

МОРСКОЙ ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ АН УССР
ОКЕАН-КОСМОС: ЭКСПЕРИМЕНТ АТЛАНТИКА-89

№ 4496 - В90

УДК 577.3.475

ПИОНТКОВСКИЙ С.А., БАЕВ С.А.

ВЗАИМОСВЯЗЬ БИОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ
ПОЛЕЙ В ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ТРОПИЧЕСКОЙ АТЛАНТИКИ

Характерным для исследований биологической и гидрофизической структур океана в последнее десятилетие стало интенсивное внедрение дистанционных методов его зондирования. Сегодня очевидно, что через разработку этих методов лежит путь к глобальному комплексному мониторингу Мирового океана. Мониторинг его биопродуктивности – одна из центральных проблем этого комплекса.

Как известно, биопродуктивные процессы в океане во многом определяются динамической активностью вод. По своей природе эта динамика многомасштабна, что требует выявления основных экологически значимых диапазонов ее пространственно-временной шкалы.

Очевидно также, что характер связей биологических и морфологических процессов существенно зависит от их пространственно-временных масштабов, поэтому необходимо установить основные закономерности этих связей на каждом из них.

В каскаде пространственно-временных масштабов значительный вклад в формирование изменчивости гидрофизических и биологических полей океана вносят синоптические процессы. За последние годы они стали объектом комплексного изучения ряда экспедиций (4,5,11,12,14). Наши исследования продолжают это направление и посвящены качественным и количественным оценкам взаимосвязи биологических и гидрофизических полей в поверхностных слоях восточной тропической Атлантики на масштабах сотен километров.

Материал и методика

Измерения были выполнены в октябре-ноябре 1989 года (40 рейс НИС "Академик Вернадский") на двух полигонах, образующих регулярную сетку из 48 и 88 станций со стороны 6-12° с.ш., 16-26° в.д. (второй) и 2-12° с.ш., 17-25° в.д. (первый). Фактически, дважды была обследована одна акватория. Пространственная дискретность измерений в сетке составляла 1°.

При анализе данных были использованы следующие параметры:

- температура и соленость в поверхностном слое;
- максимальный градиент температуры в слое термоклина;
- геострофическая скорость течений в поверхностном слое;
- толщина верхнего квазиоднородного слоя;
- биомасса фитопланктона (хлорофилла "а") в поверхностном слое;
- биомасса фитопланктона (хлорофилла "а") в интегральном (0-150м) слое;
- биомасса сетного зоопланктона в поверхностном слое;
- биомасса сетного зоопланктона в интегральном (0-30м)

слое (указана средняя для квазиоднородного слоя величина);

-биомасса летучих рыб в поверхностном слое;

-биомасса кальмаров в поверхностном слое;

Измерения температуры и солености выполнены с помощью зондирующего комплекса МГИ-4102. Дискретность измерений по вертикали 5 метров.

Методика измерений концентрации хлорофилла "а" в батометрических пробах изложена в статье О.А.Юнева (см. наст. сб.), данные которого мы привлекали для анализа связей гидрофизических и гидробиологических параметров.

Оценки биомассы зоопланктона получены по материалам сетных ловов (сеть БСД, капроновое сито с ячейей 0,22мм) и последующего определения массы планктона взвешиванием на торсионных весах "WT" после обсушки.

Оценки численности летучих рыб и кальмаров с последующим расчетом биомассы получены на основе их визуального учета по методикам, принятым в ИНБЮМ АН УССР (3).

Измерения концентрации хлорофилла, зоопланктона и летучих рыб выполнены в дневное время, кальмаров - на ночных дрейфовых станциях. Измерения гидрофизических параметров выполнены на всех станциях полигонов.

Статистическим оценкам взаимосвязей предшествовала проверка нормальности распределения для переменных. Расчеты коэффициентов детерминации выполнены для логарифмированных массивов измерений. Им предшествовал анализ значимых связей между переменными и построение матрицы коэффициентов ранговой корреляции Спирмена.

Результаты

Термогалинная структура вод верхнего слоя восточной части Тропической Атлантики в значительной степени связана с крупномасштабной циркуляцией (Северным и Южным пассатными течениями, Межпассатным противотечением) и формируется при взаимодействии следующих поверхностных водных масс: Северной и Южной тропических и Экваториальной.

