

УДК 551.464.38:551.465.46

Гидрохимические показатели первичной продукции в зонах Перуанского и Канарского апвеллингов

Л. А. Духова, В. В. Сапожников

Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГУП «ВНИРО», г. Москва)

e-mail: marecol@vniro.ru

Показано, что общие черты динамики вод и принципиальная схема процессов формирования зон повышенной биологической продуктивности районов Канарского и Перуанского апвеллингов очень схожи. Различия в продуктивности вод этих районов определяются региональными особенностями режима подъёма и гидрохимическими параметрами промежуточных вод, поднимающихся к поверхности. Основным их источником в северной части Перуанского и южной части Канарского апвеллингов являются воды подповерхностного течения прижатого к материковому склону и направленного к полюсу, в остальных районах исследованных экосистем это воды Перуанского и Канарского течений. На основании гидрохимических данных оценена биологическая продуктивность вод Канарского и Перуанского апвеллингов. Полученные значения хорошо согласуются с данными прямых измерений.

Ключевые слова: апвеллинг, биогенные элементы, подповерхностное течение, первичная продукция.

ВВЕДЕНИЕ

Канарский и Бенгельский апвеллинги в Атлантическом океане, Калифорнийский и Перуанский в Тихом являются районами повышенной биологической продуктивности. В соответствии с теорией Экмана, устойчивые пассатные ветра, дующие вдоль западных берегов Африки и Америки, вызывают в Северном полушарии перенос поверхностных вод с отклонением вправо (в Южном — влево) от направления ветра. Возникающий при этом дефицит массы компенсируется направленным к берегу подповерхностным течением, которое ведёт к подъёму в эвфотический слой промежуточных вод с повышенным со-

держанием биогенных элементов. При этом в верхнем слое океана создаются благоприятные условия для первичного продуцирования и развития фито- и зоопланктона, которые служат кормовой базой массовым пелагическим видам рыб. Рассмотренные экосистемы относятся к зонам апвеллинга умеренных и низких широт, где для образования первичной продукции огромное значение имеет гидрохимический режим вод [Koblentz-Mishke et al., 1970; Аржанова, Буркальцева, 1986]. Это в значительной степени определяет научно-практический интерес к исследованиям гидрохимической основы биопродуктивности этих районов.

Широкий комплекс гидролого-гидрохимических работ, выполненный авторами у северо-западного побережья Африки и берегов Перу, позволил выявить общие закономерности формирования биологической продуктивности вод и основные гидрохимические и динамические характеристики, влияющие на этот процесс, а также оценить первичную продукцию экосистем по гидрохимическим показателям.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основными материалами для оценки и анализа пространственно-временной изменчивости биопродуктивности вод экосистемы Канарского апвеллинга послужили результаты экспедиций АтлантНИРО, выполненных в 1994–2008 гг. в холодный и тёплый периоды года у северо-западного побережья Африки. Съёмки проводились между 16° и 33° с.ш. в виде широтных параллельных разрезов. Количество станций и длина галса на каждом разрезе определялись исходя из местных особенностей рельефа (ширины мелководного участка шельфа, крутизны материкового склона и т.п.). Количество станций на разрезах варьировало от 3 до 5, а длина разрезов — от 100 до 200 км. Крайние станции у берега выполнялись над глубинами 20–25 м, а по периферии шельфа и в районе материкового склона над глубинами 1500–2000 м. Расстояние между разрезами составляло около 15 морских миль (27 км).

Гидрологические станции выполнялись STD-зондами типа SBE-19+ (Sea-Bird Electronics). На всех стандартных горизонтах определялся растворённый кислород и минеральный фосфор. В летний период 2006–2008 гг. получены данные по содержанию минеральных форм азота (нитритов, нитратов и аммония) и растворённого кремния. Все определения проводились согласно аттестованным методикам, принятым в морской химии с погрешностями, допустимыми для используемых методов [Руководство..., 2003].

При обсуждении Перуанского апвеллинга использовались результаты 17-го рейса НИС «Академик Курчатов» (1974 г.) в районы Фальса-Пименталь и Кальяо-Писко ($5\text{--}8^\circ$ ю.ш.).

Для оценки первичной продукции в районе Перуанского апвеллинга также использовались гидрохимические данные, приведённые в литературе [Walsh, 1971; Bruland, 2005].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Район Канарского апвеллинга расположен у северо-западного побережья Африки ($15\text{--}36^\circ$ с.ш.) от Гибралтарского пролива до островов Зелёного мыса, а Перуанский апвеллинг простирается от 4° ю.ш. до 40° ю.ш. вдоль берегов Южной Америки. При принципиальной схожести основ формирования зон повышенной биологической продуктивности отмечают различия в гидрометеорологических и динамических условиях в этих районах.

Огромное значение имеют конфигурация берега, ширина шельфа, рельеф дна и система местных ветров, в зависимости от которых образуются квазистационарные циклонические круговороты, где происходит локальный подъём вод к поверхности. На северо-западе Африки шельф довольно широкий и мелководный и сразу переходит в крутой континентальный склон, шельфовая зона варьирует от 20 до 80 км, а на участке от 26° до 19° с.ш. достигает 130 км. Центры апвеллинга расположены в середине шельфа на расстоянии 30–50 км от берега (например, на 23° с.ш.) или по кромке шельфа. На Перуанском побережье узкий шельф граничит с крутым континентальным склоном, ширина шельфа, как правило, не больше 25 км (только в отдельных районах достигает 100 км), и центры апвеллинга находятся близко к берегу.

Центральная часть Канарского апвеллинга ($20\text{--}25^\circ$ с.ш.) и северная часть Перуанского ($4\text{--}18^\circ$ ю.ш.) характеризуется сильными пассатными ветрами в течение всего года и, как следствие, круглогодичным апвеллингом. На акватории севернее 25° с.ш. у берегов Африки апвеллинг интенсивнее в летний период, южнее 20° с.ш. апвеллинг проявляется зимой и достигает южной части мыса Зелёный [Pelegri, 2006], что связано с сезонной изменчивостью широтно-долготного положения Азорского антициклона, экваториальной ложбины и, соответственно, интенсивности и положения зоны северо-восточных пассатов. У берегов Перу своего максимума апвеллинг достигает в зим-

ний период (для южного полушария), когда усиливаются юго-восточные пассаты.

Сезонность и межгодовая изменчивость интенсивности пассатных ветров, наряду с региональными особенностями снабжения эвфотического слоя биогенными элементами определяют изменчивость продуктивности экосистем Канарского и Перуанского апвеллингов. Природу поднимающихся в зоне апвеллинга вод определяет крупномасштабная циркуляция вод Атлантического и Тихого океанов. Многолетние океанологические исследования позволили выяснить картину поверхностных и подповерхностных течений, установить районы подъёма, океанографические и биохимические режимы вод Канарского и Перуанского апвеллингов [Mittelstaedt, 1991; Barton, 1998; Mackas et al., 2006; Arístegui et al., 2009].

Несмотря на все региональные различия общая картина мезомасштабной циркуляции вод в основных зонах апвеллинга очень схожа. У берегов северо-западной Африки в Атлантическом океане [Barton, 2001], как и у берегов Перу в Тихом океане [Wyrтку, 1967], мы наблюдаем прибрежную и океаническую ветви поверхностных течений, направленных к экватору, и подповерхностное течение, направленное к полюсу. Направленные к экватору потоки Канарского течения у северо-западного побережья Африки и Перуанского у берегов Южной Америки располагаются над шельфом и материковым склоном, компенсационные подповерхностные течения прижаты к материковому склону и заглубляются при продвижении к полюсам (рис. 1).

ПЕРУАНСКИЙ АПВЕЛЛИНГ. При значительной изученности экосистем Перуанского и Канарского апвеллингов, эти районы динамически очень сложны. Основной поток Перуанского течения, наблюдаемый у берегов Чили, является ответвлением северной части Антарктического циркумполярного течения. Поворот циркумполярного течения вызван столкновением с материком Южной Америки и соответствует общей схеме циркуляции этого района. Широкой полосой это течение движется на север до 25° ю.ш., затем поток раздваивается на Океаническое Перуанское течение (ОПТ) и Прибрежное Перуанское течение (ППТ) (рис. 2).

