

О системном анализе природных явлений в Северной Атлантике и прилегающих полярных морях/[М. А. Богданов, А. А. Елизаров, С. И. Потайчук, Е. В. Солянкин]. — Труды ВНИРО, 1976, т. 112, с. 7—15.

Природные системы атлантико-евразийского сектора северного полушария и прогнозы абиотических условий воспроизводства/[М. А. Богданов, А. А. Елизаров, С. И. Потайчук, Е. В. Солянкин]. Рыбное хозяйство, 1976, № 7, с. 32—34.

Погосян Х. П., Павловская А. А. Аномалии атмосферной циркуляции, приземного давления и температуры в связи с квазидвухлетней циклическостью. — Л.: Гидрометеоздат, 1977. — 79 с.

Покровская Т. В. Синоптико-климатологические и гелиогеофизические долгосрочные прогнозы погоды. — Л.: Гидрометеоздат, 1969. — 254 с.

Покровская Т. В. Солнечная активность и климат. — В кн.: Влияние солнечной активности на нижние слои земной атмосферы и связанные с этим явления в биосфере. 1971, с. 12—31.

Потайчук С. И. Некоторые результаты статистического анализа долгопериодной изменчивости температуры воды в Северной Атлантике. — Труды ВНИРО, 1972, т. 75, с. 125—134.

Солянкин Е. В. О закономерностях изменчивости океанологических показателей промысловой продуктивности (на примере Атлантической системы) и возможностях их использования в прогностических целях. — Труды ВНИРО, 1974, т. 98, с. 23—34.

Солянкин Е. В. О сверхдолгосрочном прогнозе некоторых фоновых характеристик абиотических условий воспроизводства (на примере Кольского разреза). — Труды ВНИРО, т. 112, 1976, с. 22—29.

Солянкин Е. В. К вопросу о детерминированных составляющих многолетних колебаний стока Волги. — Водные ресурсы, 1978, № 2, с. 74—82.

Шнитников А. В. Внутривековая изменчивость компонентов обидей увлажненности. — Л.: Наука, 1969. — 245 с.

## Cyclic fluctuations in certain indices of abiotic conditions of reproduction of fish in various natural systems of the North hemisphere

Solankin E. V.

### S U M M A R Y

Long-term fluctuations caused by cosmic-geophysical factors, long-term climatic fluctuations lasting, on the average, about 35 years and quasi-two-year cyclic fluctuations are analysed on the basis of long-term series of four hydrographic characteristics in various systems of the North hemisphere (the mean annual temperature in the 0—200 m layer on the Kola Meridian section, total number of icebergs brought out with the Labrador current to the south of 48°N, position of the Kuroshio axis to the south of Honshu and natural annual discharge of the Volga River).

It is shown that islated long-term harmonic curves may be a satisfactory basis for making superlong-term forecasts of hydrographic conditions in a certain natural system. Although the role of the quasi-two-year cycle in the variability of hydrographic characteristics is quite obvious, it cannot be taken into account in long-term forecasts because of the absence of any evident regularity in the shift of the range and frequency of the cycles.

УДК 551.463.1:574.55(261)

## ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПРОСТРАНСТВЕННУЮ НЕРАВНОМЕРНОСТЬ БИОПРОДУКТИВНОСТИ ВОД НА ПРИМЕРЕ АТЛАНТИЧЕСКОГО ОКЕАНА

Ю. Л. Демин, А. А. Елизаров, А. Д. Щербинин

Биопродукция в океанических водах распределена неравномерно: максимальные величины первичной продукции превышают 3 г С/сут, минимальные — около 0,05 г С/сут, т. е. производительность наиболее продуктивных вод на один-два порядка выше производительности наименее продуктивных (Steeman — Nielsen, 1958).

Еще больше контраст между богатыми и бедными водами по биомассе фитопланктона. В эвтрофных водах тропического пояса Мирового океана биомасса фитопланктона местами составляет  $1000 \text{ мг/м}^3$  и более, в олиготрофных — менее  $1 \text{ мг/м}^3$  (Семина, 1977).

На следующих звеньях трофической цепи картина не изменяется. Разрыв величиной в два-три порядка и более между экстремальными по продуктивности районами характерен для зоопланктона в целом и для кормового зоопланктона, промыслового нектона, бентоса.

В центральных частях планетарных антициклонических круговоротов, характеризующихся преимущественным опусканием вод, биомасса зоопланктона падает ниже  $10 \text{ мг/м}^3$  в среднем для верхнего стометрового слоя. В то же время в районах прибрежных апвеллингов у берегов Америки, Африки и Явы биомасса зоопланктона составляет  $200\text{—}500 \text{ мг/м}^3$  и может достигнуть гигантских величин — в несколько граммов и даже десятков граммов на  $1 \text{ м}^3$  (Виноградов, 1977).

Продукция нектона по тунцам в тропической области равна приблизительно  $0,05 \text{ т/км}^2$ , а по сельди Северного моря —  $2\text{—}2,5 \text{ т/км}^2$  (Марти, Мартинсен, 1969). Не меньшая неравномерность наблюдается в распределении объектов промысла одного вида: в пределах сравнительно ограниченных по площади районов уловы на единицу усилия могут изменяться от штучных до нескольких тонн и даже десятков тонн.

В масштабе больших океанических районов неравномерность проявляется, как правило, одинаково на всех экологических уровнях. В районах низкого уровня продуцирования органического вещества мала биомасса фито- и зоопланктона, нектона и бентоса. Районы максимального продуцирования, как правило, богаты всеми видами живых организмов.

Неравномерность распределения живой материи в Мировом океане зависит прежде всего от способности и возможности водорослей поверхностного слоя продуцировать органическое вещество путем фотосинтеза. Фотосинтез углевода связан с условиями внешней среды, неравномерность и неоднородность которых, по-видимому, и являются основой неравномерности биопродуктивности вод.

Как известно, фотосинтез обеспечивается воздействием на растение солнечного света и наличием растворенной в морской воде углекислоты и биогенных веществ, важнейшие из которых — минеральные и органические соединения азота, фосфора и кремния. Темп фотосинтеза зависит от интенсивности света, в свою очередь определяемой высотой солнца над горизонтом, облачностью, запыленностью атмосферы, характером подстилающей поверхности и т. п.

Поскольку высота солнца — функция географической широты, можно было бы ожидать, что биопродуктивность вод будет изменяться с изменением широты, однако это не так. Во всех крупных географических широтных зонах, вплоть до высоких широт северного и южного полушарий, есть и высокопродуктивные, и малопродуктивные районы.

Широтная зональность проявляется главным образом в особенностях внутrigодового хода изменения биомассы фитопланктона. В высоких широтах с малым сроком достаточной освещенности, равной приблизительно  $400 \text{ лк}$ , сезонный ход биомассы фитопланктона имеет одновершинный характер, между полярными областями и тропиками наблюдается двухвершинность, а в тропической зоне на довольно плавной кривой сезонного хода, как правило, видны два уровня продуктивности, соответствующие сухому и дождливому периодам.

Пространственные аномалии распределения первичной биопродук-

ции зависят от содержания в морской воде биогенных веществ (Кляшторин, 1964; Волковинский, 1967; Максимова, 1976).

В макромасштабе океанов сходство географического распределения основных биогенных веществ и первичной продукции очевидно. Однако при переходе к мезо- и тем более микромасштабам зависимость распределения первичной продукции или биомассы фитопланктона от биогенных веществ не всегда прослеживается. Содержание биогенных веществ — далеко не во всех случаях надежный показатель биопродуктивности вод, так как богатые питательными солями воды могут быть бедны планктоном по чисто физическим или динамическим причинам, а больш́ая биомасса фитопланктона в конечной стадии вегетации может наблюдаться и при малом содержании биогенных веществ. Например, весной 1958 г. севернее субарктического фронта при довольно равном содержании биогенных веществ в поверхностных слоях моря (Аноним, 1962), биомасса фитопланктона колебалась от 5000 до 215 000 тыс. клеток на 1 м<sup>3</sup> (Мовчан, 1962).

Ярко выраженная неравномерность биопродуктивности вод в разгар вегетационного периода наблюдается и в пределах хорошо снабженных минеральными солями субполярных вод, и в пределах относительно богатой биопродукцией шельфовой зоны океана.

По мнению В. Г. Богорова (1966), существование во всех географических зонах богатых и бедных районов связано прежде всего с перемешиванием вод, т. е. особенно велико значение физической структуры вод поверхностных слоев океана.

Наиболее важно не само по себе наличие или отсутствие интенсивного подъема вод (включая прибрежный апвеллинг), а степень устойчивости верхнего продукционного слоя и подвижности вод в горизонтальной плоскости. В этом смысле наилучшие для продуцирования условия имеют мелководные (до 25—50 м) участки шельфа, целиком расположенные в слое интенсивного фотосинтеза. Погружение вод за пределы продукционного слоя здесь невозможно, и развитие жизни зависит лишь от света и наличия биогенных веществ, запас которых постоянно восстанавливается в результате речного стока, регенерации, подъема вод по склону и адвективным путем. Именно прибрежное мелководье — главный источник обогащения органическим веществом районов материкового шельфа, позволившего создать представление о циркумконтинентальной зональности биосферы Мирового океана (Гершанович, 1976).

Пространственная неравномерность биопродуктивности наблюдается даже в шельфовой зоне, главное условие здесь — различие источников пополнения биогенных веществ. В мелководном Персидском (Арабском) заливе минимальная среднегодовая биомасса фитопланктона превышает 100 мг/м<sup>3</sup>, что типично для продуктивных районов Мирового океана. Однако наибольших величин (до 2—4 г/м<sup>3</sup>) биомасса планктона достигает в северо-западной части залива вблизи устья Шатт-эль-Араба. В центральных районах залива, на водах которых не сказывается речной сток и вынос богатых биогенными веществами вод из Оманского залива, биомасса планктона падает до 100 мг/м<sup>3</sup>.

За пределами верхней части шельфовой зоны и особенно в открытых районах океана важнейшим условием, влияющим на биопродуктивность вод, становится устойчивость самого верхнего продукционного слоя моря. Подъем вод способствует повышению биопродуктивности только тогда, когда ярко выраженный пикноклин на границе слоя интенсивности фотосинтеза препятствует опусканию водорослей в нижележащие слои и затрудняет водообмен между поверхностными и глубинными водами.