На распределение характеристик верхнего слоя океана немаловажное влияние оказывает также распределяющее действие Внутритропической зоны конвергенции. Северное пассатное течение и Межпассатное противотечение в исследуемом районе образуют северную и южную периферии Тропического циклонического круговорота, северная граница которого проявляется в виде Северного тропического фронта.

Южное пассатное течение и Межпассатное противотечение представляют здесь восточную периферию Тропического антициклонического круговорота. Граница тропических круговоротов соответствует области Северного экваториального фронта.

Центральную часть полигона (5-10° с.ш.) в период исследований занимало Межпассатное противотечение, представляющее меандрирующий зонально ориентированный поток. Противотечение было сосредоточено, в основном, в верхнем слое 0-200 м (до 70% его расхода). Максимальные градиентные скорости (до 60 см с⁻¹) получены в подповерхностном слое на глубине 25-30 м.

Связь Межпассатного противотечения с Внутритропической зоной конвергенции обуславливает распределение поверхностных термогалинных характеристик с высокой температурой (выше

29°C) и низкой соленостью (до 34,5%), соответствующей экваториальной водной массе. На полигоне она имела форму языка, вытянутого вдоль Межпассатного противотечения.

Циркуляция вод северной части полигона определялась периферией Северного пассатного течения и южными перифериями двух синоптических вихревых образований антициклонического и циклонического типа. В поле термогалинных характеристик пассатным течениям соответствовала южная разновидность тропической водной массы, для которой отмечены высокие значения солености (выше 36%) и относительно низкая температура (менее 26°C), что указывает на преобладающее влияние восточной модификации этих вод.

Как северная, так и южная тропические водные массы отделены от экваториальных вод хорошо выраженными фронтальными зонами (соответственно Северным тропическим и Северным экваториальным фронтами).

Элементы взаимной пространственной структуры биологических и гидрофизических полей представляется целесообразным рассмотреть в той последовательности, которую образуют исследованные экологические группы организмов в размерной структуре эпипелагических сообществ.

В распределении биомассы фитопланктона (хлорофилла "а") максимумы биомассы в поверхностном и интегральном слоях связаны с циркуляцией вод и располагаются, в большинстве случаев, на периферии или в центре синоптических вихревых образований и меандрах Межпассатного противотечения. В этих максимумах (например, поверхностном слое) биомасса хлорофилла "а" по данным О.А. Юнева составляет 0,13-0,16 мг м⁻³ и вдвое превосходит характер-

ную для фоновых областей (т.е. за пределами вихрей и меандров).

В распределении биомассы зоопланктона в поверхностном и интегральном квазиоднородном слое его максимумы располагаются как на периферии синоптических вихрей и меандров, так и во фронтальных зонах (Северном тропическом и Северном экваториальном фронте). Величины биомассы в слое термоклина в этих динамически активных областях в 2-3 раза выше величин, характерных для прилегающих фоновых областей. Максимальное значение 391 мг м^{-3} отмечено в поверхностном слое в области Межпассатного противотечения.

Поскольку периферические области вихрей и меандров хорошо проявлялись в изменениях толщины верхнего квазиоднородного слоя и структуре термоклина, распределение биомассы зоопланктона, связанного с периферией, удобно представить в поле этих характеристик (рис. I). Видно, что максимумы биомассы зоопланктона, в 3-4 раза превосходящие в поверхностном слое фоновые величины, формируются в областях наименее заглубленного термоклина и сосредоточены в узком диапазоне изменчивости максимального вертикального температуры в термоклине $0,4 \text{ град. м}^{-1}$.

В распределении биомассы летучих рыб выделяются две обширные зоны максимумов: в северной (по результатам двух его съемок) и южной частях полигона. На остальной акватории величины биомассы относительно постоянны и низки. Биомасса летучих рыб в зонах максимумов достигает 450 (в южном) и 950 (в северном) кг км^{-2} , что в 5-10 раз выше ее величин в фоновых областях.

рыб в северной части фактически соответствует положению изогалины 35,6‰ и Северному тропическому фронту, разграничивающему относительно холодные воды Северного пассатного течения и распределенные теплые экваториальные воды, связанные с динамикой Межпассатного противотечения. Локализация зоны максимума в южной части соответствует положению изогалин Северного экваториального фронта.