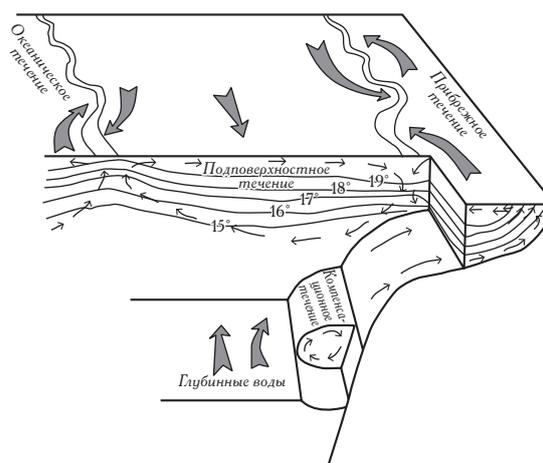


Рис. 1. Блок-схема течений и распределения температуры в Перуанском районе [Сапожников, Зубаревич, 1985]

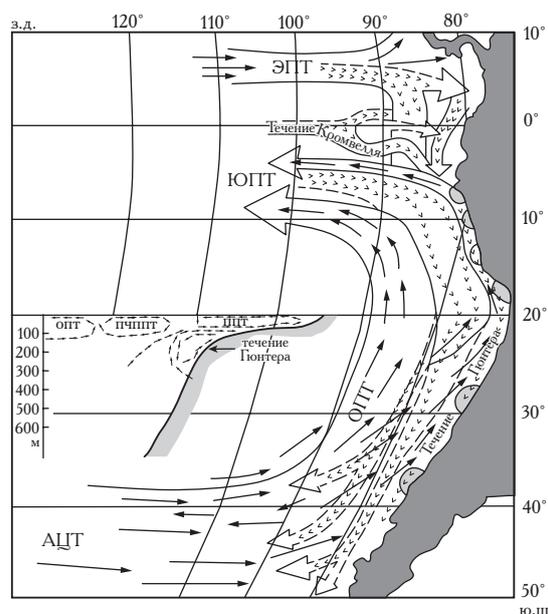


Рис. 2. Схема поверхностных и подповерхностных течений юго-восточной части Тихого океана и схема апвеллинга [Сапожников, Ширяев, 1983]

Океаническая ветвь проходит на расстоянии 300–400 км от берега. Прибрежное Перуанское течение (течение Гумбольдта) распространяется вдоль берега, ограничиваясь со стороны океана изобатой 100 м. На большей части Перу-Чилийского шельфа скорость этого течения не превышает 20–60 см/с, к северу оно усиливается и несколько увеличивается его ширина. На 5–8° ю.ш. скорости Прибрежного Перуанского течения увеличивают-

ся до 80–100 см/с [Zuta, Guillen, 1970]. Не доходя до экватора, на 4–6° ю.ш., этот поток резко поворачивает на запад, сливаясь с Южным Пассатным течением (ЮПТ), а на его северной границе образуется мощная градиентная зона, отождествляемая с экваториальным фронтом.

Между океанической и прибрежной ветвью Перуанского течения вклинивается Перу-Чилийское Подповерхностное Противотечение (ПЧППТ), воды которого формируются из Экваториального Противотечения (ЭПТ). В систему течений включаются также воды подповерхностного противотечения, проходящего под водами ЮПТ и подповерхностного течения Кромвелла. После Галапагосских островов одна из ветвей подповерхностного течения поворачивает на юго-восток, образуя Перу-Чилийское подповерхностное течение (течение Гюнтера). Воды этого течения, обогащённые биогенными элементами с низким содержанием кислорода (менее 0,5 мл/л), являются основным источником поднимающихся к поверхности вод в северной части Перуанского апвеллинга (4–18° ю.ш.) [Nelson, Neshyba, 1979; Brink et al., 1983] и поднимаются на поверхность с глубин 30–100 м. Ядро этих вод движется на юг в пределах 180 км от берега над материковым склоном на глубине 100–150 м со скоростью 15 см/с. На акватории южнее 18° ю.ш. течение Гюнтера постепенно заглубляется, и основным источником апвеллинговых вод становятся воды Перуанского течения.

Разделить подповерхностные воды по термохалинным характеристикам не представляется возможным, но по гидрохимическим параметрам легко выделяются воды течения Кромвелла, которые обнаруживаются южнее 5° ю.ш. и несут повышенные концентрации кислорода. На фоне бескислородных вод хорошо заметен резкий («кинжальный») максимум кислорода [Сапожников, Метревели, 1982; Сапожников, Ширяев, 1983].

Над шельфом Перу в результате воздействия пассатов и местных северных ветров, а также орографических факторов, образуются интенсивные циклонические вихри малого диаметра, которые расположены в виде пятен вдоль побережья от 6–7° до 30–35° ю.ш.

и выделяются повышенной концентрацией биогенных элементов и низким содержанием кислорода (рис. 3). Иногда в периоды наиболее интенсивного апвеллинга концентрация фосфатов в центрах подъёма вод составляла более 3 мМ, что значительно превышает содержание фосфатов в Канарском апвеллинге. В таблице 1 приведены средние концентрации основных биогенных элементов в очагах Перуанского и Канарского апвеллингов.

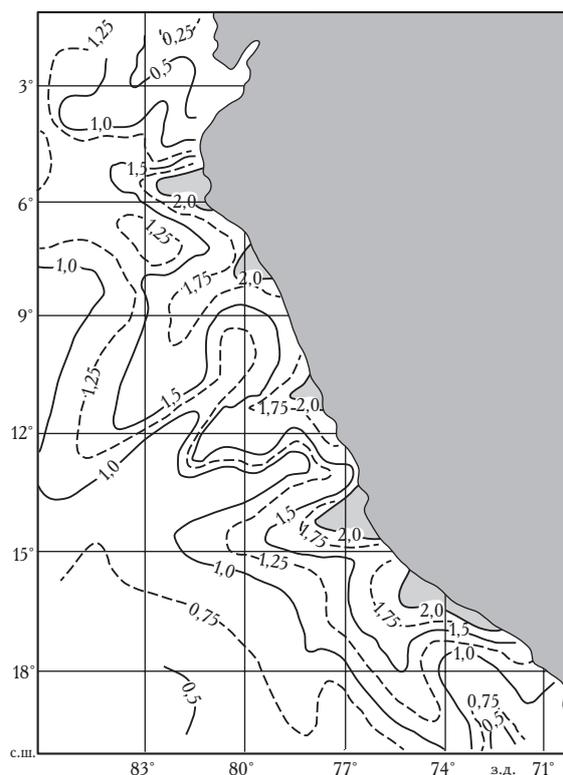


Рис. 3. Распределение фосфатов (µM) на поверхности вдоль берегов Перу (выделены области прибрежного апвеллинга)

Сравнивая распределение нитратов и фосфатов в поверхностном слое в Перуанском апвеллинге зимой и летом (для южного полушария) можно видеть, что в холодный сезон вынос биогенных элементов в поверхностный слой резко возрастает.

Зимой процентное содержание кислорода во всём Перу-Чилийском районе едва достигает 100%, а на участках, которые расположены в районах с максимальными концентрациями фосфатов и нитратов, опускается до 75–80%, что свидетельствует о преобладании динами-

ческого подъёма вод над скоростью продукционно-деструкционных процессов. Летом поверхностные воды пересыщены кислородом до 103–110%. В летний же период обостряется и поднимается до глубин 50–75 м слой кислородного минимума, где содержание кислорода падает до 0,1 мл/л. Субанаэробные условия инициируют процессы денитрификации и образование нижнего минимума нитратов и максимума нитритов. Глубина перемешанного слоя составляет 40 м, субанаэробные условия начинаются уже с 70 м, при этом концентрация нитратов падает до 14 μM , содержание восстановленных нитритов достигает 7 μM [Bruland et al, 2005].

В условиях интенсивного фотосинтеза в зоне Перуанского апвеллинга, где органическое вещество в значительном количестве поступает в донные отложения, при недостаточном вертикальном перемешивании вод под термоклином усиление гипоксии иногда приводит к сероводородному заражению [Dugdale et al., 1977]. Это явление свидетельствует не только о безвозвратной потере органического вещества из продукционно-деструкционного цикла, но и об отсутствии бентоса и придонных видов рыб в периоды появления сероводорода.