Подъем однородной (гомогенной) водной массы отнюдь не стимулирует продуцирование органического вещества. Например, в прибрежных районах Юго-Западной Африки высокая продуктивность наблюдается не на участках интенсивного подъема вод (район Людеритц), а в районе Уолфиш-бей (22—23° ю. ш.), где постоянное снабжение биогенными веществами адвективным путем сочетается с высокими величинами устойчивости слоя максимального фотосинтеза (Елизаров, 1967).

Важнейшую роль степени стратификации верхних слоев воды для биологической продуктивности хорошо подтверждают балансовые расчеты биогенных веществ в масштабе крупных океанических районов.

В Индийском океане годичное потребление биогенных соединений азота, фосфора и кремния в зоне тропиков и субтропиков удовлетворяется в результате речного стока менее чем на 1% (по кремнию приблизительно на 1%), подъема вод — на 10—20% и регенерации — на 80—90% (Максимова, 1977).

В районе Новой Шотландии восстановительная регенерация также дает около 80% биогенных веществ. Для того чтобы восстанавливаемые минеральные соли оставались в зоне интенсивного фотосинтеза на время, необходимое для вторичного продуцирования, в открытом океане должна быть такая плотностная структура, при которой глубже продукционного слоя располагается хорошо выраженный пикноклин. Такие структуры обычно наблюдаются во фронтальных зонах, разделяющих воды различного происхождения. В приведенном выше случае максимум биогенов приходится на зону океанического фронта, расположенного в 90 км от берега Новой Шотландии (Fournier et al., 1977).

Приуроченность районов повышенной биопродуктивности в открытом океане к зонам полярных и субполярных фронтов, границам водных масс, апвеллингам и крупным геострофическим переносам подтверждается многочисленными наблюдениями. В Северо-Западной Атлантике районы массового продуцирования планктона весной и летом приходится на участки с повышенной стратификацией вод или на мелководные участки, целиком расположенные в зоне интенсивного фотосинтеза (Елизаров, Мовчан, 1973). Однако в конце лета, когда содержание биогенных веществ в фотическом слое заметно уменьшается, их распределение становится важным фактором пространственной неравномерности биопродуктивности вод.

В то же время во все сезоны года, за исключением периодов отсутствия фотосинтеза, участки, богатые фито- и зоопланктоном, располагаются вдоль ветвей наиболее устойчивых геострофических течений в зоне подъема, распространения и погружения поднявшихся вод (Владимирская, Елизаров, Мовчан, 1976).

Как известно, геострофические течения характеризуются следующими уравнениями движения:

$$G_x = -k_x,$$

$$G_y = k_y,$$

где  $G$  — гравитационное ускорение;  
 $k$  — ускорение силы Кориолиса.

Все косвенные методы расчета геострофических течений, основанные на этих исходных уравнениях, с учетом или без учета топогенного фактора, заключаются в сравнении интегральных характеристик поля плотности в трехмерном океаническом пространстве. При этом естественны ошибки (наблюдения, счетные и т. п.), искажающие характер

неравномерности реального поля плотности деятельного слоя моря. В то же время, как уже говорилось, биопродуктивность вод зависит прежде всего от неравномерности поля плотности верхних слоев моря. Поэтому особый интерес представляет расчет плотностных параметров фотического слоя моря типа

$$\frac{\Delta \rho}{\Delta l} \text{ или } \frac{\Delta G_t}{\Delta l}, \frac{\Delta \rho}{\Delta h} \text{ или } \frac{\Delta \sigma_t}{\Delta h}, \left( \frac{\Delta \rho}{\Delta h} \right)_{\max}, H \left( \frac{\Delta \rho}{\Delta h} \right)_{\max} \text{ и т. п.}$$

т. е. расчет первых производных (градиентов) плотности по расстоянию и глубине, а также различных пространственных характеристик этих производных, например, топографии максимумов вертикальных градиентов плотности и т. п. В этом смысле градиенты плотности универсальны. При оценке продуктивности вод географическое положение зон апвеллингов, фронтальных поверхностей и границ водных масс, направление основных геострофических переносов и другие динамические феномены легко выражаются величинами горизонтальных и вертикальных градиентов плотности ( $\rho$  или  $\sigma_t$ ) или градиентами основных компонентов плотности ( $T^\circ$  и  $S\%_0$ ).

Распределение первых производных важнейших океанографических характеристик отражает основные особенности пространственного распределения абсолютных величин этих характеристик, уровня сгущения и разрежения изолиний этих характеристик, причем исходные данные для расчетов не меняются.

Для выявления характера связи между градиентами характеристик внешней среды и биологическими показателями следует, по-видимому, использовать материалы конкретных комплексных экспедиций, в которых параллельно проводились измерения основных характеристик гидросферы и биосферы, а выявлять наиболее общие закономерности формирования пространственной неравномерности поля плотности поверхностных слоев моря невозможно без использования осредненных данных. Поэтому следует использовать результаты расчета как по данным конкретных экспедиций, так и по обобщенным данным.

Для расчетов были использованы следующие первичные данные по температуре и плотности морской воды.

1. Результаты обработки наблюдений второго и четвертого рейсов НИС «Михаил Ломоносов» в 1958 г. (Аноним, 1962). Исследуемый район Северной Атлантики простирался между 40 и 60° с. ш. от 15 до 55° з. д. Были рассчитаны горизонтальные градиенты по температуре и плотности морской воды на поверхности моря

$$\Gamma_{\text{гор}} = \frac{\Delta T}{\Delta l} 10^2 \text{ и } \Gamma_{\text{гор}} = \frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l} 10^2,$$

где  $\Delta T$  и  $\Delta \sigma_t$  — изменения температуры и условной плотности между гидрологическими станциями;

$\Delta l$  — расстояние между этими станциями.

Рассчитывали также разность условных плотностей между горизонтами 200 и 0 м,  $\Delta \sigma_t$  (200 м).

По полученным величинам горизонтальных градиентов температуры и плотности были построены карты распределения этих характеристик на поверхности моря. К недостаткам такого рода построений относится явная неравномерность распределения гидрологических станций по избранной акватории. Однако этот недостаток присущ и другим характеристикам, используемым при сравнительном анализе.

В работе будут использованы также карты пространственного распределения биомассы зоо- и фитопланктона (частично), температуры воды и минерального фосфора.

2. Материалы комплексной международной экспедиции «Норвестлант» в 1963 г. (Анопул, 1968) в районе между 50 и 65° с. ш. и от 10 до 70° з. д., т. е. на акватории главным образом Ирмингерова и Лабрадорского морей.

Были построены карты-схемы районов максимальной биомассы фитопланктона (более 50 мг С/л) и распределения величин разности плотностей в слое 0—200 м, рассчитаны величины вертикальных градиентов и построен график вертикального распределения этих характеристик на гидрологическом разрезе.

3. Данные измерений температуры и солености морской воды, собранные в Атлантическом океане во время МГГ в 1957/58 г. исследовательскими судами США (Fuglister, 1960). Были рассчитаны величины плотности морской воды, величины горизонтальных градиентов плотности между гидрологическими станциями  $\left(\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l} 10^2\right)$  и разности плотностей в слое 0—200 м  $(\sigma_{t(200)} - \sigma_{t(0)})$ . Исследована большая часть Атлантического океана между 32° ю. ш. и 45° с. ш. Два небольших разреза было выполнено между 50 и 60° с. ш. в северо-восточной части Атлантического океана. Подавляющее большинство разрезов простиралось в широтном направлении, расстояние между разрезами колебалось от 2—3 до 6—8 градусов долготы. Естественно, что карты распределения градиентов плотности в данном случае носят условный характер, полностью отвечая поставленной задаче (изучение неравномерности поля плотности поверхностной структуры океана) лишь вблизи выполненных разрезов.

4. Собранные в ЦОДе данные наблюдений за температурой и соленостью морской воды по Северной Атлантике, приведенные к центрам пятиградусных квадратов (Елизаров, Щербинин, 1979). На основе этих данных были подсчитаны вертикальные градиенты плотности по слоям воды между стандартными горизонтами, построены карты максимальных градиентов плотности за весь срок наблюдений  $\left(\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta z}\right)_{\max}$  топографии максимальных градиентов плотности за весь срок наблюдений  $H \left(\frac{\Delta G_t}{\Delta z}\right)_{\max}$  стандартных отклонений плотности и др.

Недостатки осреднения по пятиградусным квадратам очевидны: при абстрагировании такого уровня исчезают важные подробности пространственного распределения океанографических характеристик. В избранном масштабе «тонут» большие промысловые участки и даже известные промысловые районы. Однако при этом выявляются наиболее общие закономерности пространственного распределения характеристик в пределах всего океана.

5. Данные Международного Центра Океанографических данных, осредненные для центров одноградусных квадратов. Расчетами была охвачена акватория Атлантического океана от 4° с. ш. до 72° с. ш.

В отличие от расчетов по пятиградусным квадратам вертикальные градиенты плотности  $\frac{\partial \rho}{\partial z}$  в данном случае были рассчитаны не по стандартным горизонтам, а для слоев 0—50, 0—100 и 0—200 м. Кроме того, для горизонтов 0, 50, 100 и 200 м были рассчитаны горизонтальные градиенты плотности по формуле

$$\frac{\partial \rho}{\partial n} = \sqrt{\left(\frac{\partial \rho}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial y}\right)^2},$$

где составляющие по  $x$  и  $y$  соответствуют широтным и меридиональным составляющим градиента.

Расчеты по одноградусным квадратам значительно детализируют представления о пространственной неравномерности поля плотности, но, разумеется, не способны дать ответ о масштабах изменчивости поля градиентов плотности в реальных временных условиях. Однако и одноградусные квадраты дают трудно предсказуемый в мало изученных местах эффект сглаживания реально существующего поля характеристики. Действительно, при шаге в 60 миль может быть затушено существование сравнительно узких геострофических переносов, небольших вихреобразований и пр. Однако преимущества такого рода расчетов также очевидны: представляется возможность иметь все поле нужной характеристики в условиях максимально возможного приближения к реальной действительности.