Оценки регрессии между параметрами показывают, что в исследованном районе биомасса летучих рыб является функцией термогалинной структуры вод квазиоднородного слоя. Коэффициент детерминации в регрессионной модели этой связи ($B_r - S\%$) равен 0,8; т.е. 80% изменчивости биомассы летучих рыб может быть объяснено ее зависимостью от распределения солености в верхнем слое океана.

Наглядное представление о связи неоднородности пространственного распределения летучих рыб с термогалинной структурой дает рисунок 2, где распределение всех измеренных величин представлено в поле $T-S\%$ характеристик. Видно, что максимальные значения биомассы встречаются в широком диапазоне температуры, но очень узком диапазоне солености. Величины последней (на которые попадают повышенные значения биомассы) наблюдаются в Северном тропическом фронте и Северном экваториальном фронте.

Максимумы биомассы кальмаров (в основном *Sthenoteuthis pteropus*) были отмечены в северо-западной части исследованной акватории при первой ее съемке (617 кг км^{-2}) и юго-восточной части (при второй (490 кг км^{-2})).

Пространственное положение обоих максимумов биомассы соответствовало областям температурных минимумов в поверхностном слое. Между величиной биомассы кальмаров в этом слое и термической структурой вод существуют значимые линейные связи: отрицательная — с абсолютной величиной температуры и толщиной верхнего квазиоднородного слоя (оба коэффициента корреляции равны 0,6) и положительная — с величиной максимального градиента температуры в термоклине ($r=0,7$).

Эти связи показывают, что местами формирования зон максимумов биомассы кальмаров в исследованном районе являются области с минимальными значениями температуры в поверхностном слое и максимальными температурными градиентами в минимально заглубленном термоклине. На полигоне такие области были характерны для южной периферии Северного пассатного течения, в зоне Северного тропического фронта, где наблюдался подъем вод и северной периферии Южного пассатного течения, где располагался Северный экваториальный фронт и тоже наблюдался подъем вод.

Что же касается взаимной пространственной структуры биологических полей, то здесь следует отметить как элементы сходства, так и различия. Общим для биологических полей различной природы (фито, зоопланктона, микронектона) является формирование максимумов в областях климатических фронтальных зон. Различие же состоит в том, что в структуре полей фито и зоопланктона отмечались неоднородности, связанные с динамикой вод синоптического масштаба: максимумы биомассы фитопланктона охватывали центры и периферию вихрей, или меандров. Ма-

ксимумы биомассы зоопланктона в основном были локализованы на периферии этих динамических образований. Такая пространственная смещенность максимумов фито и зоопланктона обычно составляла около 100 км.

В структуре полей биомассы летучих рыб и кальмаров связей с синоптической динамикой гидрофизических процессов не обнаружено. В отличие от фито и зоопланктона, микронектон (летучие рыбы и кальмары) "реагирует" не столько на неоднородности циркуляции вод, сколько на крупномасштабные структурные неоднородности биотопа: фронтальные зоны климатического масштаба. Как отмечалось выше, максимумы биомассы и численности летучих рыб и кальмаров расположены в северной части полигона — на периферии Северного пассатного течения, в зоне Северного тропического фронта и на юге — на периферии Южного пассатного течения, в зоне Северного экваториального фронта.

В целом, увеличение концентрации организмов в данных фронтальных зонах (по отношению к фоновым) составляет: для биомассы фитопланктона (хлорофилла "а") — 2 раза, зоопланктона — 2–3 раза, летучих рыб 5–10 раз, кальмаров 5–10 раз.

От этих приблизительных оценок перейдем к другому характерному свойству взаимной структуры: возрастанию степени пространственной неоднородности биологических полей в последовательности, которую организмы образуют в размерном спектре пелагических сообществ океана.

Если мерой этой неоднородности в масштабах всего полигона принять коэффициент вариации биомассы, то его величина для логарифмированных переменных будет следующей: фитопланктон (хло-

рофилла "а") в интегральном слое 0-150м-7%, зоопланктон на поверхности и в интегральном квазиоднородном слое-14%, летучие рыбы-43%, кальмары-56%.

