рис. 2 показан типичный фрагмент распределения отклонений биомассы по разрезу. Это распределение складывается из чередующихся зон с повышенными и пониженными (по отношению к «норме») величинами биомассы. Эти зоны наиболее естественно трактовать как пят-

например, случаи «челночных» перемещений зоопланктона у поверхности в ночное время [2]. Однако в аспекте поставленных задач важен сам факт существенного влияния миграций организмов на пространственную неоднородность их распределения в поверхностном слое. Отсюда следует необходимость разделения временной и пространственной составляющих.

Соотношение пространственной и временной изменчивости в распределении планктона. Для оценки этого

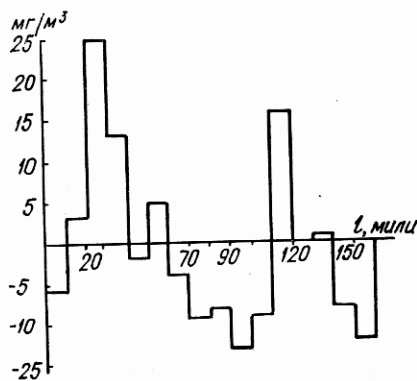


Рис. 2. Диаграмма отклонения биомассы мезопланктона от «нормы» (типичный фрагмент разреза). По оси абсцисс — расстояние от начала разреза.

на, а их распределение — как пятнистую структуру на полигоне. Таким образом, выделяются два типа пятен: p — пятна с повышенными значениями биомассы и m — пятна с пониженными ее значениями. Например, обращаясь к рис. 2, можно отметить на приведенном фрагменте разреза четыре p -пятна и три m -пятна.

Выявленное пространственное распределение отклонения биомассы позволяет описать основные морфометрические характеристики как пят-

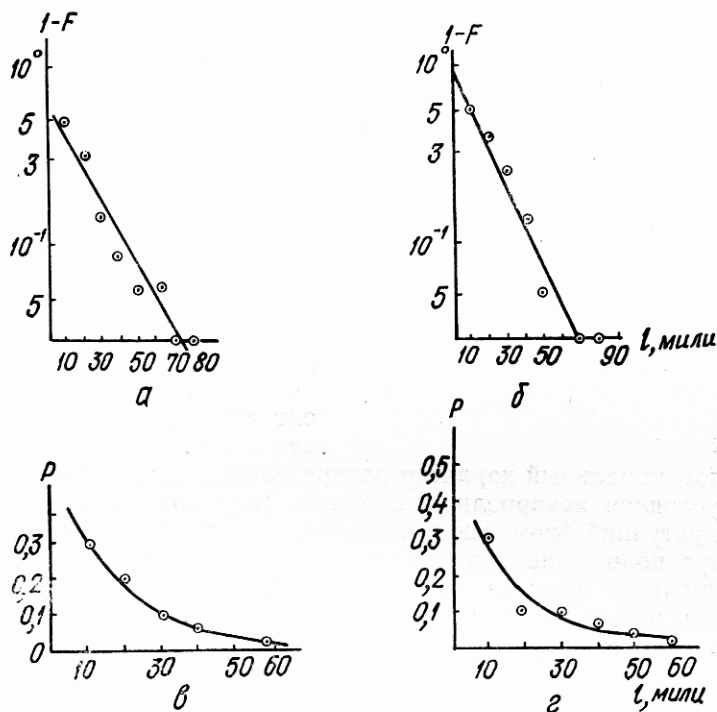


Рис. 3. Эмпирические функции распределения масштабов пятен (а, б) и функции плотности распределения масштабов пятен (в, г) на полигоне.

По оси абсцисс — масштаб пятен; а, в — p -пятна, $l_0=24$ мили; б, г — m -пятна, $l_0=19$ мили; $F=1 - \exp(-l/l_0)$.

нистой структуры на полигоне в целом, так и «среднего», типичного для данной структуры пятна. Такое описание может быть только статистическим, поскольку колебания величин биомассы, по существу, формируют случайное пространственное поле.