Хотя зимой на поверхность выносятся более высокие концентрации биогенных элементов, о чём говорилось ранее, слой с максимальными вертикальными градиентами биогенов летом расположен выше, несмотря на снижение интенсивности апвеллинга, и практически

совпадает со слоем термоклина. Такая картина, казалось бы, должна привести к выводу о том, что летом вертикальные потоки интенсивнее, но значительное различие в концентрации биогенов в поверхностном слое между зимой и летом показывает, что эта ситуация вызвана не динамическими, а биохимическими причинами.

Бурное развитие фитопланктона в летний период приводит к резкому истощению запаса биогенных элементов в поверхностном слое, пересыщению его в отношении растворённого кислорода. С другой стороны, интенсификация продукционных процессов приводит к усилению «детритного дождя», что, в свою очередь, приводит к исчерпанию запасов кислорода в подповерхностных водах за счёт быстрого разложения органического вещества. Регенерация биогенных элементов при деструкции органического вещества обуславливает появление высоких концентраций фосфора и азота под термоклином и увеличение вертикальных градиентов этих характеристик. Отмечается явный парадокс — летом продукционно-деструкционные процессы идут интенсивнее, чем зимой, но при этом зимой апвеллинг интенсивнее, и наибольшая рыбопродуктивность (точнее наибольшие уловы) наблюдается именно зимой.

Отличительной особенностью Перуанского апвеллинга является влияние явления Эль-Ниньо на экосистему в целом и особенно на продуктивность района. Привычная схема течений и продукционно-деструкционных

Таблица 1. Гидрохимические характеристики поднимающихся вод и значения первичной продукции в экосистемах Перуанского [Hafferty et al., 1978; Calienes et al., 1985] и Канарского апвеллингов [Minas et al., 1982]

Район	Координаты района	Концентрация			Первичная продукция, г С/м ² в сутки
		N-NO ₃ ⁻ , μM	P-PO ₄ ⁻³ , μM	Si, μM	
Перуанский апвеллинг	4–18° с.ш.	21–27	2,2	22–31	> 4
	15–36° с.ш.	11–12	1,0	7–8	2,4
Канарский апвеллинг	Мыс Сим — мыс Гир (31,5–30,5° с.ш.)	8–9	0,9–1,0	6,5–7,5	1,3–2,4
	Мыс Кап-Блан (21° с.ш.)	14,0–14,5	0,6–0,7	4–5	1,6–3,6
	Мыс Тимирис-Нуакшот (19,5–18° с.ш.)	20	1,5	10	3,9

процессов обычно нарушается во время этого явления в начале января. Прибрежное Перуанское течение ослабляется. Экваториальный фронт размывается и тёплые экваториальные воды, прорывая экваториальный фронт и отжимая Прибрежное Перуанское течение от берега, разливаются в поверхностном слое далеко на юг. Ещё недавно считалось, что Эль-Ниньо возникает в результате локального ослабления юго-восточного пассата, однако более глубокие исследования открыли и другие связи далеко не локального характера. В 1966–1989 гг. американский метеоролог Д. Бьеркнес связал явление Эль-Ниньо с изменениями температурного режима экваториального пояса Тихого океана через Уолкеровскую (меридиональную) и Гадлеевскую (зональную) ячейки атмосферной циркуляции [Федоров, 1984]. В течение двух лет, предшествующих Эль-Ниньо, слишком сильные пассаты усиливают Южное Пассатное течение и нагоняют воду в западную часть Тихого океана, создавая наклон уровня в направлении «восток — запад». После ослабления ветра скопившаяся на западе вода устремляется на восток, вероятно, в форме внутренней экваториальной волны Кельвина. Эта волна ведёт к накоплению тёплых вод вблизи берегов Эквадора и Перу и к заглублению слоя скачка температуры. Тёплые воды, перекрывая холодные, не только прекращают апвеллинг, но и резко увеличивают вертикальную стратификацию, что затрудняет насыщение подповерхностных вод кислородом и приводит к заморам [Wyrki, 1966, 1975]. В последние годы Эль-Ниньо находится в центре внимания океанологов и рыбаков, так как катастрофические последствия 1972, 1976 и 1983 гг. привели к резкому сокращению промысла (с 12 до 1,5 млн т) и существенной перестройке всей экосистемы этого района [MacIsaac et al., 1985].

В результате резко сократилось стадо анчоуса, питающееся фитопланктоном, увеличилось количество анчоуса, питающегося зоопланктоном, возросло количество органического углерода в донных осадках и т.д. Несмотря на запрет, который был введён на лов анчоуса, экосистема после Эль-Ниньо 1976 г. не вернулась к прежнему состоянию. Особенно сильным было Эль-Ниньо 1983 г., когда тё-

плые экваториальные воды захватили Галапагосские острова и проникли на юг до 17° ю.ш.; погружаясь под поверхность, они могут достигать до $42\text{--}44^\circ$ ю.ш. Проникая в АЦТ, эти воды стимулируют активизацию субантарктической дивергенции. Особый интерес к Эль-Ниньо вызывается ещё и тем, что это явление повторяется с периодичностью в 4–18, а чаще — с периодичностью в 6–8 лет. Это даёт возможность проверять и совершенствовать гипотезы о происхождении Эль-Ниньо и уточнять численные модели тех взаимодействий атмосферы и океана, которые могут породить это явление. Таким образом, реальные шансы научиться точно предсказывать Эль-Ниньо существенно больше, чем в случае других природных катастроф [Федоров, 1984].

КАНАРСКИЙ АПВЕЛЛИНГ. По величине первичной продукции зоны апвеллингов выстраиваются в следующую последовательность: Перуанский, Бенгельский, Канарский и Калифорнийский. Более низкая биопродуктивность Канарского апвеллинга в основном связана с региональными особенностями режима подъёма и природой поднимающихся в зоне апвеллинга вод.

Значительная часть района Канарского апвеллинга находится под воздействием Канарского течения [Stramma, 1984, 1988]. Это течение следует на юго-запад вдоль побережья Северо-Западной Африки примерно до широты м. Кап-Блан (21° с.ш.) двумя потоками: океаническая и прижатая к берегу прибрежная ветви Канарского течения. В районе м. Кап-Блан океаническая ветвь Канарского течения поворачивает на запад и вливается в Северное Пассатное течение, прибрежная ветвь, которая наиболее чётко проявляется в холодный период года, продолжает движение вдоль побережья Мавритании (рис. 4).

Обладая довольно низкой температурой в районе своего формирования, воды Канарского течения при движении на юг на большом протяжении сохраняют её за счёт пополнения более холодными водами прибрежного апвеллинга. Температурный градиент заметно увеличивается, когда за счёт усиления пассатных ветров интенсифицируется поперечная циркуляция, выносящая из глубинных слоёв более