Обсуждение результатов

Влияние циркуляции вод на структуру планктонных полей хорошо известно. Исследования в тропической зоне и континентальных морях умеренной зоны показали приуроченность максимумов биомассы фитопланктона к центрам или периферии синоптических вихревых образований (1,7,8), что соответствует полученным нами данным. Степень смещенности максимума концентрации относительно центра вихря зависит от знака его вращения, который определяет формирование подъема вод либо в центре (циклонический вихрь), либо на периферии (антициклонический). Это отражается и на пространственном положении и развитии локальных максимумов биомассы и численности фитопланктона.

Другим значимым фактором является скорость этого подъема.

При малых скоростях (менее 1 м с^{-1}) максимум успевает развиться в центре циклонического вихря. При больших смещается адвекцией вод на периферию (13).

Максимумы концентрации зоопланктона как правило, отмечают на периферии синоптических вихрей (7,8), где формируются фронтальные зоны соответствующего пространственно-временного масштаба. Аналогичная ситуация зарегистрирована нами в восточной тропической Атлантике. Эти и другие исследования показывают, что на синоптическом масштабе динамика вод является определяющей в формировании горизонтальной пространственной структуры фито и зоопланктонных полей.

В отличие от планктонных организмов, пелагические нектонные (в частности, летучие рыбы и кальмары) способны активно перемещаться и выбирать толерантный диапазон гидрофизической изменчивости среды обитания. Спецификой исследованного района с этих позиций является сочетание контрастно выраженных динамических явлений как синоптического, так и климатического масштабов: существование вихревых образований и меандров течений в области между двумя климатическими фронтальными зонами.

Наибольшие градиенты гидрофизических параметров наблюдались в этих фронтальных зонах, которые и явились границами зон обилия летучих рыб и кальмаров. Вполне возможно, что в ситуациях, когда климатические фронты отсутствуют, экологическую значимость в регуляции пространственного распределения микронектона приобретают менее энергоактивные синоптические образования.

Например, Е.В.Грезе с соавторами (2) отмечают перемещение зон повышенной концентрации кальмаров и летучих рыб вслед за меандрами Межпассатного противотечения в западной тропической Атлантике. Причинные основы описанных связей авторы, к сожалению, не обсуждают.

Увеличение концентрации рыб и кальмаров в водах определенной термогалинной структуры может быть связано с экологией их репродуктивных циклов. Так, для некоторых видов рыб центральной восточной Атлантики известно, что температура воды регулирует степень зрелости гонад у самок. Поэтому рыбы "отслеживают" зоны с определенными величинами температур и их градиентов (10). Такое отслеживание зон происходит как по горизонтальной, так и по вертикальной составляющей пространства биотопа. Поэтому не-

рест рыб с разной температурной толерантностью происходит на разных глубинах (9).

У кальмаров *S. pteropus* температура воды в поверхностном слое является основным фактором в формировании половой структуры: в частности, численности половозрелых самок (3). Некоторые исследования также показывают, что топография термоклина может служить "индикатором" зон повышенной концентрации кальмаров этого вида (6).

Максимум биомассы кальмаров в северной части полигона фактически является южной периферией северо-восточной крупномасштабной продуктивной зоны крылорукого кальмара (*S. pteropus*), о чем можно судить по литературным данным для этого района (3).

Выводы

Для взаимной пространственной структуры биологических и гидрофизических полей восточной части тропической Атлантики характерна пространственная смещенность максимумов биомассы фитопланктона (хлорофилла "а"), зоопланктона и микронектона (летучих рыб и кальмаров) относительно друг друга.

Максимумы биомассы фито и зоопланктона приурочены к центрам или периферии синоптических вихрей и меандров течений. Максимумы биомассы микронектона отмечены на южной периферии Северного пассатного течения и северной периферии Южного пассатного течения и больше связаны не с циркуляцией вод, а с крупномасштабной термогалинной структурой и климатическими фронтальными зонами, как границами зон максимумов биомассы.

Пространственная горизонтальная неоднородность полей фито,

зоопланктона, летучих рыб и кальмаров на масштабах сотен километров возрастает в названной последовательности. Последняя представляет последовательность, которую эти группы организмов занимают в размерном спектре эпипелагических сообществ.