Морфометрия пятнистой структуры характеризуется функцией распределения масштабов пятен $F(l)$. Смысл этой функции следующий: величина $F(l)$ совпадает с вероятностью появления на полигоне пятен с масштабами, не превосходящими l . Следовательно, вероятность появления пятен с масштабами в диапазоне $l_1 < l < l_2$ совпадает с величиной $F(l_2) - F(l_1)$. Зная $F(l)$, можно определить и плотность вероятности распределения масштабов пятен $P(l)$, которая пропорциональна вероятности появления пятен с масштабами, близкими к l . Точное определение этой функции следующее: $P(l) = dF/dl$.

Эмпирическая оценка функции распределения строится следующим образом: за масштаб пятна принимается его длина вдоль разреза; величина $F(l)$ оценивается по формуле $F(l) = n(l)/N$, где N — общее число пятен, а $n(l)$ — количество пятен с масштабами, не превосходящими l . Эмпирические функции и функции плотности распределения масштабов для p -пятен и m -пятен показаны на рис. 3. Общей особенностью этих функций распределения является их экспоненциальный характер; с достаточной точностью они описываются соотношениями

$$F(l) = 1 - \exp\left(-\frac{l}{l_0}\right);$$

$$P(l) = \frac{1}{l_0} \exp\left(-\frac{l}{l_0}\right). \quad (1)$$

Здесь l — масштаб пятна согласно выбранному шагу его ранжирования; l_0 — характерный масштаб, являющийся единственным параметром распределения.

После оценки l_0 описание морфометрии пятна среднего масштаба принимает вид, указанный в табл. 1. Некоторые характеристики требуют пояснений. Так медиана (Me) показывает, что с одинаковой вероятностью средний масштаб пятна больше или меньше ее указанного значения. Квантиль 90%-ного распределения ($K_{v-90\%}$) показывает, что с вероятностью не менее 90% масштаб пятна не превышает указанного. Среднеквадратичное отклонение равно средней величине. Отсюда коэффициент вариации масштаба (V) равен 100%.

Таблица 1. Статистические характеристики пятен зоопланктона

Тип пятна	Характеристики, мили				
	l_0	Me	$K_{v-90\%}$	σ	$V, \%$
<i>p</i> -Пятна	24	17	55	24	100
<i>m</i> -Пятна	19	13	44	19	100

Экспоненциальный характер распределения масштабов пятен мог бы быть обусловлен некоррелированностью (или слабой коррелированностью) флуктуаций биомассы в областях с масштабами 10 миль. Однако такое предположение противоречит изложенным ниже результатам корреляционного анализа поля биомассы. Таким образом, указанный факт в настоящее время не имеет интерпретации. Это главным образом связано с тем, что не ясен диапазон масштабов, для которого экспоненциальное распределение справедливо, и необходимы измерения с меньшим разрешающим масштабом (видимо, порядка 1 мили или менее).

Следует отметить, что согласно соотношению (1) статистическая структура пятнистости в диапазоне масштабов свыше 10 миль определяется средним масштабом пятна. Вряд ли это распространяется на значительно меньшие масштабы явлений, где большую роль играют уже не фоновые, а локальные характеристики среды, преимущественно экологического происхождения.

Выявление факторов, определяющих пространственно-временную изменчивость поля. Моделирование пространственной неоднородности поля. Ряд важных особенностей пространственного распределения биомассы выявляется с использованием корреляционного анализа.

Для описания полученных результатов нам понадобятся некоторые обозначения. При обработке данных каждый разрез делится на несколько пространственных областей масштаба 10 миль (минимальный разрешающий масштаб измерений), к которым и относят результаты отдельных измерений биомассы. Эти области нумеруются вдоль разреза и далее обозначаются $O_1, O_2, \dots, O_n$, где n — полное число наблюдений на разрезе. Величина отклонения биомассы от «нормы» в области O_k обозначается B_k .

Предпосылкой корреляционного анализа является предположение о пространственной однородности поля флуктуаций биомассы (т. е. предполагается, что различные статистические характеристики поля вдоль разреза не меняются). Анализ данных показал, что после устранения тренда такое предположение вполне приемлемо.