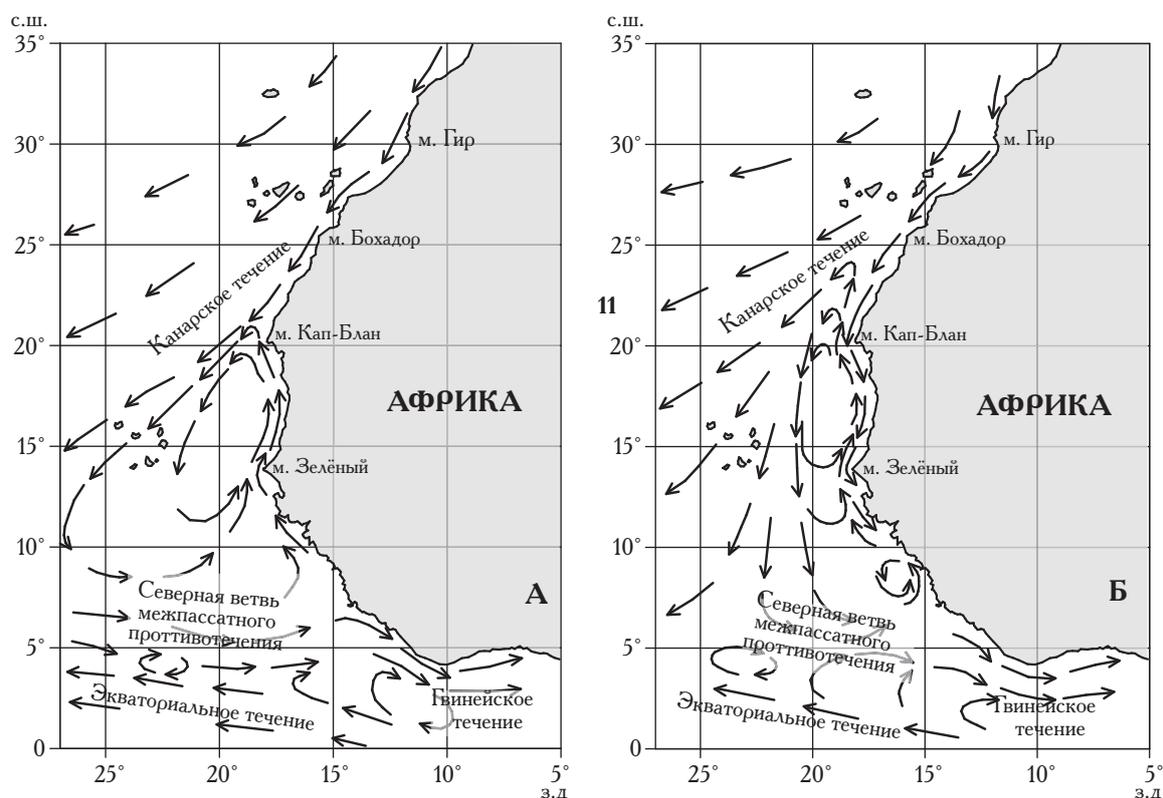


Рис. 4. Циркуляция вод на поверхности океана в Центрально-Восточной Атлантике в летний (А) и зимний (Б) сезоны [Mittelstaedt, 1983]

холодную воду. Средняя скорость Канарского течения обычно не превышает 40–50 см/с и только на отдельных участках увеличивается до 60 см/с [Wooster et al., 1976].

Важным элементом циркуляции вод в Канарском апвеллинге, как и во всех системах прибрежных апвеллингов, расположенных по восточным перифериям океанов, является подповерхностное компенсационное течение [Колесников, Хлыстов, 1970; Barton, 2001]. Подповерхностное течение образуется из вдольбереговой ветви подповерхностного течения из Гвинейского залива, а также потока вод, отделившихся от Межпассатного противотечения. Посредством этого течения осуществляется вынос из Южного океана через Экваториальную и Тропическую Атлантику в северном направлении вод субантарктического происхождения [Sarmiento, 2004]. Эти потоки соединяются у континентального склона у берегов Мавритании между 10° и 15° с.ш., образуя подповерхностное Канарское течение. Это те-

чение представляет собой довольно узкий поток шириной около 30–60 км, прижимающийся к континентальному склону [Mittelstaedt, 1978, 1991]. Максимальная скорость на глубине 150 м составляет около 10 см/с. К югу от м. Кап-Блан (21° с.ш.) подповерхностное течение находится между горизонтами 100 и 200 м и заглубляется до 500–600 м у м. Бохадор (26° с.ш.) [Hughes, Barton, 1974].

Подъём холодных вод у берегов северо-западной Африки происходит из-под слоя пикноклина с глубин 150–200 м. Таким образом, в зоне апвеллинга севернее 21° с.ш. источником поднимающихся к поверхности вод являются воды Канарского течения. Южнее 21° с.ш. поверхностный слой биогенными элементами снабжают воды подповерхностного течения. Здесь глубины от 100 до 800 м занимает Южная атлантическая центральная водная масса (ЮАЦВ) с низким содержанием кислорода и повышенной концентрацией биогенных элементов. Севернее 21° с.ш. на этих

глубинах располагается Северная атлантическая центральная водная масса (САЦВ), которая, по сравнению с ЮАЦВ, более насыщена кислородом и содержит меньше биогенных элементов. Зоной горизонтального (бокового) взаимодействия САЦВ и ЮАЦВ является район м. Кап-Блан (21° с.ш.) [Fraga et al., 1985; Глеза, 2007]. Это взаимодействие носит ярко выраженный фронтальный характер, но компенсировано по полям температуры (рис. 5а) и солёности, что приводит к слабому градиенту плотности, однако фронтальная зона

между ними хорошо выделяется по гидрохимическим показателям.

Таким образом, с севера на юг поступают воды САЦВ, более солёные, с меньшим содержанием биогенных элементов и более насыщенные кислородом, а с юга — ЮАЦВ, менее солёные, с большим содержанием биогенных элементов и меньшим содержанием кислорода. Это приводит к меридиональному увеличению с севера на юг в слоях 200–500 м концентраций минерального фосфора от 0,4–1,1 до 1,8–2,1 мкг-ат/л и уменьшению содер-

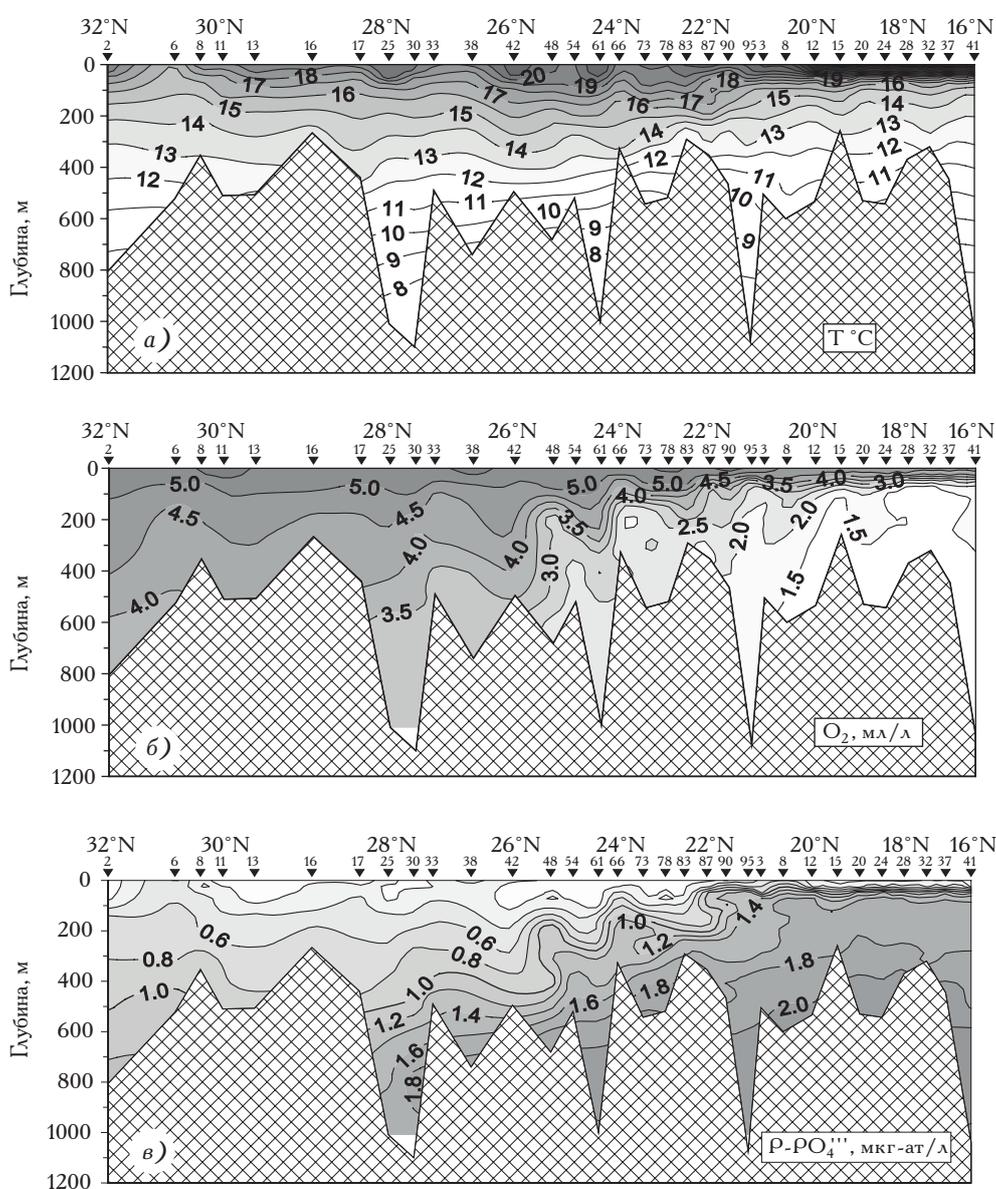


Рис. 5. Вертикальное распределение температуры (а), растворённого кислорода (б), минерального фосфора (в) на меридиональном разрезе по материковому склону от 32°00' до 16°00' с.ш. в летний период 2007 г. [Духова, 2010]

жания кислорода от 4,75–4,25 мл/л до 1,20–1,50 мл/л соответственно (рис. 5б и в).