Материалы по пространственному распределению компонентов биосферы Атлантического океана, используемые в данной работе, разнородны. По результатам конкретных экспедиций привлечены карты количественного распределения биомассы фито- и зоопланктона (Владимирская, 1972; Елизаров, Мовчан, 1973), в обобщенном виде использованы известные карты качественной оценки обилия планктона Г. Шотта (G. Schott, 1942), данные по распределению биомассы в тропической зоне Атлантического океана (Зернова, 1974), карты осредненных значений первичной продукции, биомассы фито- и зоопланктона, бентоса и нектона (Марти, Мартинсен, 1969; Семина, 1977; Филатова, 1977; Кобленц — Мишке, 1977).

В северной части Атлантического океана между 40 и 60° с.ш. распределение фитопланктона и кормового зоопланктона рассматривалось вместе с распределением абсолютных величин температуры и плотности морской воды, содержания минерального азота и фосфора, а также величин вертикальных и горизонтальных градиентов температуры и плотности морской воды (рис. 1).

Весной 1958 г. биомасса планктона была распределена по акватории исследуемого района крайне неоднородно. На участках максимальной продуктивности биомасса кормового зоопланктона превышала 200—300 мг/м<sup>3</sup>, а в самых непродуктивных областях была менее 10 мг/м<sup>3</sup>. Максимальная биомасса фитопланктона превышала 250 мг/м<sup>3</sup> (или 150—200 тыс. клеток на 1 м<sup>3</sup>), минимальная доходила до 0,1 мг/м<sup>3</sup>. Следовательно, биомасса планктона в областях минимума была на два-три порядка ниже, чем на участках максимальной продуктивности.

Неравномерность в пространственном распределении биопроductивности не обнаруживала сколько-нибудь значимой связи ни с изменением широты, ни с изменением долготы, ни даже с близостью к берегам континентов (фактор так называемой циркумконтинентальной зональности).

На особенности распределения планктона не влияло также распределение абсолютных величин наиболее важных для продуктивности вод океанографических характеристик. И максимальные, и минимальные величины планктона приходились на воды с температурой от 0—3 до 16—18°; вдоль 30° з.д. температура воды на поверхности моря весной 1958 г. колебалась приблизительно от 7 до 16°, а биомасса планктона оставалась на самом низком уровне для этого времени года. Максимальные величины биомассы наблюдались и при температуре воды на поверхности моря, равной 9,8° (50°00' с.ш. и 37°54' з.д.), и при температуре около 0° (48°52' с.ш. и 50°00' з.д.).

Нигде в районе исследования температура воды не достигала экстремальных значений, диапазон температур соответствовал условиям обитания массовых видов планктона.

Распределение абсолютных величин условной плотности морской воды также имеет мало общего с распределением планктона. Две ос-

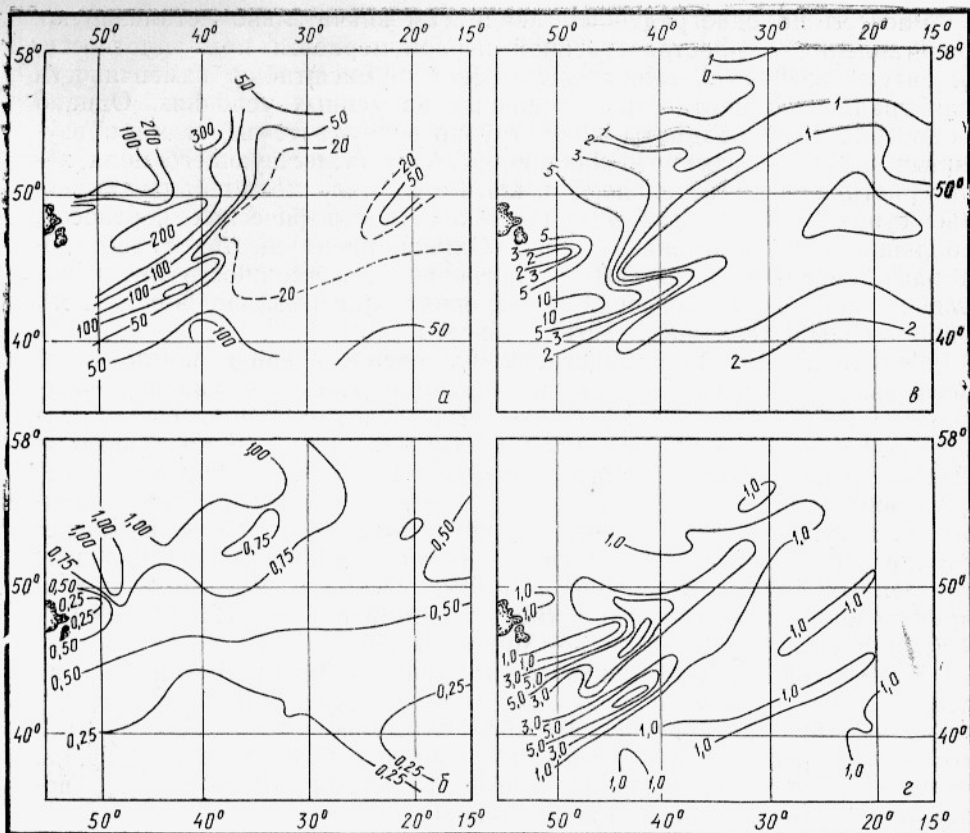


Рис. 1. Распределение в северной части Атлантического океана весной 1958 г.: а — биомассы зоопланктона, мг/м<sup>3</sup>; б — минерального фосфора, мкг-атом/л; в — параметра  $\frac{\Delta T}{\Delta l}$  для слоя 0—200 м; г — горизонтального градиента температуры воды на поверхности моря  $\frac{\Delta T}{\Delta l}$ .

повные изолинии плотности рассматриваемого района — 27,00 и 26,75 — проходят и через наиболее продуктивные, и через самые непродуктивные области.

Распределение такой важной характеристики, как содержание минерального фосфора, в общем имеющее в рассматриваемом районе широтное (зональное) простиранье с увеличением абсолютного содержания с юга на север, не соответствует сложным конфигурациям пространственной неравномерности в распределении биомассы планктона. Вдоль изолинии 50 мкг-атом  $PO_4/l$  располагаются участки с максимальной (более 200 мг/м<sup>3</sup>) и минимальной (менее 10 мг/м<sup>3</sup>) биомассой зоопланктона. Абсолютный минимум биомассы на крайней северной точке района исследования приходится на максимум содержания минерального фосфора. А при самых низких величинах фосфора (менее 20 мкг-атом/л) биомасса зоопланктона на некоторых участках достигает 100 мг/м<sup>3</sup>.

Итак, весной 1958 г. на пространственное распределение планктона в большом районе Северной Атлантики (приблизительно 1000 × 1200 миль), по-видимому, не влияло распределение абсолютных величин важнейших физико-химических характеристик.

Иное дело производные плотности морской воды по расстоянию и глубине или горизонтальные и вертикальные градиенты плотности. Сопоставление полученных карт распределения  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l}$  и  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta z}$  с рас-



пределением биомассы кормового планктона показывает несомненную связь между биотическими и абиотическими показателями. Во всех случаях сохраняются особенности конфигурации изолиний, практически совпадают области максимумов и минимумов, даже соотношение между максимальными и минимальными величинами градиентов плотности примерно то же, что и для биомассы фито- и зоопланктона.

Две ярко выраженные области максимумов  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l}$  и  $\frac{\Delta \sigma_f}{\Delta z}$  и биомассы зоопланктона вытянуты с юго-запада на северо-восток между 50 и 40° з.д. Область минимума занимает обширное пространство приблизительно от 43 до 53° с.ш. между 20 и 37° з.д. Южнее 40—42° с.ш. повсеместно наблюдается возрастание величин градиентов плотности и биомассы планктона, наоборот, в крайней северной части исследуемого района на 50—55° с.ш. и 30—35° з.д. несколько понижаются величины всех характеристик.

В общем, для всего района характерно довольно хорошее соответствие величин градиентов плотности и биомассы зоопланктона (табл. 1). Значениям  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l}$  и  $\frac{\Delta \sigma_f}{\Delta z}$ , меньшим  $1 \times 10^2$  усл. ед., соответствуют области с биомассой меньше 50 мг/м<sup>3</sup>, большей частью меньше 20 мг/м<sup>3</sup>, большим  $2 \times 10^2$  — области с биомассой больше 100 мг/м<sup>3</sup>.

Таблица 1

Соотношение горизонтальных и вертикальных градиентов плотности и величин биомассы планктона в Северной Атлантике (40—60° с. ш.) весной 1958 г.

Градусы	$\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l} \cdot 10^2$	$\frac{\Delta \sigma_f}{(200\text{м}-0\text{м})}$	Биомасса, мг/м <sup>3</sup>		
			фитопланктона	кормового зоопланктона	зоопланктона
I	< 0,5	< 5	< 1	< 10	< 10
II	0,5—1	< 10	< 10	10—50	10—50
III	1—2	10—25	10—100	50—100	50—100
IV	2—5	25—100	100—300	100—200	100—300
V	5—10	> 100	> 300	200—500	300—500

Производные температуры воды по расстоянию и глубине в рассматриваемом районе также довольно хорошо отражают особенности распределения продуктивных и непродуктивных участков (см. рис. 1), так как поле температуры воды в значительной степени формирует поле плотности. Однако прямая зависимость распределения биомассы планктона от температуры воды в этом районе вряд ли возможна, так как ее величины достаточно далеки от лимитирующих.

Есть однако и некоторые нарушения общей зависимости продуктивности вод от показателей неравномерности поля плотности. Наибольшая биомасса планктона (250—300 мг/м<sup>3</sup>) наблюдалась не только в местах максимумов градиентов плотности, но и за их пределами, например севернее 50° с.ш. между 38 и 43° з.д., где довольно высокие величины градиентов плотности (от 10 до 30 усл. вел.) сочетаются с максимальным содержанием минеральных солей азота и фосфора (см. рис. 1).

Зависимость биомассы планктона от градиентов плотности хорошо видна на примере распределения характеристик в вертикальной плоскости (рис. 2). В открытой части моря (ст. 1—8) величины биомассы фито- и зоопланктона изменяются прямо пропорционально изменению параметра  $\frac{\Delta \sigma_f}{\Delta z} \cdot 10^4$  в слое интенсивного фотосинтеза.

Наибольшие величины биомассы планктона приходятся на максимум вертикального градиента плотности приблизительно в слое 20—40 м.