Основной этап анализа — построение пространственной корреляционной функции $R(k\Delta l)$ с использованием соотношения

$$R(k\Delta l) = \frac{1}{n_s} \sum B_s B_{s+k}, \quad (2)$$

где Δl — разрешающий масштаб наблюдений.

Таким образом, $R(k\Delta l)$ есть функция расстояния $k\Delta l$ между областями. Каждое значение $R(k\Delta l)$ пропорционально коэффициенту корреляции между величинами отклонений биомассы в области 10-мильных масштабов и величинами отклонений в такой же области, расположенной на расстоянии $k\Delta l$. Ковариационные функции, построенные для разрезов 4—8°, показаны на рис. 4.

Для корреляционной функции характерно быстрое убывание с ростом расстояния $k\Delta l$. Это подтверждает высказанное выше предположение о

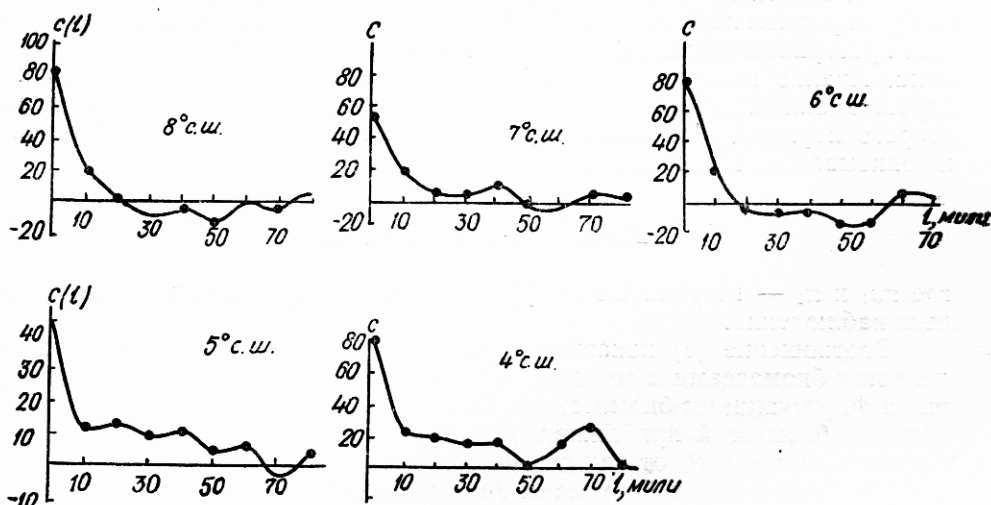


Рис. 4. Автоковариационные функции распределения биомассы мезопланктона на широтных разрезах полигона.

По оси абсцисс — расстояние от начальной точки отсчета, по оси ординат — ковариация.

пространственной статистической однородности поля флуктуаций биомассы.

Расстояние, на котором корреляции убывают на порядок по сравнению с начальным значением R_0 , называется радиусом корреляции. В пределах пространственной области масштаба, близкого к радиусу корреляции, значения отклонений положительно коррелированы, т. е. биомасса изменяется единообразно: если она возрастает на каком-то участке, то возрастает и во всей области и т. д. Следовательно, если под «пятном» понимать пространственную область, заполненную биомассой, изменяющейся как единое целое, то радиус корреляции указывает масштаб типичного для данной пятнистой структуры пятна.

Для ковариационных функций, показанных на рис. 4, радиусы корреляции близки к 20 милям. Сопоставляя эту величину с характерными масштабами пятен, рассчитанными по эмпирическим функциям распределения (см. табл. 1), видим, что они практически одинаковы. Это свидетельствует о том, что определение «пятна» как зоны повышенных или пониженных значений биомассы и его определения как массы планктона, изменяющейся как единое целое, согласуются между собой.