Таким образом, характер взаимодействия и характеристики этих двух водных масс, пространственное положение границы между ними и свойства образующейся в зоне смешения воды определяют как гидрохимическую структуру вод, так и продуктивность экосистемы Канарского апвеллинга.

В районе южнее 21° с.ш., где поднимаются воды ЮАЦВ с небольшим содержанием кислорода (< 2 мл/л) на отдельных станциях в слое 100–150 м было отмечено понижение концентрации кислорода до 0,8 мл/л и образование нитратного максимума [Духова, 2010]. Сравнивая с ситуацией в Перуанском апвеллинге, где под пикноклином располагаются воды с очень низкими концентрациями кислорода (менее 0,5 мл/л) и субанаэробные условия наблюдаются уже на глубине 70 м, можно отметить, что в Канарском апвеллинге поднимающиеся воды более насыщены кислородом и процессы денитрификации не так значительны [Ryabenko et al., 2012]. Севернее 21° с.ш. несмотря на интенсивный процесс фотосинтеза слой кислородного минимума не формируется, поскольку происходит подъём вод САЦВ более насыщенных кислородом. Таким образом, интенсивность слоя кислородного минимума и процессов денитрификации в зоне апвеллинга определяется характеристиками поднимающихся вод, а минерализация органического вещества в зоне апвеллинга усиливает эти процессы.

Процесс подъёма вод у северо-западного побережья Африки имеет относительно регулярный цикл, т.к. возникает с периодичностью 7–10 дней, затем следует период релаксации, во время которого в условиях стратификации вод происходит развитие фитопланктонного сообщества. В то же время при слабом ветре, когда апвеллинг затухает, содержание биогенных элементов на поверхности снижается, что уменьшает первичную продукцию.

Продуктивность Канарского апвеллинга в условиях меняющегося климата подвержена значительным колебаниям от сезонных и межгодовых до междекадных, которые в значительной степени зависят от интенсивности пассатов и связаны с изменчивостью Севе-

роатлантического колебания (САК) [Santos et al., 2005; Wooster, 1976]. Есть некоторые примеры связи и с событиями в Тихом океане: так, период значительного ослабления апвеллинга в районе 20° с.ш. в 1982–1983 гг. совпал с периодом исключительно сильного явления Эль-Ниньо в Тихом океане [Nykjaer, Van Camp, 1994].

ОЦЕНКА ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ. В современных условиях при значительных колебаниях продуктивности экосистем прибрежных апвеллингов огромное значение приобретает её оценка по содержанию биогенных элементов в эвфотическом слое. Метод прямых измерений часто даёт заниженные значения, а измерение этих величин на больших акваториях является очень сложной задачей. Появившиеся в последнее время методы дистанционного спутникового зондирования поверхности океана позволяют провести оценку первичной продукции по содержанию хлорофилла, но интерпретация полученных данных в этом случае не всегда корректна.

В районах прибрежных апвеллингов по мере удаления поднявшихся вод от зон наиболее интенсивного их подъёма и прогрева происходит уменьшение концентрации биогенных элементов и насыщение вод кислородом (рис. 6).

Изменения гидрохимических показателей в большей степени обусловлены процессами продуцирования органического вещества, чем процессами горизонтального и вертикального перемешивания [Weichert, 1980], что подтверждается постоянством солёности в пределах 0,3‰ в поверхностном слое 0–20 м в прибрежной зоне и на периферии шельфа. Проследить изменения гидрохимических параметров позволяют система широтных разрезов, выполненных в районах круглогодичного апвеллинга у берегов Перу (рис. 6) и северо-западного побережья Африки.

Для оценки первичной продукции, использовалось атомарное соотношение Редфилда-Ричардса [Redfield, 1934; Richards, 1958], которое позволяет рассчитать количество образовавшегося органического вещества (ΔC) по уменьшению концентраций основных биогенных элементов (ΔP , ΔSi и ΔN) в поверхностном слое на широтном разрезе по уравнениям (1) — (3):

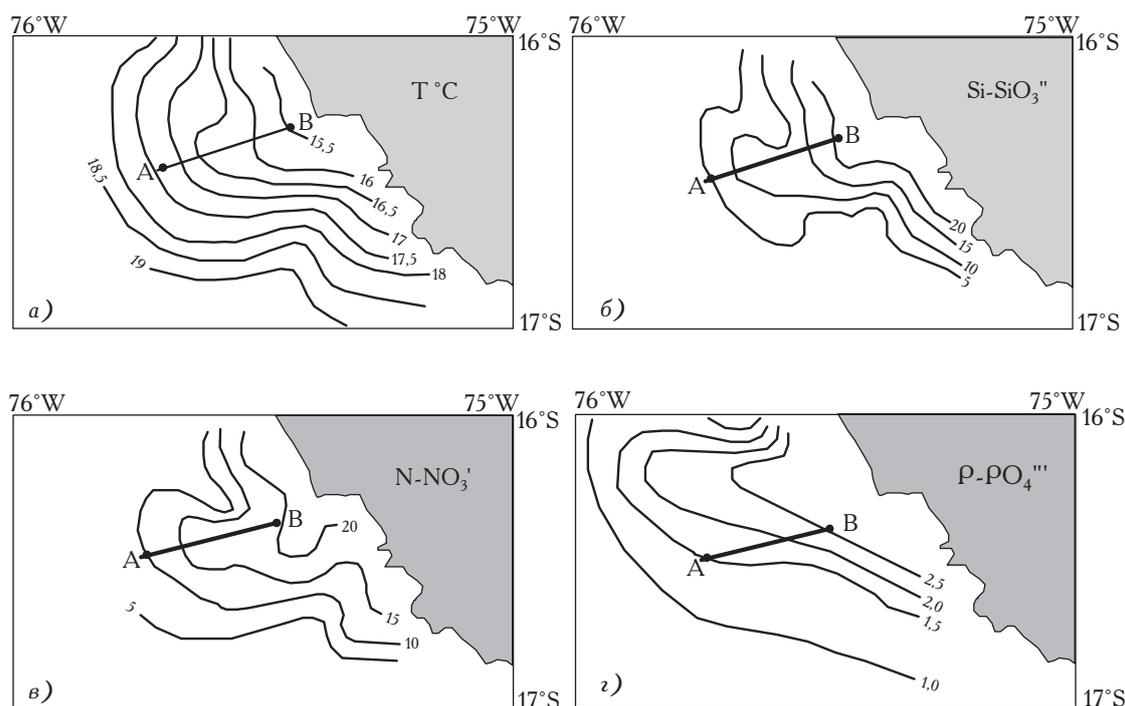


Рис. 6. Распределение температуры (T °C), концентрации нитратов (μM), кремния (μM) и фосфатов (μM) на разрезе у берегов Перу ($16\text{--}17^\circ$ с.ш.) [Walsh et al., 1971]

$$\Delta C_p = \Delta P \times 106 \times 12 \quad (1)$$

$$\Delta C_{\text{Si}} = \Delta \text{Si} \times 106 \times 12 / 23 \quad (2)$$

$$\Delta C_N = \Delta N \times 106 \times 12 / 16 \quad (3),$$

где 12 — атомный вес углерода; ΔC_p , ΔC_{Si} , ΔC_N — первичная продукция, рассчитанная по убыли минерального фосфора (ΔP), кремния (ΔSi) и суммарного азота (нитратов, нитритов и аммония) (ΔN) в поверхностном слое в мг С/м^3 соответственно.

Приведённый подход позволил рассчитать первичную продукцию по данным гидрологических съёмок у берегов Перу, выполненных Уолшем [Walsh et al., 1971] в 1970 г. При движении воды от точки В к точке А, температура повысилась от $15,5$ до $17,5$ °C. Зная, что верхний однородный слой $0\text{--}10$ м прогревается на $0,2$ °C за сутки [Weichert, 1980], можно утверждать, что водная масса достигла точки А за 10 суток. Аналогичные оценки «времени жизни» апвеллинговых вод для Перуанского апвеллинга были сделаны в работе [Стунжас, 1983]. За эти же 10 суток концентрация фосфатов уменьшилась от $2,5$ до $1,5$ μM , концентрация нитратов — от 20 до 10 μM ,

а концентрация кремния — от 20 до 5 μM . Соответственно первичная продукция, рассчитанная по убыли фосфатов, нитратов и кремния, по уравнениям (1) — (3) будет равна 127 , 80 и 83 мг С/м^3 в сутки (табл. 2).