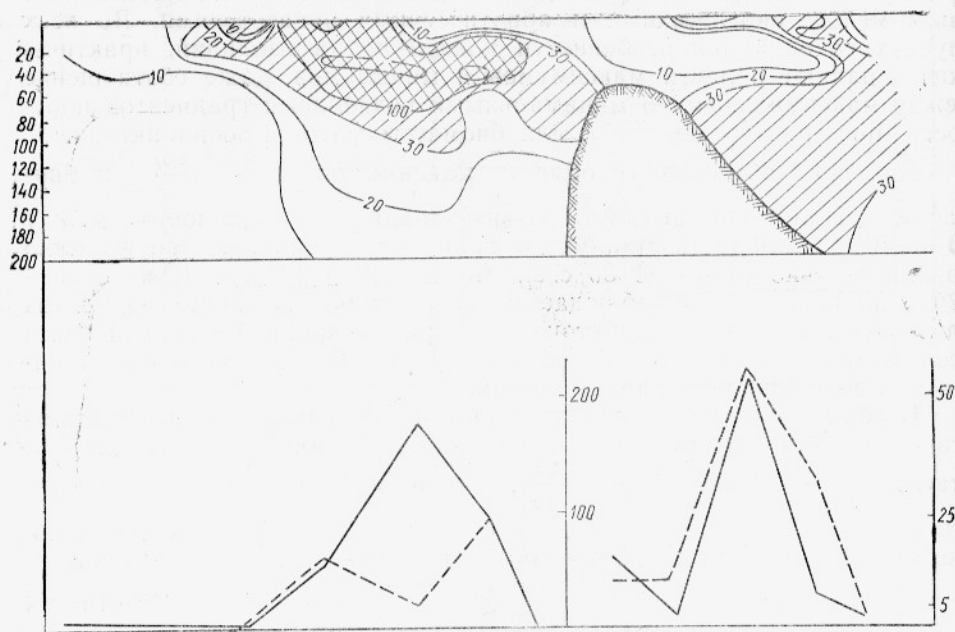


Рис. 2. Распределение на гидрологическом разрезе в северо-западной части Атлантического океана весной 1958 г. вертикальных градиентов плотности  $\frac{d\rho}{dz}$  и биомассы фито- и зоопланктона.

На мелководье с благоприятными условиями для развития планктона общий уровень биопродуктивности выше, чем в открытых районах моря. Однако максимальные величины биомассы планктона также совпадают с максимумом градиента плотности.

Расчеты по материалам осеннего рейса 1958 г. в том же районе на НИС «Михаил Ломоносов» также показали соответствие максимальных вертикальных градиентов плотности наибольшей биомассе зоопланктона. Однако общая конфигурация изолиний градиентов плотности и биомассы планктона осенью обнаруживает значительно меньше сходства, чем весной и летом. Осенью (сентябрь — ноябрь), когда поверхностные воды повсеместно стратифицированы, большое значение приобретает фактор наличия или отсутствия минеральных солей азота и фосфора (Елизаров, Мовчан, 1973).

Осенние процессы вряд ли могут внести существенные поправки в географическое положение продуктивных и непродуктивных океанических районов. Основной объем продукции планктона вырабатывается весной и в начале лета; ее максимум в умеренных и высоких широтах наблюдается с марта по июль (Виноградова, 1970).

Летом 1963 г. в большей части северо-западного района Северной Атлантики высокопродуктивные участки с максимальной биомассой фито- и зоопланктона совпадают с областями максимальных вертикальных градиентов плотности (рис. 3). Однако в обширной области вблизи канадского берега (на рисунке обозначена точками), несмотря на высокие величины градиентов плотности, продуктивность ее вод невелика. Наиболее вероятная причина этого — локализация здесь арктических вод с экстремальными температурами воды поверхностного слоя моря (ниже  $-1,0^{\circ}\text{C}$ ). Здесь температура воды воздействует на продуктивность, образуя физический барьер существования массовых видов планктонных организмов. Следовательно, темпе-

ратура воды имеет важное значение для продуктивности вод вблизи физических границ обитания массовых видов.

Результаты расчетов градиентов плотности морской воды по данным, собранным в период МГГ американскими исследовательскими судами, показывают, что применять параметр  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta z}$  в масштабах

всего океана нельзя, если первичные данные не приведены к одному сезону. В отношении параметра  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l}$ , определяемого нами как общий показатель фронтальности вод, таких противопоказаний нет, хотя сезонные и межгодовые изменения в распределении его абсолютных величин вполне возможны.

На рис. 4 представлено распределение абсолютных величин параметра  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l} 10^3$  на

горизонте 0 м на большей части Атлантического океана приблизительно от 50—55° с. ш. до 35° ю. ш. Общий характер распределения показателя фронтальности указывает на

тесную связь между уровнем неравномерности поля плотности поверхностных слоев океана и продуктивностью вод. В большинстве случаев области максимума показателя фронтальности (5 усл. ед.) приходятся на хорошо известные высокопродуктивные области: часть Ньюфаундлендского района (охваченная наблюдениями); район Канарского течения, примыкающей к Западной Африке; район Уолфишбей; Уругвайско-Бразильский район и некоторые другие. В диапазон от 2 до 5 усл. ед. параметра  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l} 10^3$  входят некоторые промысловые районы Северо-Западной Атлантики, район Кельтского моря, приэкваториальный пояс повышенной продуктивности и др.

Показатель фронтальности обширных малопродуктивных областей открытого океана ниже 2 усл. ед., в южной части Атлантического океана — меньше 1 и даже 0,5 усл. ед. В Северной Атлантике уровень фронтальности выше, чем в Южной, что, безусловно, связано с большей меридиональностью динамических процессов в атмосфере и гидросфере этого региона.

На карте распределения показателя фронтальности поверхностной структуры океана видны пояса повышенной фронтальности, расположенные вдоль восточной (правой) периферии Гольфстрима и Антило-Гвианского течения — область центральной части Северной Атлантики, приблизительно между 25 и 35° с. ш. и 35 и 55° з. д. с максимумом

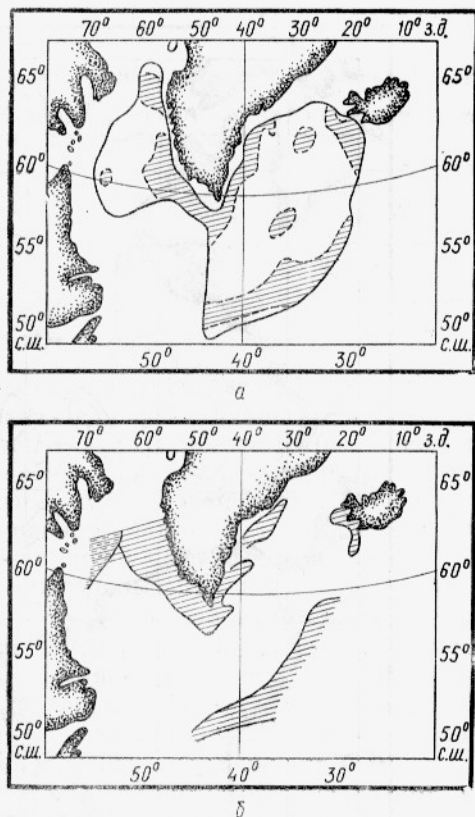


Рис. 3. Распределение в Северо-Западной Атлантике летом 1963 г. параметра  $\Delta \sigma$  для слоя 0—200 м (б) и участков максимальной биомассы фитопланктона (а)

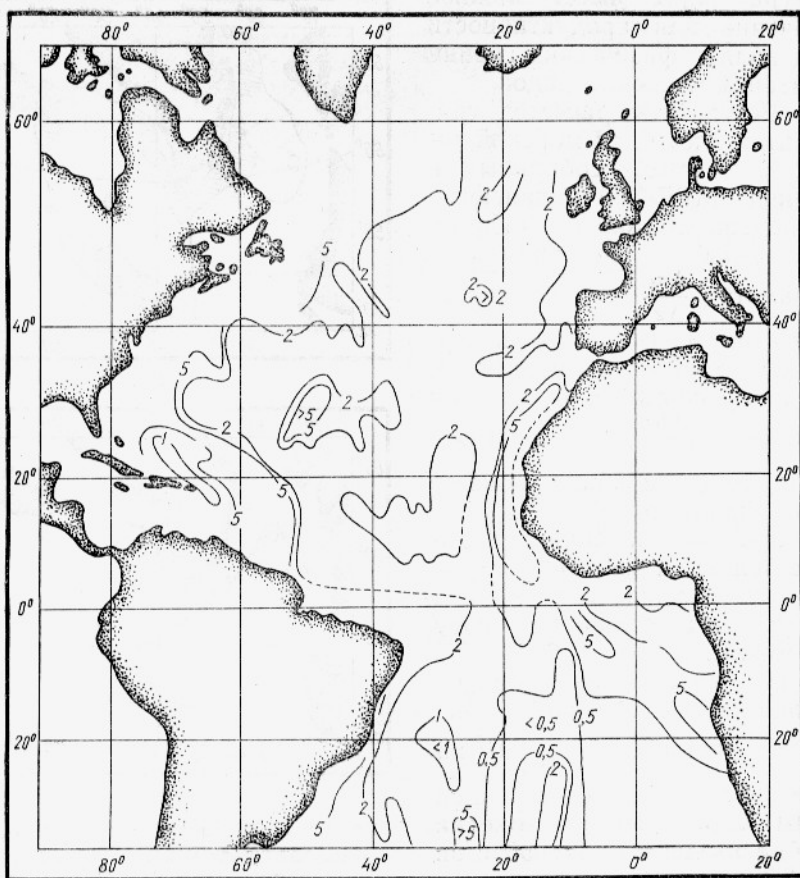


Рис. 4. Распределение в Атлантическом океане на горизонте 0 м параметра  $\frac{\partial \rho}{\partial l}$  горизонтального градиента плотности между гидрологическими станциями.

фронтальности на  $30^\circ$  с. ш. и  $50^\circ$  з. д., а также небольшая область центральной части Южной Атлантики с максимумом на  $32^\circ$  ю. ш. и  $25^\circ$  з. д.

Канарская и Уолфиш-бейская области повышенной фронтальности, по-видимому, соединены между собой у основания треугольника Гвинейского залива (см. рис. 4).

Для Атлантического океана можно констатировать наличие пятнистости в распределении показателя фронтальности в центральной части и вытянутость районов повышенной фронтальности вдоль материков, что в общем соответствует характеру геострофической циркуляции в Атлантическом океане.