Из рисунков следует, что различаются два типа ковариационных функций. Это дает возможность выделить два типа колебательных процессов на периферии пятна. Для процессов первого типа (разрезы 4, 5, 7°) биомасса в периферийной зоне изменяется в том же направлении, что и в самом пятне. В процессах второго типа (разрезы 6, 8°) изменения биомассы в пятне и на его периферии идут в противоположных на-

правлениях. Характер связи между процессами в пятне и в периферийной зоне определяется соотношением между интенсивностью динамических процессов (диффузии и переноса) и процессов экологического плана, определяющих прирост и убыль биомассы в масштабах менее 10 миль. Самый важный результат корреляционного анализа состоит в том, что наблюдаемое распределение биомассы не может быть интерпретировано как результат наложения некоррелированных локальных флуктуаций биомассы в областях O_k . Действительно, подобное предположение не подтверждается видом полученных корреляционных функций. Отсюда следует, что в формировании поля биомассы большую роль играют процессы горизонтального обмена между локальными областями разреза O_k .

Для ответа на вопрос о том, какие факторы формируют наблюдаемое распределение биомассы вследствие ее локальных флуктуаций в малых пространственных областях, строится линейная модель процесса обмена. Анализ ковариационных функций показывает, что достаточно хорошее описание процесса может быть получено на основе модели второго порядка. Механизм формирования поля биомассы приближенно описывается соотношением

$$B_k = \pi_{-1} B_{k+1} + \pi_1 B_{k-1} + a_k, \quad (3)$$

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

Соотношение (3) показывает, что биомасса B_k в области O_k определяется биомассами в соседних областях O_{k+1} и O_{k-1} , а также локальными флуктуациями биомассы в области O_k . Процессы горизонтального обмена биомассой приближенно описываются следующим образом: вклад в биомассу B_k от каждой из областей O_{k+1} , O_{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. Область O_k обменивается биомассой только с соседними областями. Это значит, что модель (3) — модель второго порядка.

Флуктуации a_k в различных областях считаются некоррелированными, поскольку они обусловлены процессами не обменного характера и малого масштаба (меньшего, чем масштаб области O_k). Это может быть рождаемость, смертность, выедание, прирост биомассы в слое за счет вертикальных миграций и др.

С использованием ковариационных функций получены первичные эмпирические оценки коэффициентов π_{-1} и π_1 . Их величины приведены в табл. 2.

Для всех исследованных разрезов полученные значения коэффициентов обмена π_{-1} и π_1 позволяют привести соотношения (3) к следующему виду (диффузионной форме):

$$K(B_{k+1} - 2B_k + B_{k-1}) - \frac{U(B_{k+1} - B_{k-1})}{2} + \lambda B_k + a_k = 0. \quad (4)$$

Это соотношение по форме совпадает с уравнением баланса массы неконсервативной примеси в море.

Величины K , U и λ можно понимать как безразмерные коэффициенты диффузии, переноса и производства биомассы. По данным K и U можно оценить число Шмидта $Sh = U/K$, характеризующее соотношение вкладов от переноса и диффузии в процессе распространения примеси в море (табл. 3). Полученные оценки вполне согласуются по порядку величин со значениями Sh , характерными для океанических областей при масштабах явлений порядка десятков миль. Сказанное дает основание интерпретировать (4) как безразмерную форму уравнения морской турбулентной диффузии неконсервативной примеси. Первый член уравне-

ния описывает процесс диффузии, второй — адвективный перенос, третий — прирост биомассы, где в интегрированном виде представлены процессы рождаемости, смертности, выедания, локального роста или уменьшения за счет миграций и т. д. Во всех случаях константа роста

Таблица 2. Эмпирические оценки коэффициентов на широтных разрезах

Разрез, град. с.ш.	κ_{-1}	κ_1
8	0,19	5,81
7	0,09	2,75
6	0,37	3,07
5	-0,22	5,53
4	-0,16	4,40

Таблица 3. Эмпирические оценки коэффициентов на широтных разрезах

Разрез, град. с. ш.	K	U	λ	Sh	G
8	3,00	5,62	5,00	1,87	0,43
7	1,42	2,66	1,84	1,86	0,37
6	1,72	2,70	2,44	1,58	0,31
5	2,65	5,75	4,31	2,16	0,35
4	2,12	4,56	3,24	2,15	0,37

λ положительна, что свидетельствует о превосходстве прироста биомассы над ее естественной убылью.