С использованием предложенного подхода проведена оценка первичной продукции на основе гидрохимических данных, полученных в августе—сентябре 2000 г. у берегов Перу [Bruland et al., 2005] (табл. 2). Рассчитанные

Таблица 2. Значения первичной продукции, рассчитанные по гидрохимическим данным на разрезе по $16\text{--}17^\circ$ с.ш. у берегов Перу

Источник данных	Рассчитанные значения первичной продукции, мг С/м^3 в сутки		
	ПП _p *	ПП _N *	ПП _{Si} *
По данным Уолша [Walsh et al., 1971]	127	80	83
По данным Бруланда [Bruland et al., 2005]	136	90	74

* Здесь и далее ПП_p, ПП_N, ПП_{Si} — суточная первичная продукция (мг С/м^3 в сутки), рассчитанная по убыли фосфора, азота и кремния соответственно.

значения первичной продукции на разрезе по 16–17° с.ш. практически совпадают с результатами прямых определений первичной продукции — 142,8 мг С/м³ [Pennington, 2006]. Используя пространственно-временные изменения температуры, фосфатов, минерального азота и кремния в летний и зимний периоды 2006–2008 гг. получены значения первичной продукции в различных подрайонах Канарского апвеллинга. При расчёте ΔN учитывались все определяемые минеральные формы азота, включая мочевину. Результаты расчётов для летнего периода 2007–2008 гг. представлены в табл. 3.

Расчётная величина первичной продукции, соответствующая убыли минерального фосфора как для Канарского, так и для Перуанско-

го апвеллинга превышает значения первичной продукции, соответствующие убыли минерального азота и кремния. Можно считать, что расчет первичной продукции по убыли фосфатов дает наиболее репрезентативные величины суммарной первичной продукции в исследованном районе, хотя и недоучитывает их дополнительное поступление в воду в результате процессов минерализации органического вещества (рециклинга).

Для сравнения рассчитанных значений с уже имеющимися данными для различных районов Канарского апвеллинга суточная первичная продукция для летнего периода 1998 г. и 2004 г. была рассчитана с учетом величины эвфотического слоя (табл. 4). Среднее значение рассчитанной суточной первичной про-

Таблица 3. Первичная продукция, рассчитанная по Вейхарту [Weichart, 1980] в мг С/м³ в сутки для района Канарского апвеллинга севернее 21° с.ш. для летнего периода

Район	2007 г.			2008 г.		
	ПП _P	ПП _{Si}	ПП _N	ПП _P	ПП _{Si}	ПП _N
27° с.ш.	60,5	18,9	29,3	85,8	10,7	46,6
26° с.ш.	50,1	5,1	24,4	25,8	2,9	15,5
25° с.ш.	104,7	7,4	60,1	95,3	7,9	55,7
24° с.ш.	119,1	19,5	75,5	60,0	4,8	32,9
22° с.ш.	67,3	14,1	7,2	196,9	69,3	150,8

Таблица 4. Величины первичной продукции, полученные разными методами для летнего периода в районе Канарского апвеллинга

Район	Первичная продукция, мг С/м ² ·сутки		
	Рассчитанная по Вейхарту (2004 г.)	Прямые измерения (Атлант-НИРО, 2004 г.)	Литературные данные
Южнее 19° с.ш.	0,4–1,0	0,3–1,3	—
19–20,5° с.ш.	2,3–2,6	2,0–4,0	—
Севернее 24° с.ш.	0,9–1,6	0,8–0,9 ¹	—
28,5° с.ш. (М. Юби)	2,9	> 0,9	3,1 ³ 2,4 ⁴
17,6° с.ш.	2,4	> 1,3	—
31,5–30,5° с.ш.	1,8 ²		2,4 ⁴ 1,3 ⁵

¹ средние данные за 1994–1999 гг.;

² рассчитано по данным 1998 г.;

³ по данным Basterretxea и Aristegui [2000];

⁴ по данным Minas et al. [1982];

⁵ по данным Grall et al. [1982].

дукции для летнего сезона 2004 г. составило $2,3 \text{ г С/м}^2$ в сутки.

Результаты расчётного метода с использованием гидрохимических данных подтверждаются данными прямых определений первичной продукции радиоуглеродным методом, выполненных в рейсе СТМ «Атлантида» в летний период 2004 г. [Александров, 2007] и данными других авторов (табл. 4).

Полученные расчётным путём значения позволили оценить пространственно-временную изменчивость первичной продукции в летний и зимний сезоны 2006 г. (рис. 7).

Наибольшие значения первичной продукции характерны для района, расположенного

у мыса Кап-Блан от $23^{\circ}30'$ до $19^{\circ}20'$ с.ш. и являющегося районом активного промысла российского и иностранного рыболовного флота. [Santos, 2005]. Этот район приурочен к наиболее мощной системе вихревых образований. На схеме также выделяются два участка повышенной продуктивности в районе мысов Юби ($27^{\circ}57'$ с.ш.) и Сим ($31^{\circ}24'$ с.ш.). К югу от мыса Тимирис (19° с.ш.) в зимний период апвеллинг проявляется более интенсивно и рассчитанные значения первичной продукции несколько выше, чем в летний период.

Вышеописанный метод позволяет на основе гидрохимических параметров оценить биопродуктивность вод Канарского и Перуанского

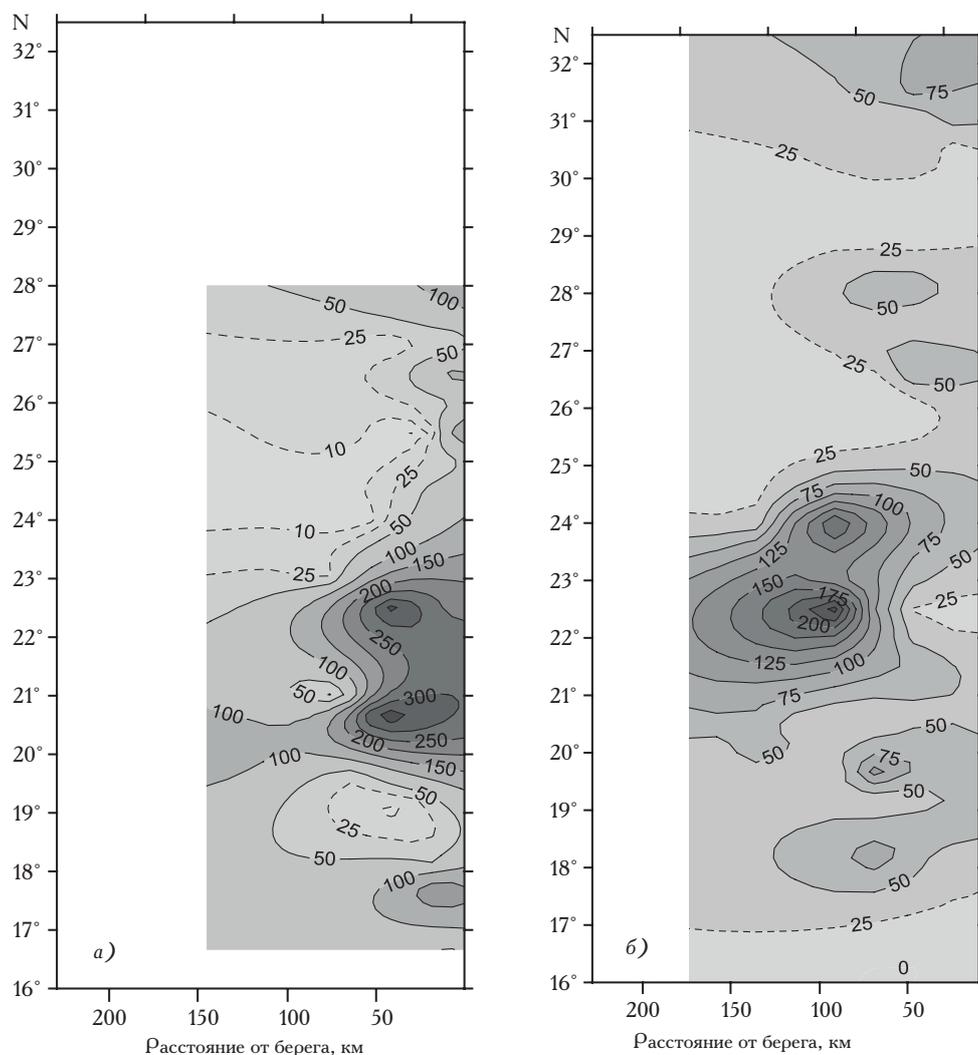


Рис. 7. Схема распределения первичной продукции в поверхностном слое в мг С/м^3 в летний (а) и зимний (б) периоды 2006 г.