Пространственное распределение показателя фронтальности сходно с распределением характеристик биопродуктивности (табл. 2).

Минимальные и максимальные величины параметра  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l}$  и характеристик биопродуктивности в целом по океану соответствуют друг другу. Не совпадают уровни характеристик лишь в некоторых районах центральных частей Атлантического океана, видимо, вследствие отсутствия достаточно систематических наблюдений за биосферой. Области повышенных величин показателя фронтальности хорошо совпадают с районами промысла массовых рыб Атлантического океана семейств *Scombridae*, *Scomberomiridae* и *Thunnidae* (Марти, Мартинсен, 1969).

Соотношение показателей фронтальности (параметр  $\frac{\Delta\sigma_t}{\Delta l}$  с характеристиками биопродуктивности (по Марти, Мартинсену, 1969) в Атлантическом океане от 32° ю. ш. до 50–55° с. ш.

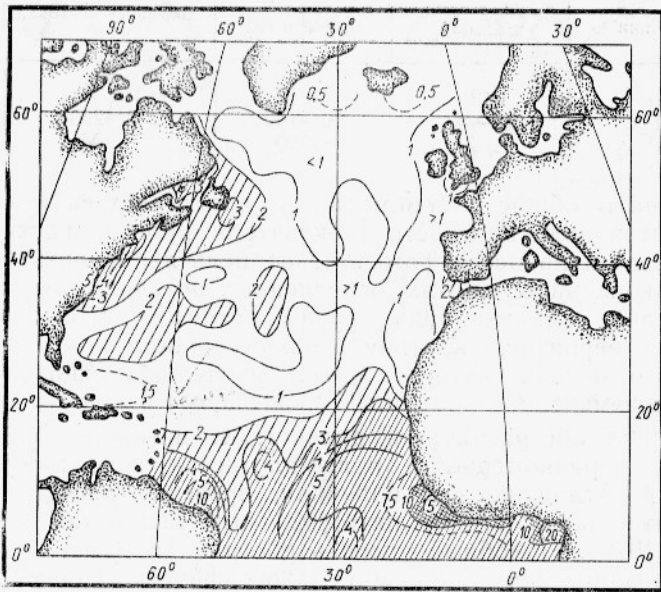
Градации	$\frac{\Delta\sigma_t}{\Delta l} \cdot 10^2$	$C, \text{ т/м}^2 \text{ в год}$	Биомасса сестоны, мг/м <sup>3</sup>	Хозяйственно-ценная продукция, т/км <sup>2</sup>
I	<2	<50	<50	<50
II	2–5	50–100	50–200	50–200
III	>5	>100	>200	>200

Однако общие закономерности пространственного распределения градиентов поля плотности (показателя фронтальности и показателей устойчивости процесса фотосинтеза) нельзя получить без привлечения всех накопленных данных, осредненных по квадратам различного размера (либо каким-нибудь другим путем) и позволяющих получить наиболее вероятную картину неравномерности поля плотности Атлантического океана, которая может послужить основой для изучения всех его изменений — сезонных, межгодовых и т. п.

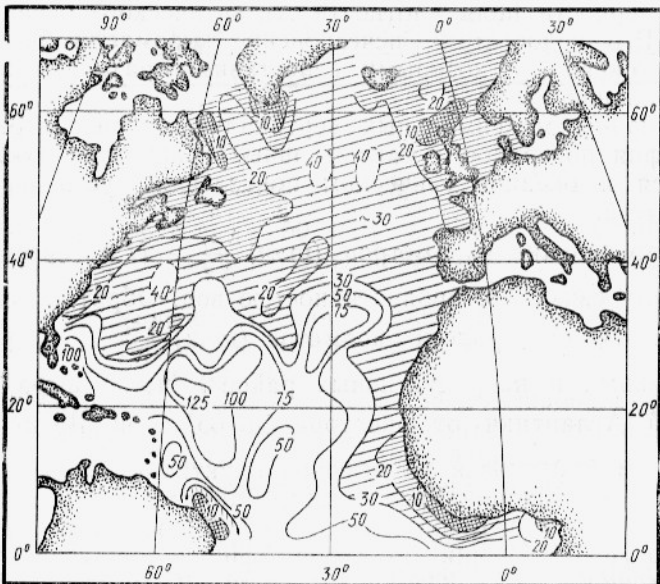
Весьма абстрактную и далекую от истинного положения вещей картину неравномерности поля плотности поверхностной структуры Северной Атлантики мы получили, проведя расчеты вертикальных градиентов плотности по пятиградусным квадратам (Елизаров, Щербинин, 1979). Подобный уровень абстракции имеет, однако, право на существование при анализе океанографических основ биопродуктивности вод, так как позволяет получить закономерности формирования неравномерности поля плотности Атлантического океана в макромасштабе. Его недостаток — исчезновение мезомасштабных явлений открытого океана, с которыми сопоставимы размеры многих промысловых районов.

Величины максимальных вертикальных градиентов плотности и топография поверхности максимальных градиентов плотности (рис. 5) относятся к океанографическим показателям устойчивости процесса фотосинтеза.

Распределение параметров  $(\max) \frac{\Delta\sigma_t}{\Delta z}$  и  $H$  в Северной Атлантике по-разному связано с продуктивностью вод. Обратная связь пространственной неравномерности параметра  $(\max) \frac{\Delta\sigma_t}{\Delta z}$  с распределением продуктивных и непродуктивных районов четко выражена для всей Северной Атлантики от экватора до 65° с. ш. Величины  $H \left( \frac{\Delta\sigma_t}{\Delta z} \right)_{\max}$  менее 20 м приходятся на высокопродуктивные промысловые районы Восточной и Западной Гренландии, Лабрадора и Исландии, Норвежского, Северного и Кельтского, морей, Ньюфаундленда, Новой Шотландии и Новой Англии, Западной Африки, Гвинейского залива и северо-восточной части Южной Америки. В малопродуктивных водах тропической части Северной Атлантики поверхность максимальных градиентов плотности располагается на глубинах от 30 до 125 м (на юго-восточной периферии Саргассова моря). Вследствие того, что осреднение велось по пятиградусным квадратам, несколько преувеличенные величины параметра  $H_{\max}$  получились и для некоторых других районов Саргассова моря. По тем же причинам на карте не проявились высокопродуктивные районы, вытянутые вдоль подводного хребта Рейкьянес и северо-западного побережья Африки, приэкваториальный пояс и некоторые другие районы.



a



b

Рис. 5. Распределение в Северной Атлантике осредненных по пятиградусным квадратам величин максимальных вертикальных градиентов плотности (а) и топография поверхности максимальных градиентов плотности (б) (в м)

Связь параметра  $(\max) \frac{\Delta \sigma_t}{\Delta z}$  с продуктивностью вод Северной

Атлантики более сложная. В пределах экваториального и частично тропического пояса до  $20-25^\circ$  с. ш. величины параметра изменяются от 1 до 20 усл. ед., севернее  $35^\circ$  с. ш. диапазон изменений значительно меньше — от 0,5 до 5 усл. ед. В том и другом случае можно констатировать наличие прямой связи между максимальным вертикальным градиентом плотности и продуктивностью вод. Однако связь эта менее очевидна и значима, чем связь параметра  $H$  с продуктивностью вод.

Очевидно, распределение максимальных вертикальных градиентов плотности может быть использовано в целях географического районирования продуктивности океанических вод лишь в совокупности с данными по топографии поверхности максимальных градиентов плотности.

По обоим показателям устойчивости процесса фотосинтеза в центральных частях Саргассова моря можно выделить два перспективных, но пока еще не изученных в отношении биопродуктивности района — между  $27$  и  $33^\circ$  с. ш. и между  $55$  и  $70^\circ$  з. д.; центр второго расположения приблизительно на  $35^\circ$  и  $40-45^\circ$  с. ш. (см. рис. 5).

Сравнение данных, полученных нами по результатам расчетов для одноградусных квадратов, с предыдущими показывает, что уровень детализации поля градиентов плотности здесь значительно возрастает.

На рис. 6, где показано поле горизонтального градиента плотности на горизонте 0 м в Северной Атлантике (от  $3,5$  до  $72,5^\circ$  с. ш.), хорошо видны сплошные области высоких величин градиентов плотности в прибрежных районах США, Канады, Гренландии, Исландии, Англии, Норвегии, Западной Африки и Южной Америки.

Результаты расчетов по данным конкретных экспедиций позволили выделить область повышенных градиентов в зоне взаимодействия системы Гольфстрим — Северо-Атлантическое течение — Лабрадорское течение. В этой области наиболее мощно проявляется фронтальность в открытых районах океана. Множество языков высоких значений горизонтального градиента плотности, отходящих от этой области в восточном направлении, в общем соответствуют зонам высокой продуктивности, выделяющимся по биомассам фито- и зоопланктона (Владимирская, 1972; Мовчан, 1975).

Подтверждаются также другие выводы, сделанные на основании анализа данных экспедиций (МГГ и Норвестлант). Множество очагов повышенных значений горизонтального градиента плотности (более  $100$  ед.  $\frac{\partial \rho}{\partial n} 10^4$ ) выделяется и в центральных частях субтропических и тропических районов Северной Атлантики, в том числе в восточной и юго-западной частях Саргассова моря. Однако нигде в этих районах, за исключением прибрежных участков, величины горизонтальных градиентов плотности не превышают  $200$  ед.  $\frac{\partial \rho}{\partial n} 10^4$ . В этом, по-видимому, сказывается эффект сглаживания естественных условий из-за ровного и довольно большого размера шага  $\frac{\partial \rho}{\partial n}$ .

На картах, построенных на основе расчетов по одноградусным квадратам, отчетливо видно, почему градиенты были получены для пустынной западной части Саргассова моря при расчетах по пятиградусным квадратам. Сказалась близость высокоградиентной зоны Гольфстрим — Лабрадорское течение. В противоположность этому видно, как узкая полоска высоких градиентов плотности у берега Западной Африки при расчетах по пятиградусным квадратам потонула в поле низких градиентов.