Оценки безразмерного параметра $G = K\lambda/U^2$ характеризуют относительные значения эффектов диффузии и прироста биомассы по сравнению с эффектом адвективного переноса. Параметры Sh и G в совокупности определяют все основные характеристики процесса, описываемого соотношением (4). В то же время они мало меняются от разреза к разрезу (табл. 3). 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. Подчеркнем, что указанный вывод обоснован для разрешающего масштаба наблюдений не менее 10 миль.

Выявление и диагностика механизмов, формирующих пространственно-временные неоднородности планктонных полей. Установление факторов, определяющих пространственную структуру поля биомассы, и эмпирическая оценка коэффициентов в уравнении поля биомассы (1) позволяют выявить механизм формирования этого поля. Для его интерпретации обратимся к функциям отклика [1], которые рассчитаны для каждого из разрезов. В данном случае функция отклика описывает распределение биомассы по разрезу, соответствующее следующей ситуации: в одной из областей O_k происходит локальная флуктуация a_k , а в остальных областях значения флуктуаций равны нулю. Данные о функциях отклика показаны на рис. 5. Как видим, влияние флуктуаций в области O_k прослеживается на расстоянии около 30 миль в определенном направлении — направлении основного адвективного переноса вдоль разреза. Отмечается наличие двух типов функций отклика, соответствующих двум типам корреляционных функций, описанным выше.

Теперь механизм формирования поля биомассы представляется следующим образом. В каждой из областей O_k происходят локальные флуктуации биомассы a_k . Каждая флуктуация определяет распределение биомассы, описываемое с помощью функции отклика. Наложение этих распределений приводит к формированию наблюдаемого поля биомассы.

Процесс наложения хорошо иллюстрируется показанными на рис. 5 передаточными функциями. Передаточная функция описывает вклад в биомассу B_k в области O_k , обусловленный локальными флуктуациями в других областях на различных удалениях от O_k .

Для всех разрезов эмпирические оценки параметров κ_{-1} и κ_1 приводят к выводу о том, что величины B_k и a_k некоррелированы. Однако предположение о независимости биомассы B_k в области O_k от локальных флуктуаций биомассы в этой же области, очевидно, неверно (B_k коррелирована с биомассами в соседних областях).

Учитывая, что коэффициент корреляции отражает меру линейной связи случайных величин, приходим к следующему выводу: величины B_k и a_k зависимы, а связь между ними нелинейна. Установленный факт является не общим свойством модели (4), а следствием эмпирических оценок π_{-1} , π_1 . Известно, что нелинейность связей — характерная черта экологических (в частности, трофодинамических) процессов [3]. Следовательно, уже в масштабах порядка 10 миль такие процессы могут иг-