апвеллингов на довольно большой площади. Однако, используемое соотношение Редфилда-Ричардса является усредненным и меняется в зависимости от того, какое фитопланктонное сообщество преобладает на исследуемой акватории и на какой стадии развития оно находится, а также не учитывает пополнение запасов биогенных элементов за счет минерализации органических веществ или приноса их в океан с атмосферными потоками. Считается, что в районах Канарского и Перуанского апвеллингов, где диатомовые и пиридиниевые составляют 80% всего фитопланктонного сообщества, использование основных биогенных элементов происходит именно в приведенном соотношении.

В зонах апвеллингов продуцируется огромное количество органического вещества. Значительная часть его выносится за пределы прибрежных зон и повышает трофность окружающих вод, небольшая доля (до 5%) сохраняется в донных отложениях, а остальное становится кормовой базой для многочисленных консументов. Сколько исходного органического вещества реализуется в продукцию рыб зависит от множества причин, начиная от ширины шельфовой зоны и толщины верхнего перемешанного слоя и заканчивая количеством предшествующих трофических уровней и экологической эффективностью переноса энергии по трофической цепи. Обычно число предшествующих трофических уровней в зонах апвеллингов не более двух, а экологическая эффективность очень высока (до 20%). Известно, что такие рыбы как анчоус, европейская сардина, круглая сардинелла могут питаться непосредственно фитопланктоном, копеподами, эвфаузиевыми и др. [Саускан, 1988]. В результате на зоны апвеллингов при-

ходитя половина годовой продукции рыб — 120 млн т, в то время как первичной продукции здесь создается не более 0,5%, а по площади зоны апвеллингов занимают не более 0,1%. Сравнительная оценка открытых вод океана, прибрежных районов и зон апвеллинга была проведена по данным, приведенным в работе Д. Райтера [Ryther, 1969] (табл. 5).

Связи между океанографическими процессами и колебаниями рыбопродуктивности исследовались уже начиная с 1960-х гг. [Guillern, 1966; Guillern et al., 1969; Zuta, Guillern, 1970; Santos, 2005]. Несмотря на межгодовую и междекадную изменчивость биопродуктивности и рыбопродуктивности экосистем прибрежных апвеллингов, основные соотношения между различными районами Мирового океана сохраняются и в настоящее время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменчивость гидрохимических характеристик поднимающихся вод в большей степени определяет изменчивость первичной продукции в различных районах прибрежных апвеллингов. В районе Канарского апвеллинга продуктивность вод определяют характеристики и характер взаимодействия САЦВ и ЮАЦВ, а также пространственное положение границы между ними и свойства образующейся в зоне смешения воды. В северном районе Перуанского (севернее 18° ю.ш.) и южном районе Канарского (южнее 20° с.ш.) апвеллингов основным источником поднимающихся к поверхности вод являются воды подповерхностных течений прижатых к материковому склону, обеднённые кислородом и с повышенным содержанием биогенных элементов. На остальной акватории — воды Перуанского и Канарского течений.

Таблица 5. Первичная продукция и продукция рыб в различных районах Мирового океана [Ryther, 1969]

Район	Занимаемая площадь, % от площади Мирового океана	Доля первичной продукции, %	Число трофических уровней	Экологическая эффективность, %	Продукция рыб, т в год
Открытый океан	90	81,5	5	10	16 · 10 ⁵
Прибрежные районы	9,9	18,0	3	15	12 · 10 ⁷
Апвеллинги	0,1	0,5	1,5	20	12 · 10 ⁷

Оценка первичной продукции на основе многолетних данных по гидрохимической структуре вод позволяет с достаточной достоверностью проводить анализ пространственно-временной изменчивости биопродуктивности вод районов прибрежных апвеллингов. Средняя величина суточной первичной продукции, рассчитанная для Канарского апвеллинга составляет $2,3 \text{ мг С/м}^2$ в сутки, что соответствует данным прямых определений. Более глубокое понимание биогидрохимической трансформации биогенных элементов и органического вещества в районах прибрежных апвеллингов приблизит нас к созданию прогностических моделей этих экосистем в условиях меняющегося климата.

ЛИТЕРАТУРА

- Александров С. В. 2007. Биологическая продуктивность вод прибрежной экосистемы северо-западной Африки по показателям продукции фитопланктона и содержанию хлорофилла // Промышленно-Биологические исследования АтлантНИРО в 2004—2005 годах. Калининград: Изд-во АтлантНИРО. Т. 2. С. 5—16.
- Аржанова Н. В., Буркальцева М. А. 1986. Обеспеченность фитопланктона биогенными элементами в Атлантическом океане // Биологические ресурсы Атлантического океана. М.: Наука. С. 111—133.
- Глеза И. Л. 2007. Исследование термохалинной структуры и биопродуктивности вод Канарского апвеллинга с использованием геоинформационных технологий. Автореф. дисс. канд. геогр. наук. Калининград: РГУ им. Иммануила Канта. 18 с.
- Духова Л. А. 2010. Гидрохимическая структура и формирование биологической продуктивности вод Канарского апвеллинга. Автореф. дисс. канд. геогр. наук. Москва: Изд-во ВНИРО. 22 с.
- Колесников А. Г., Хлыстов Н. Э. 1970. Результаты десятилетних исследований системы течений Тропической Атлантики // Морские гидрофизические исследования. Киев: МГИ АН УССР. Т. 47. Вып. 1. С. 271—289.
- Руководство по химическому анализу морских и пресных вод при экологическом мониторинге рыбохозяйственных водоёмов и перспективных для промысла районов Мирового океана 2003. М.: Изд-во ВНИРО. 202 с.
- Сапожников В. В., Метревели М. П. 1982. Особенности верхнего минимума кислорода в тропических водах южнее Галапагосских островов // Океанология. Т. 22. Вып. 2. С. 230—235.
- Сапожников В. В., Ширяев В. А. 1983. Внедрение вод течения Кромвелла в слой верхнего кислородного минимума южнее Галапагосских островов // Деп. ЦНИИТЭИРХ. 492. РХ. Д 83. С. 12.
- Сапожников В. В., Зубаревич В. Л. 1985. Апвеллинги Мирового океана // Рыбное хозяйство. № 9. С. 28—30.
- Саускан В. И. 1988. Промысловые рыбы Атлантического океана. Справочник. М.: ВО «Агропромиздат». 360 с.
- Стунжас П. А. 1983. Динамика накопления кислорода на апвеллинге и оценка «возраста» поднявшихся вод // Биопродуктивность экосистем апвеллингов. М.: Институт океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР. С. 47—52.
- Федоров К. Н. 1984. Этот капризный младенец Эль-Ниньо! // Природа. № 8. С. 74—75.
- Aristegui J., Barton, E. D., Alvarez-Salgado X. A., Santos A. M. P., Figueiras F. G., Kifani S., Hernández-León S., Mason E. and E. Machú. 2009. Sub-regional Ecosystem Variability in the Canary Current Upwelling // Progr. Oceanogr. Vol. 83. С. 33—48.
- Barton E. D. 2001. Canary and Portugal Currents // University of Wales, Bangor, UK. P. 380—389.
- Barton E. D. 1998. Eastern Boundary of the North Atlantic: Northwest Africa and Iberia. Coastal segment (18E) // The Sea. Vol. 11. New York: John Wiley & Sons. P. 633—657.
- Basterretxea G., Barton E. D., Tett P., Sangra P., Navarro-Perez E., Aristegui J. 2002. Eddy and DCM Response to Wind-Shear in the Lee of Gran Canaria // Deep-Sea Res. Part I. Vol. 49P. P. 1087—1101.
- Brink K. H., Halpern D., Huyer A., Smith R. L. 1983. The Physical Environment of the Peruvian Upwelling System // Prog. Oceanogr. Vol. 12. P. 285—305.
- Bruiland K. W., Eden L. Rue, Geoffrey J. Smith, Giacomo R. DiTullio. 2005. Iron, Macronutrients and Diatom Blooms in the Peru Upwelling Regime: Brown and Blue Waters of Peru // Marine Chemistry. V. 93. P. 81—103.
- Calienes R., Guillen O., Lostaunau N. 1985. Variabilidad Espacio-Temporal de Clorofila, Produccion Primaria y Nutrientes frente a la Costa Peruana // Bol. Inst. Mar. Pery. 10 (1).
- Fraga F., Barton E. D., Llinas O. 1985. The Concentration of Nutrient Salts in «Pure» North and South Atlantic Central Waters // Int. Symp. Upw. W. Afr. Inst. Inv. Pesq. Barcelona. Vol. I. P. 25—36.
- Grall J. R., Le Corre P. 1982. Tregue. Short-Term Variability of Primary Production in Coastal Upwelling of Morocco // Rapp. & P. — V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer. Vol. 80. P. 221—227.