Литература

1. Берсенева Г.П., Крупаткина Д.К. Мезомасштабное распределение пигментов в планктоне Средиземного моря и их роль в поглощении света// Экология моря.-1984.-вып.16.-С.30-38.
2. Грезе Е.В., Овчаров О.П., Сизов А.А. Связь количественного распределения Атлантического крылорукого кальмара и летучих рыб с динамикой вод в северо-западной части тропической Атлантики// Комплексное изучение природы Атлантического океана: Тез.докл. 3 обл.конф., Калининград, 16-18 апр.1985г.-Калининград: Б.и.,1985.-С.70-72.
3. Зуев Г.В., Нигматулин Ч.М., Никольский В.Н. Нектонные океанические кальмары.-М.:Агропромиздат,1985.-224с.
4. Каменкович В.М., Кошляков М.Н., Монин А.С. Синоптические вихри в океане.-Л.:Гидрометеиздат,1982.-265с.
5. Коснырев В.К., Шапиро Н.Б. Синоптическая изменчивость северо-западной части Индийского океана.-Севастополь.:МГИ, Препринт,1981.-44с.
6. Локтионов Ю.А. Океанологические условия и мезомасштабное распределение крылорукого кальмара в восточной тропической Атлантике//4 Всесоюзная конференция по промысловым беспозвоночным: Тез.докл., Севастополь, апр.1986г.-Севастополь:Б.и.,1986.-Ч.1.-С.142.

7. Мельник Т.А., Щербатенко П.В. Изменение размерного состава зоопланктона и половой структуры популяций копепод в синоптическом циклоническом вихре в тропической Атлантике.- Севастополь, 1986.-16с.-Рукопись деп. в ВИНТИ, № 4745-В.
8. Мельник Т.А., Шмелева А.А., Пионтковский С.А. Пространственно-временная изменчивость планктонных полей в Алжиро-Прованском бассейне Средиземного моря в весенний период// Экология моря.-1987.-вып.25.-С.11-17.
9. Провоторова А.Н., Игнатъев А.С. О нересте ирландской скумбрии//Комплексные промыслово-океанографические исследования в Атлантическом океане.-Калининград, АтлантНИРО, 1985.-С.55-61.
10. Седлецкая В.А., Мыльников Н.И. Условия формирования нерестовых скоплений и выживания икринок европейской ставриды в центрально-восточной Атлантике//Комплексные промыслово-океанографические исследования в Атлантическом океане.- Калининград, АтлантНИРО, 1985.-С.50-55.
11. Экологические системы в активных динамических зонах Индийского океана.-К., Наукова думка, 1986.-200с.
12. Brandt S.B. Effects of a warm-core eddy on fish distribution in the Tasman Sea of east Australia//Mar.Ecol.Prog. Ser.-1981.-50.-P.19-33.
13. Cushing D.H. Upwelling and the production of fish//Adv. Mar.Biol.-1971.-9.-P.47-63.
14. Tranter D.J., Parker R.R., Cresswell G.R. Are warm-core eddies unproductive?//Nature.-1980.-284.-P.540-542.