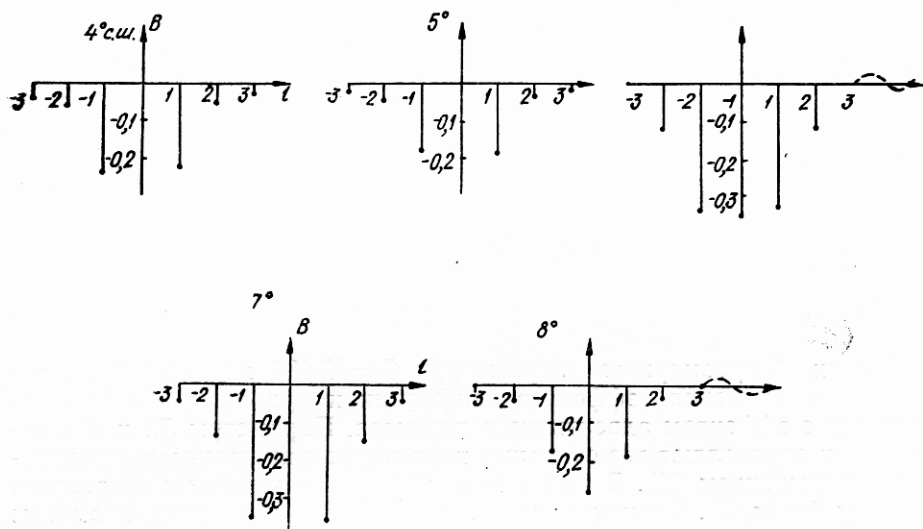


Рис. 5. Функции отклика распространения флуктуации биомассы мезопланктона по разрезам полигона (правая часть графиков) и соответствующие им передаточные функции распространения флуктуаций (левая часть графиков).

По оси абсцисс — расстояние (в десятках миль) от рассматриваемой пространственной области.

рать значительную роль в формировании пространственного распределения биомассы планктона.

Изложенные методы анализа данных по пространственному распределению биомассы мезопланктона позволяют решить следующие задачи: 1) оценка соотношения пространственной и временной изменчивости в распределении планктона (дисперсионный анализ); 2) оценка временной изменчивости биомассы в исследуемом слое и пространственной неоднородности ее распределения (выделение и устранение тренда); 3) оценка морфометрических характеристик пространственной неоднородности распределения планктона (построение полигонов частот, эмпирических функций распределения и определение средних масштабов неоднородностей); 4) описание типичных «пятен» на исследуемой акватории (корреляционный анализ); 5) выявление факторов, определяющих неоднородность поля биомассы (построение адаптивной модели горизонтального обмена биомассы); 6) выявление механизмов, формирующих пространственную неоднородность поля биомассы мезопланктона (построение диффузионных форм уравнений).

Распределение биомассы и формирующих его процессов в целом описано, однако задача оценки роли статистической структуры поля биомассы (в частности, его неоднородности) в функционировании морских экосистем еще не решена. Перспективы ее решения связаны с системным подходом. На основе имеющихся данных можно выделить следующие три его аспекта.

1. Формирование поля биомассы — процесс физико-экологический. Для его изучения необходимо использовать методы гидробиологического исследования распределения биомассы, «поднятые» до возможностей методов, применяющихся при изучении физических полей океана, и применяемые одновременно с ними.

2. В оценках экологической значимости пятнистости первостепенное значение имеет анализ статистической структуры поля биомассы. Пятнистость является одним из ее аспектов. Примером этого может быть обсуждавшаяся связь распределения биомассы с диффузией и адвективным переносом, установленная по результатам корреляционного анализа.

3. К анализу экологического значения статистической структуры поля биомассы следует приступать с позиций экосистемного подхода, где биомасса является одной из характеристик структуры. В связи с этим необходим совместный анализ распределения биомассы на различных трофических уровнях экосистемы.

Из представленных материалов можно сделать также ряд методологических выводов по планированию полевых исследований распределения планктона. Основываясь на предложенной методологии анализа материала, можно показать, какой должна быть пространственная дискретность сбора проб мезопланктона, если необходимо выявить неоднородности, основанные на различных механизмах. При изучении неоднородности распределения, в основе которой лежат трофо-экологические механизмы, пространственная дискретность сбора проб должна быть не менее 1 мили. Если целью изучения являются неоднородности, в основе которых лежат механизмы диффузии, адвекции и прироста биомассы, дискретность измерений может выбираться в диапазоне от единиц до десятков миль.

Если пространственная дискретность измерений заранее фиксирована (например, в связи с возможностями метода), можно определить, какого масштаба должна быть обследуемая акватория. Можно решить и обратную задачу: какой должна быть пространственная дискретность сбора проб, если фиксирован масштаб обследуемой акватории. Такое планирование заранее гарантирует возможность биологического анализа данных на статистической основе.