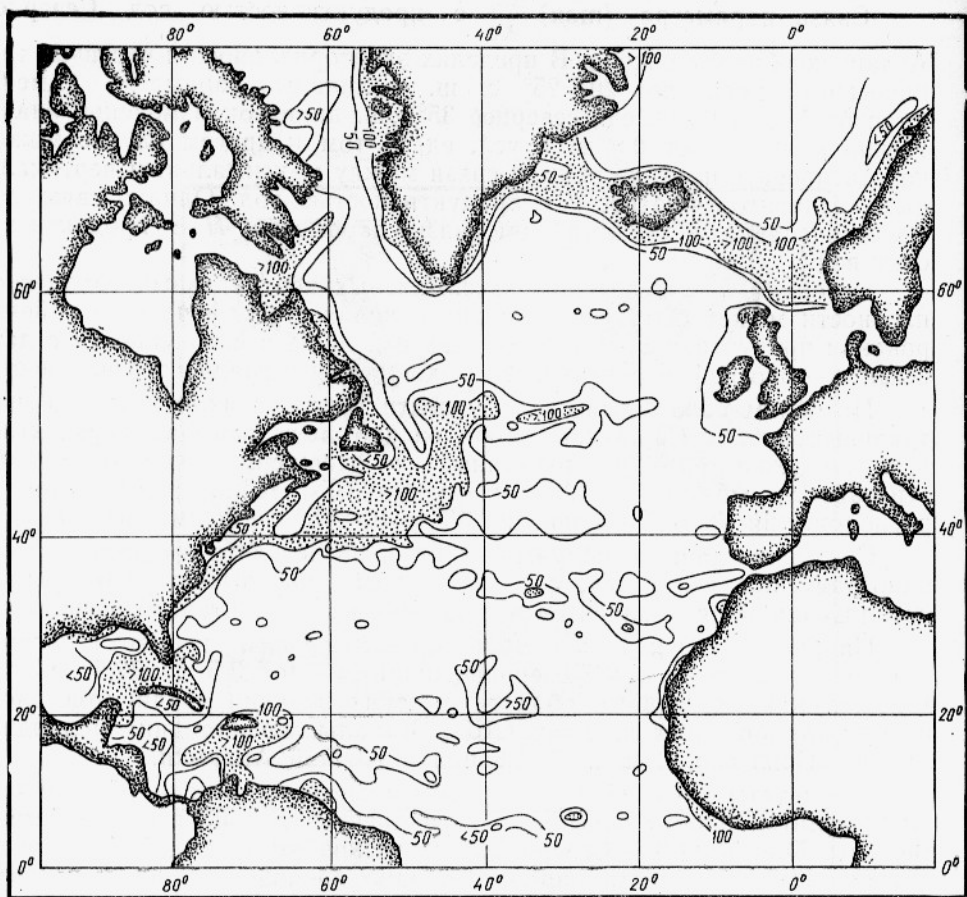


Рис. 6. Распределение в Северной Атлантике максимальных горизонтальных градиентов плотности  $\frac{\partial \sigma}{\partial n}$  по данным, осредненным по одноградусным квадратам.

Несмотря на взаимосвязанность биотических и абиотических условий в океанах и морях, совсем не просто выделить те главные формы динамических процессов, которые определяют пространственную неравномерность распределения биопродукции.

Эмпирическим путем получены зависимости распределения скопленных морских организмов от характеристик атмосферы и гидросферы. По мнению одних авторов, на распределение объектов промысла влияет объем переноса и формы крупных океанических циркуляций, характер взаимодействия вод планетарного происхождения, скорость подъема и опускания вод и многие другие динамические явления (Uda, Ishiho, 1958).

На распределение морских организмов воздействует также неравномерность в распределении основных физико-химических свойств морской воды, прежде всего, температуры, содержания растворенного кислорода, основных биогенных веществ и др., особенно в областях экстремальных значений этих характеристик. Однако в широком географическом аспекте именно динамика вод определяет основные черты распределения физико-химических свойств морской воды. Первостепенное значение динамической активности вод хорошо проявляется во всех зонах Мирового океана. В макро- и мезомасштабах высокопродуктивные



океанические области базируются на крупных динамических системах гидросферы.

В Атлантическом океане высокопродуктивные районы относятся к следующим типам активных динамических областей: устойчивые геотрофические переносы, а также области взаимодействия вод различного происхождения высоких и умеренных широт (Марти, Мартинсен, 1969; Владимирская, Елизаров, Мовчан, 1974); системы ветровых прибрежных апвеллингов в восточных частях океана (Седых, 1977); приэкваториальная динамическая система (Гордеева, 1970; Грезе, 1971, Зернова, 1974); циркумконтинентальное антарктическое течение.

В мезомасштабе океана повышенной продуктивностью отличаются такие динамические образования, как вторичные фронты или фронтальные зоны (Елизаров, 1965; Солянкин, 1969), циклонические и антициклонические круговороты топогенного и геострофического характера (Богоров и др., 1973), районы, расположенные вдоль путей движения айсбергов (Dinsmore, 1972; Neshyba, 1977), области дивергенций крупных течений и др.

Для пространственного выражения крупных и средних динамических структур гидросферы, связанных с формированием областей высокой продуктивности, используются карты различных океанографических характеристик (карты динамической топографии и карты полных потоков для всех широт; карты и графики распределения температуры воды в верхних слоях моря — в высоких и умеренных широтах северного полушария). В первом и во втором случаях индикаторы динамики вод отражают осредненные параметры переноса вод и общую схему морских течений.

Среди множества факторов, определяющих биологическую, а также промысловую продуктивность океанических вод, особая роль принадлежит морским течениям. Устойчивые постоянные течения, главным образом геострофического характера, перемещают локально формирующиеся воды на большие расстояния, создавая нарушения в полях плотности, температуры воды и других важных с точки зрения биопродуктивности характеристик. Кроме того, течения переносят образовавшееся органическое вещество. Если процесс образования и аккумуляции органического вещества в морях и океанах связан с неравномерностью полей плотности и температуры воды, наличием фронтальных поверхностей, пикноклина и других структурных элементов, то перенос органического вещества, фито- и зоопланктона зависит прежде всего от течений.

Определенные концентрации органики в виде растворов, взвесей и живых организмов, удаляясь с течениями от мест массового образования живой материи, постепенно заглубляются, образуя кормовую базу все более глубинных слоев моря. Поэтому районы повышенной промысловой продуктивности в батии могут быть вытянуты вдоль течений далеко за пределы районов максимального образования фито- и зоопланктона. Например, вдоль основной ветви Лабрадорского течения проходит фронтальная зона с высокими величинами градиентов температуры и плотности морской воды, повышенным содержанием фито- и зоопланктона, устойчивыми скоплениями промысловых рыб. На банке Флемиш-кап, расположенной несколько мористей, хотя там и отсутствуют все характерные признаки фронтальной зоны, сырьевая база не хуже, так как поток органики достигает банки с одной из ветвей Лабрадорского течения (Елизаров, 1959).

Течения переносят те самые водные массы, в которых концентрируются определенные морские организмы. Плоскости раздела водных масс сдвигаются, а с ними перемещаются и характерные для этих масс промысловые организмы. Например, флуктуации в позиции определен-

ной части арктического фронта зависят от изменения интенсивности течений Норвежского моря (Hill, Lee, 1957). В местах схождения вод различного происхождения, т. е. в наиболее продуктивных местах, формируются океанические переносы геострофического типа.

Гольфстрим представляет собой непрерывное течение от мыса Гаттерас до 50° з. д., выраженное градиентом давления между теплой высокосоленой южной водой и более холодной северной. Внутренними и внешними пределами Гольфстрима являются области, где эти градиенты равны нулю (Стоммел, 1963). Однако Гольфстрим — не просто область схождения вод различного происхождения. Для продуктивности вод большее значение имеет не само течение, а примыкающие к нему области круговоротов, вихрей и компенсационных движений, проявляющихся как противотечения по левой стороне основного потока (Rossby, 1936).

Левая сторона геострофического переноса в северном полушарии имеет особое значение для продуктивности вод также из-за того, что она соответствует области преимущественного подъема вод, обусловленного поперечной циркуляцией в течении (Dietrich, 1967). Например, распределение плотности морской воды и распределение минерального фосфора в поперечном направлении Гольфстрима очень похожи: «Апвеллинг с высоким содержанием минерального фосфора связан с движением вод поперек течения» (Neumann et al., 1966).

Итак, подъем в слой интенсивного фотосинтеза биогенных веществ и перенос в трехмерном пространстве вновь произведенного в результате фотосинтеза органического вещества в форме живого фитопланктона, взвеси и раствора осуществляются течениями.

Органическое вещество самых первых трофических уровней в процессе переноса отмирает, регенерирует, превращаясь в минеральные соли и биогенные вещества, опускается в более глубокие слои моря. И хотя все эти явления наблюдаются в пределах всей динамически активной толщи вод, наибольшее значение для компонентов биосферы имеют процессы в самом верхнем продукционном слое. При этом высокий уровень продуцирования органического вещества достигается не только при хорошем снабжении биогенами слоя интенсивного фотосинтеза, но и при обязательном условии некоторого отчленения этого слоя от нижележащих слоев воды.

В открытых районах океана лишь хорошо выраженный пикноклин может в какой-то степени играть роль морского дна мелководья континентальной отмели. Поэтому параметры поля плотности, характеризующие устойчивость основного продукционного слоя и его толщину (расстояние от поверхности моря), являются более репрезентативными характеристиками биопродуктивности вод, чем, например, параметры вертикальной циркуляции.

Среднегодовалая карта вертикальной циркуляции вод на нижней границе слоя трения для западной части Северной Атлантики сходна с распределением биомассы зоопланктона. Два языка подъема вод приблизительно вдоль 50 и 40° с. ш. соответствуют двум максимумам биомассы. Однако к востоку от 35—30° з. д. в этом же районе недостаточно надежным показателем продуктивности вод явилась глубина главного термоклина и другие характеристики подъема вод (Баранов и др., 1971).

Применение температурных, а не плотностных показателей для районирования биопродуктивности вод недостаточно обосновано. Известно, что зависимость пространственного распределения морских организмов от температуры воды имеет сложный характер. С одной стороны, температура воды, как важная физическая характеристика, определяет пределы обитания и наиболее благоприятные условия су-

существования для того или иного биологического вида. Можно сказать, что она в первом приближении обозначает экологическую нишу живого организма. С другой стороны, температура воды — одна из основных физических компонент плотности, в большинстве районов Мирового океана является надежным индикатором многих динамических процессов: интенсивности переноса вод с теплыми или холодными течениями, скорости подъема глубинных вод и т. д.