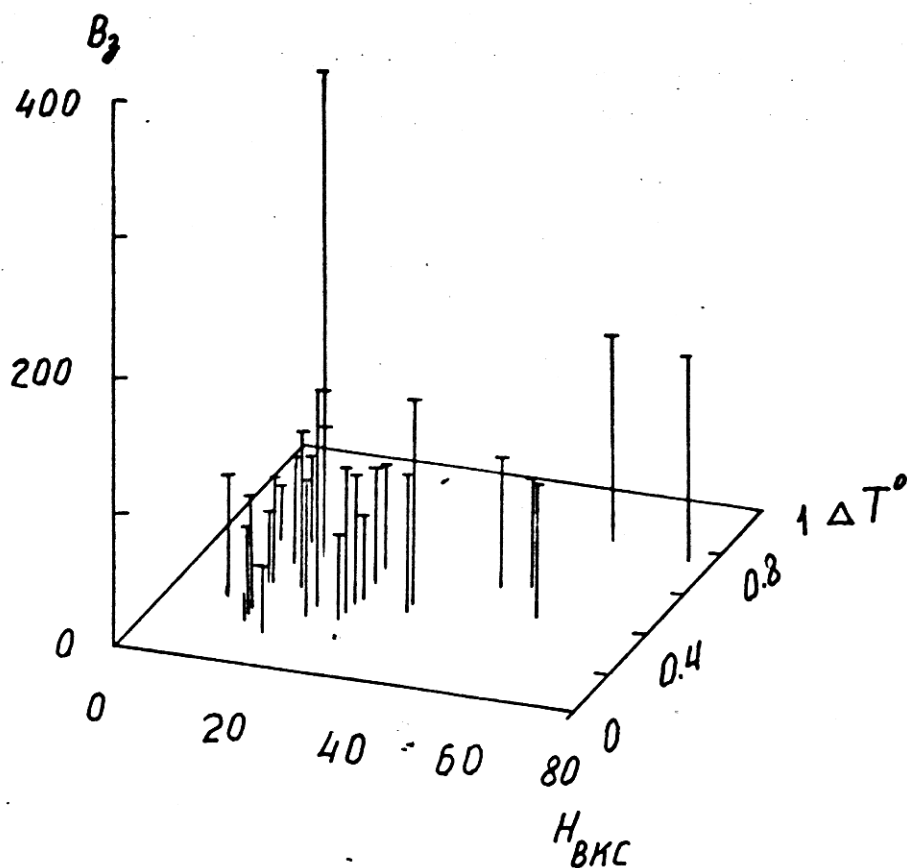


Рис.1 Распределение биомассы мезопланктона (B_3) на полигоне в зависимости от толщины верхнего квазиоднородного слоя (H_{BKC}) и максимального градиента температуры в термоклине (ΔT°).
 B_3 — мг м^{-3} , квазиоднородный слой;
 H_{BKC} — м; ΔT° — градус м^{-1} .

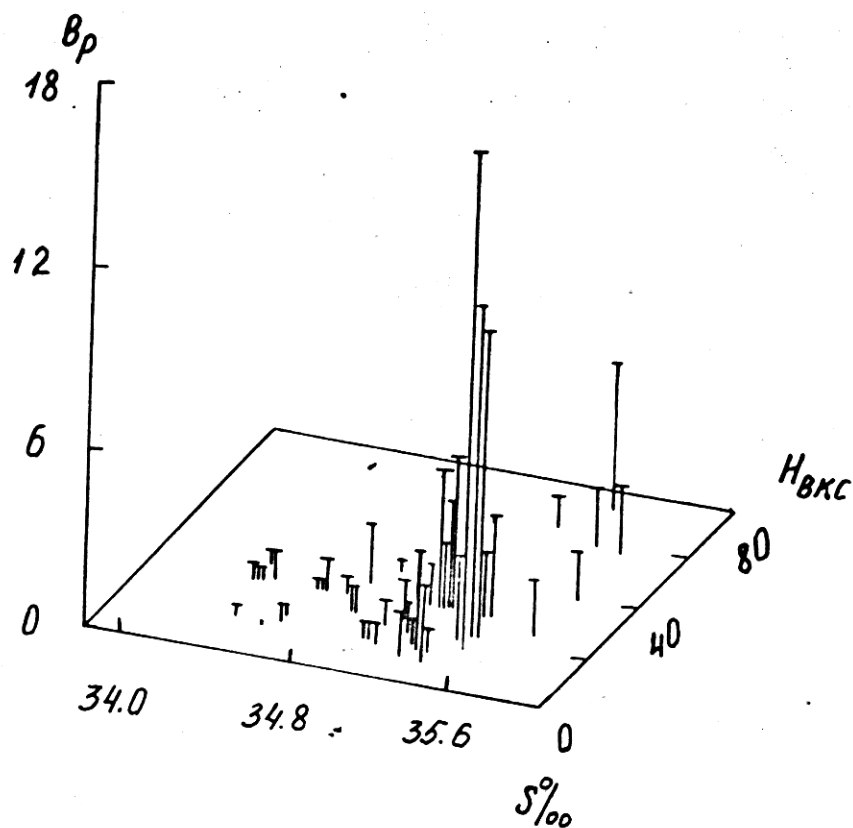


Рис.2 распределение биомассы летучих рыб (B_p) на полигоне в зависимости от толщины верхнего квазиоднородного слоя ($H_{вкс}$) и солености ($S\text{‰}$) в поверхностном слое.

B_p — мг м^{-3} , поверхностный слой; $H_{вкс}$ — м.