- Hafferty A.J., Codispoti L.A., Huyer A.* 1978. Joint II. R/V Melville Legs I, II, and IV, Iselin Leg II, Bottle Data, March-May 1977. CUEA Data Rpt., 45. 792 pp.
- Huges P., Burton E.D.* 1974. Stratification and Water Mass Structure in the Upwelling Area off NW Africa in April-May 1969 // *Deep-Sea Res.* № 24. P. 611–628.
- Koblentz-Mishke O.J., Volkovinskiy V.V., Kabanova J.G.* 1970. Plankton Primary Production in the World Ocean // *Scientific Exploration of the South Pacific*. National Academy of Sciences. Washington. D.C. P. 183–193.
- MacIsaac J.J., Dugdale R.C., Barber R.T., Blasco D., Packard T.T.* 1985. Primary Production Cycle in an Upwelling Center // *Deep-Sea Res.* № 32. P. 503–529.
- Mackas D.L., Strub P.T., Thomas A.C. and V. Montecino.* 2006. Eastern Ocean Boundaries // *The Sea*. Vol. 14 / Ed. A.R. Robinson, K.H. Brink. P. 21–60.
- Minas H.J., Codispoti L.A., Dugdale R.C.* 1982. Nutrients and Primary Production in the Upwelling Region off Northwest Africa // *Rapp. & P.—V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.* Vol. 180. P. 148–183.
- Mittelstaedt E.* 1978. Physical Oceanography of Coastal Upwelling Regions with Special Reference to North-West Africa // In: *Symp. On the Canary Current: Upwelling and Living Resources*. P. 2–11.
- Mittelstaedt E.* 1983. The Upwelling Area off North-West Africa: A Description of Phenomena Related to Coastal Upwelling // *Prog. Oceanog.* Vol. 12. P. 307–331.
- Mittelstaedt E.* 1991. The Ocean Boundary along the North-West African Coast: Circulation and Oceanographic Properties at the Sea Surface // *Progr. Oceanog.* Vol. 26. P. 307–355.
- Nelson S.S., Neshyba S.* 1979. On the Southernmost Extension of the Peru-Chile Undercurrent // *Deep-Sea Res.* Vol. 26A. C. 1387–1393.
- Nykjaer L., Van Camp L.* 1994. Seasonal and Interannual Variability of Coastal Upwelling along Northwest Africa and Portugal from 1981 to 1991 // *J. Geophys. Res.* Vol. 99. P. 14197–14207.
- Pelegri J.L., Marrero-Diaz A. Ratsimandresy A.* 2006. Nutrient Irrigation of the North Atlantic // *Progr. Oceanogr.* Vol. 70. P. 366–406.
- Pennington J.T., Mahoney K.L., Kuwahara V.S., Kolber D.D., Calienes R., Chavez F.P.* 2006. Primary Production in the Eastern Tropical Pacific: A Review // *Prog. Oceanogr.* Vol. 69. C. 285–317.
- Redfield A.C.* 1934. On the Properties of Organic Derivatives in Sea Water and Their Relation to the Composition of Plankton // *James Johnstone Memorial Volume*. Liverpool. P. 176–192.
- Richards F.A.* 1958. Dissolved Silicate and Related Properties of Some Western North Atlantic and Caribbean Waters // *J. Mar. Res.* Vol. 17. № 2. P. 445–465.
- Ryabenko E., Kock A., Bange H.W., Altabet M.A., Wallace D.W.R.* 2012. Contrasting Biogeochemistry of Nitrogen in the Atlantic and Pacific Oxygen Minimum Zones // *Biogeosciences*. Vol. 9. P. 203–215.
- Ryther J.H.* 1969. Photosynthesis and Fish Production in the Sea. Production of Organic Matter and Its Conversion to Higher Forms of Life Vary throughout the World Ocean // *Scienc.* Vol. 166. № 1. P. 72–76.
- Santos M.P., Kazmin A.P., Peliz A.* 2005. Decadal Changes in the Canary Upwelling System as Revealed by Satellite Observations: Their Impact on Productivity // *J. Mar. Res.* Vol. 63. P. 359–379.
- Sarmiento J.L., Gruber N., Brzezinski M., Dunne J.P.* 2004. Highlatitude Controls of Thermocline Nutrients and Low Latitude Biological Productivity // *Nature*. № 427. P. 56–60.
- Stramma L.* 1984. Geostrophic Transport in the Warm Water Sphere of the Eastern Subtropical North Atlantic // *J. Mar. Res.* Vol. 42. P. 537–558.
- Stramma L., Siedler G.* 1988. Seasonal Changes in the North Atlantic Sub-Tropical Gyre // *J. Geophys. Res.* Vol. 93. P. 8111–8118.
- Walsh J.J., Kelley J.C., Dugdale R.C., Frost B.W.* 1971. Cross Feature of the Peruvian Upwelling System with Special Reference to Possible Diel Variations // *Invest. Pesquera*. V. 35. № 1. P. 23–69.
- Weichert G.* 1980. Chemical Changes and Primary Production in Upwelling Water off Northwest Africa // *Dt. Hydrogr. Z.* Vol. 33. P. 192–198.
- Wooster W.S., Backun A., McLain D.R.D.* 1976. The Seasonal Upwelling Cycle along the Eastern Boundary of the North Atlantic // *J. Mar. Res.* Vol. 34. № 2. P. 131–141.
- Wyrki K.* 1966. Oceanography of the Eastern Equatorial Pacific Ocean // *Oceanograph. Mar. Biol. Ann. Rev.* Vol. 4. P. 23–67.
- Wyrki K.* 1967. Circulation and Water Masses in the Eastern Equatorial Pacific Ocean // *J. Oceanol. Limnol.* Vol. 1. P. 117–147.
- Wyrki K.* 1975. El-Ninio the Dynamic Response of the Equatorial Pacific Ocean to Atmospheric Forcing // *J. Phys. Oceanogr.* Vol. 5. № 4. P. 572–584.
- Zuta S., Guillen D.* 1970. Oceanografía de la Aquas Coasteras del Peru // *Buletin Inst. del mar del Peru. Callas. Peru*. Vol. 2. № 5. P. 1–58.

Hydrochemical Features of Primary Production within the Peruvian and Canary Upwelling Areas

L.A. Dukhova, V.V. Sapozhnikov

Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (FSUE VNIRO, Moscow)

General features of water mass dynamics, as well as the processes responsible for higher biological productivity, appear to be similar for the geographically distinct areas of the Peruvian and Canary upwelling ecosystems. Variations in productivity of both ecosystems are driven by regional specifics of the upward flow, including the hydrochemical parameters of the upwelled waters. Northern sub-division of the Peruvian upwelling and southern sub-division of the Canary upwelling ecosystems are supplied by waters of the subsurface poleward flows over slope, for the rest it is water of Peruvian Coastal and Canary currents respectively. Biological productivity of these ecosystems was estimated indirectly using the hydrochemical data, and these results correspond well with direct observational data.

Key words: upwelling, nutrients, subsurface current, primary production.