Конкретизировано понятие гидрологического фона. При исследовании распределения планктона всегда стоит вопрос, какие гидрологические параметры нужно измерять при этом. Оказывается, что при интерпретации неоднородностей распределения биомассы мезопланктона в первую очередь необходимы оценки интенсивности турбулентных процессов (в частности, коэффициентов диффузии) и осредненных характеристик течений в исследуемом слое. Из диагностики ковариационных функций следует, что именно эти процессы — диффузия и адвекция — лежат в основе абиотических механизмов формирования неоднородности поля на данном уровне масштабности.

Морфометрические характеристики неоднородности распределения показывают, насколько обоснованным будет построение карт пространственного распределения биомассы планктона. Если масштабы неоднородностей меньше, чем расстояния между станциями полигона, где производят измерения, построение карт распределения по первичным данным некорректно. Требуется использование дополнительных методов анализа, например метода оптимального интерполирования, позволяющего увеличивать степень регулярности сетки измерений.

Приведенные результаты показывают, что при исследовании неоднородности распределения планктона на акваториях, которые в целом однородны по основным гидрологическим и биологическим характеристикам, гораздо информативнее и экономичнее исследовать распределение не по регулярным сеткам станций, т. е. не полигонам, а на многократно повторяемом в пределах однородной области разрезе. Из анализа ковариационных функций следует, что неоднородность распределения планктона на разрезах, отстоящих друг от друга на сотни миль, определялась одними и теми же факторами и механизмами. Многократное непрерывное обследование одного разреза даст возможность строить пространственно-временные корреляционные функции, т. е. оценить продолжительность существования пятен различного масштаба, а значит,

подойти в целом к решению основной задачи — оценке экологической значимости пятнистости.

При изучении неоднородности пространственного распределения планктона, по-видимому, следует оставить попытки его анализа по картам распределения средних величин. Этот параметр при решении данной проблемы мало информативен. Результаты, обсуждавшиеся выше, а также иностранные публикации по этой проблеме за последние 5 лет показывают, что изучение неоднородностей необходимо вести на уровне анализа статистических структурных элементов поля, поскольку они имеют конкретный биологический смысл.

Выводы. 1. В первом приближении в исследованном диапазоне масштабов распределение биомассы мезопланктона можно представить как случайное пространственное поле. 2. При вычтенном тренде распределение биомассы имеет сложную пятнистую структуру. Количество пятен на полигоне достигает нескольких десятков. 3. Распределение масштабов пятен имеет экспоненциальный характер. Средний масштаб пятен — порядка 20 миль. Пятна масштабов более 50 миль практически не встречаются. 4. В пределах полигона поле биомассы мезопланктона статистически однородно. 5. В пространственных областях масштаба, близкого к 20 милям, биомасса изменяется как единое целое. 6. Пространственная неоднородность поля мезопланктона данного масштаба — результат взаимодействия следующих процессов: а) горизонтальной турбулентной диффузии в масштабах порядка 10 миль; б) мезомасштабного адвективного переноса; в) прироста биомассы (где в результирующем виде представлены процессы рождаемости, смертности, эмиграции и иммиграции); г) локальных флуктуаций биомассы. 7. Разработана методика выделения и количественной оценки этих процессов.

Авторы считают своим долгом выразить глубокую признательность Т. А. Мельник, П. В. Щербатенко за помощь в обработке проб, П. В. Евстигнееву за помощь в их сборе.

1. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов: Прогноз и упр. — М.: Мир, 1974. — Т. 1—2.
2. К вопросу о вертикальных миграциях копепод в Черном и Эгейском морях / Е. В. Павлова, С. Г. Африкова, А. А. Шершнев, Д. Е. Левашов. — В кн.: Распределение и поведение морского планктона в связи с микроструктурой вод. Киев: Наук. думка, 1977, с. 28—45.
3. Уильямсон М. Анализ биологических популяций. — М.: Мир, 1975. — 271 с.
4. Урбах В. Ю. Биометрические методы. — М.: Наука, 1964. — 415 с.
5. Cassie R. M. Microdistribution of plankton. — *Oceanogr. mar. biol. Ann. Rev.*, 1963, 1, N 1, p. 223—252.
6. Colebrook J. M. Continuous plankton record methods of analysis, 1950—1959. — *Bull. Mar. Ecol.*, 1960, 5, N 1, p. 51—64.
7. Cushing D. H., Tugate D. S. Studies on a Calanus patch. 1. The identification of a Calanus patch. — *J. Mar. Biol. Assoc. U. K.*, 1963, 43, N 2, p. 327—337.
8. Fasham M. J. R., Angel M. V., Roe H. S. J. An investigation of the spatial pattern of zooplankton using the Longhurst — Hardy plankton recorder. — *J. Exp. Mar. Biol. und Ecol.*, 1974, 16, N 1, p. 93—112.
9. Haury L., McGowan J. A., Wiede P. H. Patterns and processes in the time — space scales of plankton distribution. — In: Spatial pattern plankton community: Proc. NATO conf. mar. biol., Erice, 1977. New York; London, 1978, p. 277—327.
10. Steele J. H. Some comments on plankton patches. — *Ibid.*, p. 1—20.

Ин-т биологии юж. морей
им. А. О. Ковалевского АН УССР,
Севастополь

Получено 27. 12. 82

**TIME-SPATIAL STRUCTURE
OF THE MESOPLANKTON FIELD
IN THE SURFACE LAYER
OF THE TROPICAL ZONE
IN THE INDIAN OCEAN**

Summary

A procedure is developed for isolation and quantitative estimation of spatial heterogeneity of phytoplankton distribution in the surface layer of waters. It is shown that the spot scale distribution is of exponential character with the average scale of 20 miles. A set of factors determining spatial heterogeneity of the zooplankton field is analyzed from the empirical data.

УДК 577.3.475

С. А. ПИОНТКОВСКИЙ, Г. А. ГОЛЬДБЕРГ

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ
СТРУКТУРА ПОЛЯ МЕЗОПЛАНКТОНА
СЛОЯ 0—150 м ПО ДАННЫМ ТОТАЛЬНЫХ ЛОВОВ**

Целью работ по крупномасштабному районированию биомассы зоопланктона в период исследований экспедиций 8-го рейса НИС «Профессор Водяницкий» в Индийском океане по межведомственной программе «КИПРИО» было выявление пространственной неоднородности в распределении биомассы зоопланктона в связи с синоптической изменчивостью водных масс океана.

Сбор данных проб производили на 59 станциях I полигона (размер 660×550 км) и 47 станциях II полигона (1540×440 км). Для тотальных обловов слоя 0—150 м использовали сеть ДЖОМ (80/113 см) с капроновым ситом № 46. Непосредственно после получения пробы определяли ее сырую массу с помощью волюминометров Яшнова. Для некоторых проб выполнена их количественная детальная обработка по стандартной методике [4].

При анализе первичных данных исходили из методологических принципов, излагавшихся применительно к пространственной неоднородности поля мезопланктона поверхностного слоя [2].

Временная (суточная) изменчивость в распределении биомассы. В связи с тем что сбор проб на станциях полигона выполнялся в разное время суток, при анализе пространственного распределения планктона необходимо оценить вариабельность, вносимую временной переменной. Для этого выявим характер суточных изменений биомассы в исследуемом слое (рис. 1). По типу кривых на рисунке можно предположить, что максимумы биомассы в ночное время образуются за счет вертикальных миграций организмов из более глубоких слоев в исследуемый. Однако в целом размах варьирования невелик и составляет около 40% средней величины биомассы для акватории I полигона и 34% — для II. Это, вероятно, говорит о том, что большая часть организмов не перемещается за пределы исследуемого слоя.

Размерный состав мезопланктона. Обработка некоторых проб показала, что на долю копепоид различных таксономических групп приходится около 90% суммарной численности всех организмов в слое 0—150 м.

Расчеты функций плотности распределения разноразмерных особей в пределах таксономической группы (рис. 2) свидетельствуют о том, что это распределение близко к экспоненциальному. Основу численности копепоид образуют особи (преимущественно копеподитные стадии) размером 0,6—0,8 мм. Используя зависимости, связывающие массу тела и линейный размер особей [5, 6], можно приближенно оце-