Иными словами, поле температуры воды, его пространственная изменчивость во многом определяет характер поля плотности. Это свойство температуры ярко проявляется в местах ее максимальных градиентов там, где холодные воды выносятся далеко на юг или теплые — на север (в северном полушарии). Однако, хотя во многих случаях параметры поля температуры с успехом заменяют параметры поля плотности морской воды, надежнее использовать последние. Все приведенные материалы подтверждают существование по крайней мере качественной связи между выбранными характеристиками поля плотности верхних слоев моря и биопродуктивностью вод. Параметры поля плотности  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l}$ ,  $\Delta \sigma_{t(200)}$ ,  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta z}$ ,  $H$  по-разному влияют на биопродуктивность вод.

Горизонтальный градиент плотности или первая производная плотности по расстоянию  $\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l}$  непосредственно не связан с продукционными процессами в океане, однако связан с такими важнейшими динамическими процессами, определяющими продуктивность вод, как апвеллинги, геострофические переносы, взаимодействие вод различного происхождения и т. п. На его распределение мало влияет сезонный ход процессов в верхних слоях гидросферы, широтная физико-географическая зональность, особенности вертикальной зональности океанических вод.

Универсальность этой важной характеристики в любом районе Мирового океана и ее значение для биопродуктивности океанических вод позволяют дать ей специальное название — океанографический показатель фронтальности. Этот показатель, безусловно, отражает общий уровень неравномерности поля плотности поверхностных слоев океана, показывает потенциальную возможность механического накопления организмов первых трофических уровней. Влияние океанографического показателя фронтальности на рыб и других животных менее очевидно.

На этом трофическом уровне фаунистический состав определенного района гораздо более важен. Однако немало фактов свидетельствует о наличии связей, хотя и не казуальных, а структурных, между распределением океанографического показателя фронтальности или других (например, температурных) характеристик фронтальности и промысловыми организмами.

Массовые скопления промысловые организмы образуют в районах полярных фронтов (Колесников, 1967; Зинкевич, 1970). В тропических районах вблизи гидрологического фронта отмечены наибольшие скопления кальмаров и тунцов (Белевич, 1970).

Высокую продуктивность фронтов и фронтальных зон связывают с продолжительностью периода интенсивной вегетации массовых видов планктона в местах схождения вод с разными физико-химическими свойствами и с усилением процессов вертикального обмена (Федосов, 1962). По Г. К. Ижевскому (1958), при любой урожайности планктона и сроках его размножения фронтальная зона всегда играет существенную роль как место наиболее длительного откорма рыб.

Как правило, исследовались крупные океанические фронты, разделяющие основные водные массы — полярные и субполярные, субполярные и субтропические и т. д. Более универсальный характер применения принципов фронтальности наблюдается в океанологии крайне редко, главным образом, в промысловой океанографии.

Так называемый вторичный полярный фронт, разделяющий арктические воды из Баффинова залива и воды Лабрадорского моря атлантического происхождения, проходит вдоль основной ветви Лабрадорского течения, образуя цепь известных промысловых районов (Elizagor, 1965). В море Скотия — известном районе массовых скоплений макропланктона была выделена продуктивная вторичная фронтальная зона, отделяющая воды Антарктического циркумполярного течения от вод моря Уэдделла (Солянкин, 1969).

Детализация представлений о поверхностной океанической структуре Мирового океана все более убеждает нас в том, что значение параметра  $\frac{\Delta \rho}{\Delta l}$  (и отчасти  $\frac{\Delta T}{\Delta l}$ ) для биопродуктивности вод имеет универсальный характер.

Характеристики вертикальной структуры поля плотности, из которых важнейшими для биопродуктивности вод являются  $(\max) \frac{\Delta \rho}{\Delta z}$  и  $H$ , отражают потенциальную возможность образования органического углерода, становления биомассы растений и животных первых трофических условий. Обе эти характеристики следует назвать океанографическими показателями устойчивости фотосинтеза, продукционного процесса. Как показателями результатов расчетов, географически наилучшую связь с биопродуктивностью вод обнаруживает глубина максимума вертикального градиента плотности. Однако эту характеристику невозможно рассматривать без максимального вертикального градиента плотности, поскольку ниже какого-то предела этой величины любые значения  $H$  не будут благоприятствовать продукционному процессу.

Общие принципы и различия в характере воздействия на компоненты биосферы океанографического показателя фронтальности и океанографического показателя устойчивости фотосинтеза предопределяют обязательность их совместного (комплексного) использования при дифференциации географических районов океана по продуктивности вод.

Еще одна важная особенность этих показателей заключается в их независимости от динамических явлений биосферы. Такие важные для продуктивности вод характеристики внешней среды, как содержание минерального азота, фосфора, некоторых других биогенных веществ и растворенных газов, связаны с ходом развития водорослей и потому далеко не всегда могут быть достаточно надежными показателями продуктивности вод. Характеристики поля плотности поверхностной структуры океана свободны от таких недостатков. Однако, разумеется, они показывают лишь потенциальные возможности продуцирования, их использование сводится к фоновому диагнозу пространственного распределения основных компонентов продуктивности.

Тем не менее в масштабах океана характеристики продуктивности вод в общем соответствуют величинам океанографического показателя фронтальности и океанографического показателя устойчивости фотосинтеза, взятым в определенных диапазонах (табл. 3).

Все приведенные в табл. 3 океанографические показатели в некоторых случаях и порознь отражают уровень биопродуктивности вод. Например, максимальные величины биомассы планктона могут наблюдаться при условиях, когда показатель фронтальности больше 5 усл. ед.

(I диапазон), а показатель устойчивости продуцирования превышает 20 м (II диапазон). В других случаях при высокой продуктивности показатель устойчивости продуцирования может относиться к I диапазону, а показатель фронтальности — ко II диапазону. Соответственно этому минимум биомассы планктона может быть связан и с величинами океанографического показателя фронтальности меньшими 0,5 м, и со значениями океанографического показателя устойчивости фотосинтеза, превышающими 75 м.

Таблица 3

Соответствие величин первичной продукции, биомассы фито- и зоопланктона океанографическим показателям биопродуктивности

Градации	$\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta l} \cdot 10^3$	$\frac{\Delta \sigma_t}{\Delta z}$	$H \left( \frac{\Delta \sigma_t}{\Delta z} \right)_{\max}$	Первичная продукция				Биомасса, мг/м <sup>3</sup>	
				по Е. Стиману—Нильсену, г		по Кобленц—Мишке и Ведерникову		фитопланктона (по Семиню)	зоопланктона (по Виноградову)
				С/сутки	С/год	мг С/м <sup>3</sup> в сутки	биомасса С фито, мг С/м <sup>3</sup>		
I	>5	$\begin{matrix} >2 \\ (40-60^\circ \text{ с. ш.}) \\ 10 \\ (10-30^\circ \text{ с. ш.}) \end{matrix}$	<10	0,5—3,0	200—1100	50	500 (50—5000)	100—1000	>100
II	2—5	—	10—30	0,2—0,5	70—200	10	25 (0,5—50)	—	—
III	0,5—2	—	30—75	0,1—0,2	35—70	—	—	—	—
IV	<0,5	$\begin{matrix} 0-5 \\ (40-60^\circ \text{ с. ш.}) \\ 5 \\ (0-30^\circ \text{ с. ш.}) \end{matrix}$	75	0,05	20	1	0,01 (0,001—0,05)	0,5—0,1	<10

Видимо, океанографические показатели биопродуктивности вод дополняют друг друга. В Атлантическом океане в распределении океанографического показателя продуктивности почти не проявляется широтная зональность, характерная для многих других характеристик физико-географических условий в океане, однако прослеживается так называемая циркумконтинентальная зональность.

В районах океана, значительно удаленных от берегов, в распределении океанографического показателя продуктивности заметны черты пятнистости, полосатости, характерные для распределения характеристик биосферы. Однако фактов, подтверждающих связь компонентов океанографического показателя продуктивности и биосферы в районах пятен, мало. Значительно более достоверна связь пространственного распределения океанографического показателя продуктивности и продуктивности вод с мощными геострофическими переносами и зонами взаимодействия вод различного происхождения.

### Заключение

Неравномерность биологической продуктивности вод Атлантического океана вызвана пространственными аномалиями интенсивности некоторых динамических явлений (мощные геострофические переносы, прибрежные ветровые апвеллинги, фронтальные зоны и т. п.).

Влияние на биопродуктивность физико-химических свойств морских вод более всего заметно в районах экстремальных значений таких характеристик, как температура воды, содержание растворенного кислорода, биогенных веществ и др. Однако в большинстве случаев само пространственное распределение физико-химических свойств является функцией динамики океанических вод.

Неравномерность распределения динамических структур Атлантического океана и особенно поля плотности поверхностных слоев моря, определяющая географическое районирование биопродуктивности, хорошо выражается первыми производными или градиентами плотности морской воды по расстоянию и глубине.

Горизонтальный градиент плотности морской воды (параметр  $\frac{\Delta \rho}{\Delta l}$ ) назван нами океанографическим показателем фронтальности, а максимальный вертикальный градиент плотности и его расстояние от поверхности моря [(параметры  $\frac{\Delta \rho}{\Delta z}$ )<sub>max</sub> и  $H$ ] — океанографическими показателями устойчивости фотосинтеза.

Результаты расчетов по материалам конкретных экспедиций и по усредненным данным, приведенным к центрам пятиградусных и одоградусных квадратов, показывают связь между величинами океанографических показателей фронтальности и устойчивости фотосинтеза и показателями биотических условий в Атлантическом океане.

Значения океанографического показателя фронтальности, по-видимому, имеют универсальный характер по отношению к характеристикам биопродуктивности вод для всего океана и любого времени года. Связь величин океанографического показателя устойчивости фотосинтеза с биопродуктивностью носит более сложный характер, зависящий от принадлежности района к определенной физико-географической зоне (экваториально-тропическому поясу или поясу умеренных и высоких широт) и от конкретного сезона года.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Аноним. Результаты гидрофизических наблюдений в северной части Атлантического океана на НИС «Михаил Ломоносов» в 1957—1958 гг. — Труды морского гидрофизического института, 1962, т. 21.

Белевич Р. Р. Циркуляция вод и зоны возможных промысловых концентраций тунцов. — Рыбное хозяйство, 1970, № 1, с. 6—9.

Богоров В. Г. Продуктивность океана. Первичная продукция и ее использование в пищевых целях. — Второй международный океанографический конгресс. Тезисы докладов, 1966, с. 48.

Виноградов М. Е. Зоопланктон. — В кн.: Биология океана. М., 1977, с. 65—68.

Владимирская Е. В. Распределение и сезонные изменения биомассы зоопланктона в северо-западной части Атлантического океана. — Труды ВНИРО, 1972, т. 77, с. 38—70.

Владимирская Е. В., Елизаров А. А., Мовчан О. А. Сезонная динамика планктонных экосистем Ньюфаундлендской банки. — Симпозиум «Гидробиология и биогеография шельфов холодных и умеренных вод Мирового океана». Тезисы докладов, 1974, с. 105—106.

Волковинский В. В. Применение двухслойной системы для расчета первичной продукции морских вод. — Океанология, 1967, т. 7, вып. 6, с. 1037—1052.

Гершанович Д. Е. Аномалия зональности Мирового океана и некоторые вопросы биологической продуктивности. — Труды ВНИРО, 1976, т. 112, с. 55—71.

Гордеева К. Т. Количественное развитие зоопланктона в восточной части экваториальной Атлантики. — Труды АтлантНИРО, 1970, вып. 27, с. 199—215.

Грезе В. Н. Биологическая структура и продуктивность пелагиали тропической Атлантики. — В кн.: Планктон и биологическая продуктивность тропической Атлантики. Киев, 1971, с. 214—252.

Елизаров А. А. Гидрологические условия в районе Ньюфаундлендских банок в 1957—1958 гг. — Научно-технический бюллетень ПИИРО, 1959, № 1 (9), с. 9—14.

Елизаров А. А. Некоторые результаты океанологических исследований в промысловых районах у Юго-Западной Африки. — Океанология, 1967, т. 7, вып. 3, с. 455—449.

- Елизаров А. А., Мовчан О. А. Особенности вертикальной циркуляции вод и распределения фитопланктона в северо-западной части Атлантического океана. — *Океанология*, 1973, т. 13, вып. 4, с. 662—668.
- Елизаров А. А., Щербинин А. Д. Океанологические основы пространственного распределения планктона в Северной Атлантике. — *Труды ВНИРО*, 1979, т. 136.
- Зернова В. В. Особенности распределения фитопланктона в тропических водах Атлантического океана. — I съезд советских океанологов. Биология. Тезисы докладов, 1977, вып. 2, — 80 с.
- Зинкевич В. Н. Распределение сельди на банке Джорджес и в смежных водах. — *Труды АтлантНИРО*, 1970, вып. 28, с. 111—134.
- Зубов Н. Н. Динамическая океанология. — М.: Гидрометеиздат, 1947. — 430 с.
- Ижевский Г. К. Воды полярного фронта и распределение атлантических сельдей. — М.: ВНИРО, 1958, с. 3—25.
- Исследования циркуляции и переноса вод Атлантического океана [Е. И. Баранов, В. А. Бубнов, Р. П. Булатов, И. В. Привалова]. — *Океанологические исследования*, 1971, № 22.
- Кляшторин Л. Б. Первичная продукция и фосфаты в Атлантическом океане. — *Океанология*, 1964, т. 4, вып. 2, с. 311—312.
- Кобленц—Мишке О. И., Ведерников В. И. Первичная продукция. — В кн.: *Биология океана*, М.: 1977, с. 183—208.
- Колесников В. Г. Океанологические основы рыбопромысловых прогнозов в Норвежском море. — Калининград, 1967. — 155 с.
- Максимова М. П. Элементы баланса биогенных соединений азота, фосфора и кремния в Индийском океане. — *Труды ВНИРО*, 1977, т. 119, с. 80—86.
- Марти Ю. Ю., Мартинсен Ю. В. Проблемы формирования и использования биологической продукции Атлантического океана. — М.: Пищевая промышленность, 1969. — 268 с.
- Мовчан О. А. Весенний фитопланктон западной части Атлантического океана. — *Труды ВНИРО*, 1962, т. 46, с. 315—323.
- Моисеев П. А. Биологические ресурсы Мирового океана. — М.: Пищевая промышленность, 1969. — 340 с.
- Седых К. А. О прибрежном апвеллинге у северо-западного побережья Африки. — *Труды АтлантНИРО*, 1977, вып. 72, с. 28—36.
- Семина Г. И. Фитопланктон. — В кн.: *Биология океана*. М., 1977, с. 58—62.
- Солянкин Е. В. Об изменчивости в положении фронтальной зоны моря Скотия. — В кн.: *Мировое рыболовство*. М., 1969, с. 42—48.
- Стоммел Г. Гольфстрим: перевод с английского. — М., ИЛ, 1963. — 228 с.
- Тропические циклонические макроциркуляционные системы и их роль в формировании природы океана / [В. Г. Богоров, М. Е. Виноградов, В. Н. Степанов, К. В. Морозкин, Р. П. Булатов]. — *Труды ИОАН СССР*, 1973, т. 95, с. 7—13.
- Федосов М. В. Исследования условий формирования первичной продуктивности в Северо-Западной Атлантике. — В кн.: *Советские рыбохозяйственные исследования в северо-западной части Атлантического океана*. М., 1962, с. 125—136.
- Филатова З. А. Глубоководная донная фауна. — В кн.: *Биология океана*. М., с. 88—95.
- Anonymous. Environmental surveys. Norweslant 1—3, 1963, ICNAF Spec. Publ. 1968, N 7, Part II Dartmouth, Canada, 286 p.
- Dietrich, G., Kalle K., Allgemeine Meereskunde, 1957, Berlin, 492 p.
- Dinsmore Robertson P. Ice and its drift into the North Atlantic Ocean, ICNAF Spec. Publ. 1972, Dartmouth, Canada, p. 89—127.
- Eli zar ov, A. A. Long-term variations of oceanographic conditions and stocks of the cod observed in the areas of West Greenland, Labrador and Newfoundland, ICNAF Spec. Publ. 1965, N 6, Dartmouth, Canada, p. 827—832.
- Fournier, R. O., Marra J., Bohrer, R., Van Det M. Plankton dynamics and nutrient enrichment of the Scotian shelf. *J. Fish. Res. Bd. Canada*, 1977, v. 34, N 7, p. 1004—1018.
- Fuglister, F. G. Atlantic Ocean atlas. Woods Hole Oceanographic Institutions, Atlas ser. 1960, v. 1, 210 p.
- Hill, H. W., Lee, A. J. The effect of wind on water transport in the region of the Bear Island fishery. *Proc. of the Royal Soc.* 1957, v. 148, p. 13—29.
- Neshyba, S. Upwelling by iceberg. *Nature*, 1977, v. 267, N 5611, p. 507—508.
- Neumann, G., Pierson W. J. Principles of physical oceanography. Prentice-Hall Inc., 1966, Englewood Cliffs, N. Y. 545 p.
- Rosby, C. G. Dynamics of steady ocean currents in the light of experimental fluid mechanics. *Papers in Phys. Oceanogr. and Meteor.* 1936, 5(1), p. 3—36.
- G. Schott. Geographie des Atlantischen Ozeans, 3 Aufl. Hamburg, 368.
- Stee man-Nielsen, E. Light and the organic production in the sea. *Rapp. et Proces-Verbaux Reunions. Cons. Perm. Intern. Mer*, 1958, N 144, p. 141—148.
- Uda, M., Ichino M. Enrichment pattern resulting systems in relation to fishery grounds, *J. the Tokyo Univ. of Fish.* 1958, v. 44, N 1—2, p. 105—129.

S U M M A R Y

The nonuniformity of the principle dynamical structures of the Atlantic and density fields of the surface layers which are responsible for the geographic distribution of bioproductivity is well expressed by the first derivative or density gradients of sea water with regard to the distance and depth.

The results of certain expeditions and average data reduced to the centres of 5°- and 1°-squares were used to estimate values of horizontal and vertical density gradients, maxima of vertical density gradients and distances from them to the sea surface. The results obtained indicate that the values of density gradients are closely related to the characteristics of biological conditions in the Atlantic.

УДК 551.465.(261.6)

**ДИНАМИКА ВОД ЮГО-ЗАПАДНОЙ АТЛАНТИКИ  
 И ОСОБЕННОСТИ ЗАЛЕГАНИЯ ПИКНОКЛИНА**

**В. Н. Зырянов**

В предлагаемой работе речь пойдет о двух районах Юго-Западной Атлантики — Фолклендско-Патагонском и море Скотия. Море Скотия — основной район распространения вод Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) после прохождения им пролива Дрейка, а в Фолклендско-Патагонском районе распространена его северная периферия, т. е. оба эти района находятся под влиянием вод одного и того же течения.

Численный расчет динамики вод моря Скотия был проведен ранее (Зырянов и др., 1976), а для Фолклендско-Патагонского района разными авторами были сделаны попытки рассчитать циркуляцию вод динамическим методом либо за пределами 200-мильной зоны (Ковалев и Федосеев, 1977), либо в некоторых участках района (Масленников и Парфенович, 1979). Результаты полного расчета течений этого района, частично освещенные Зыряновым и Северовым (1979), приведены ниже.

**Диагностический расчет циркуляции вод Фолклендско-Патагонского района.** Расчет проводился в рамках обобщенной модели Экмана бароклинного океана (Зырянов и др., 1976). Это означает, что движение рассматривалось как установившееся, бездивергентное, нелинейные ускорения малы по сравнению с ускорением Кориолиса, учитывался только вертикальный турбулентный обмен количеством движения.

Исходная система уравнений имеет вид

$$A \frac{\partial^2 \vec{V}}{\partial z^2} + \Omega \vec{k} \times \vec{V} = g \nabla \left( -\xi + \frac{1}{\rho_n} \int_0^z \rho' dz \right), \quad (1)$$

$$(\nabla, \vec{V}) + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

где  $A$  — коэффициент вертикального турбулентного обмена количеством движения ( $A = 200 \text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ );

$\vec{V} = (u, v)$  — вектор горизонтальной скорости течения;

$\Omega$  — параметр Кориолиса;

$\vec{k} = (0, 0, 1)$  — единичный вектор, направленный вертикально вниз;

$g$  — ускорение силы тяжести;

$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$  — вектор Гамильтона;