

На правах рукописи

*Духов*



004601074

**ДУХОВА ЛЮДМИЛА АНАТОЛЬЕВНА**

**ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА И ФОРМИРОВАНИЕ  
БИОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ ВОД  
В РАЙОНЕ КАНАРСКОГО АПВЕЛЛИНГА**

Специальность 25.00.28 – океанология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

15 АПР 2010

Калининград – 2010

Работа выполнена в ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии»

Научный руководитель доктор географических наук, профессор  
Сапожников Виктор Вольфович

Официальные оппоненты: доктор географических наук  
Фашук Дмитрий Яковлевич

доктор биологических наук, профессор  
Саускан Владимир Ильич

Ведущая организация Государственный океанографический  
институт имени Н.Н.Зубова

Защита состоится 16 апреля 2010 года в 17 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212.084.02 при ФГОУ ВПО «Российский  
государственный университет имени Иммануила Канта» по адресу: 236040, г.  
Калининград, ул. Университетская, 2, ауд. 206; e-mail: ecogeography@rambler.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского  
государственного университета имени Иммануила Канта по адресу: 236040,  
Калининград, ул. Университетская, 2.

Автореферат разослан «12» марта 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат географических наук



Г.М. Барина

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность работы.** Район Канарского апвеллинга расположен у Северо-Западного побережья Африки от Гибралтарского пролива до островов Зеленого мыса. Как и другие районы апвеллинга в Мировом океане (Бенгельский - в Атлантическом, Калифорнийский и Перуанский – в Тихом), он характеризуется исключительно высокой биологической продуктивностью вод, что обусловлено подъемом в эвфотический слой промежуточных вод с повышенным содержанием биогенных элементов. При этом в верхнем слое океана создаются благоприятные условия для первичного продуцирования и формирования фитопланктонного сообщества - основы трофической цепи, конечным звеном которой являются массовые пелагические рыбы (сардина, ставрида, сардинелла, скумбрия, анчоус).

Биомасса и распределение этих промысловых видов рыб, испытывают существенные межгодовые изменения, которые связаны как с крупномасштабными атмосферными циркуляциями, так с изменчивостью среды обитания. Наблюдаемые резкие падения уловов, например, сардины с 5 млн. т в 1996 г. до 1 млн. т. в 1997 г. у берегов Западной Сахары, иногда объясняют декадными колебаниями продуктивности экосистемы апвеллинга, однако многолетние данные, подтверждающие такие изменения, практически отсутствуют. Для обеспечения стабильного и эффективного промысла в районе Канарского апвеллинга необходимо более глубокое понимание процессов формирования биологической и промысловой продуктивности вод и их изменчивости.

В последнее время важное значение приобретают расчетные методы оценки первичной продукции, основанные на знании пространственно-временной изменчивости гидрохимической структуры вод, которые позволяют более детально проанализировать изменения первичной продукции в промысловом районе.

В связи с этим выполненное автором исследование сезонной и межгодовой изменчивости гидрохимической структуры вод Канарского апвеллинга, ее влияния на биологическую продуктивность района и распределение массовых пелагических видов рыб представляется **актуальным**.

**Основная цель работы** – изучить влияние пространственно-временной изменчивости гидрохимических параметров на биопродуктивность вод и распределение массовых пелагических видов рыб.

Для достижения цели решались следующие задачи:

1. Анализ пространственно-временной изменчивости гидрохимических условий в районе Канарского апвеллинга.
2. Океанологическое районирование методом кластерного анализа с использованием гидрохимических данных.
3. Выявление основных гидрохимических показателей, влияющих на формирование биопродуктивности вод.
4. Расчет первичной продукции в районе Канарского апвеллинга.

5. Оценка влияния сезонной и межгодовой изменчивости гидрохимических условий на распределение промысловых скоплений пелагических видов рыб.

**Научная новизна.** Впервые на основе многолетних данных выполнен анализ пространственно-временной изменчивости содержания в водах Канарского апвеллинга минеральных форм фосфора и азота (нитратов, нитритов и аммония), растворенного кислорода и железа; определено содержание органических форм фосфора и азота (включая мочевины), что позволило проследить трансформацию азота и фосфора в продукционно-деструкционных процессах.

В качестве дополнительного показателя интенсивности апвеллинга и биопродуктивности вод предложено использовать гидрохимический индекс, рассчитанный по величине горизонтального градиента концентрации фосфатов в поверхностном слое; проведен анализ его пространственно-временной изменчивости.

Впервые с помощью метода кластерного анализа на основе среднесезонных значений концентрации фосфатов и растворенного кислорода для теплого и холодного сезонов года разработана классификация поверхностных вод в районе Канарского апвеллинга; в результате выделено пять подрайонов.

Впервые по методу Вейхарта на основе пространственно-временной изменчивости гидрохимических параметров для летнего и зимнего сезонов 2004 г. и 2006-2008 гг. рассчитана суточная первичная продукция. Показано, что наиболее репрезентативны величины первичной продукции, рассчитанные по убыли содержания фосфатов в поверхностном слое.

Установлено, что сезонные миграции европейской сардины, круглой сардинеллы, западноафриканской и европейской ставриды в значительной степени определяются пространственно-временной изменчивостью гидрохимической структуры вод.

**Практическая значимость работы.** Выявленные закономерности распределения гидрохимических параметров позволяют лучше понять механизмы формирования зон высокой продуктивности вод в динамически сложном районе Канарского апвеллинга, где знание только гидрологических условий недостаточно. Расчетные методы оценки первичной продукции на основе этих закономерностей могут быть положены в основу более детального анализа изменчивости биологической и промысловой продуктивности района. Определение гидрохимического индекса дает возможность оценить интенсивность апвеллинга и продуктивность экосистемы в целом. Использование гидрохимических параметров, напрямую связанных с биопродуктивностью вод в моделях высокопродуктивных экосистем прибрежных апвеллингов, позволит получить более надежные результаты при разработке промысловых прогнозов и при планировании промысла основных пелагических видов рыб в районе Центрально-Восточной Атлантики (ЦВА).

### **Основные защищаемые положения.**

1. Пространственно-временная изменчивость гидрохимических параметров вод Канарского апвеллинга, обусловленная динамикой водных масс и интенсивностью продукционно-деструкционных процессов.

2. Классификация поверхностных вод по совокупности гидрохимических параметров с целью их более детальной характеристики на уровне подрайонов.

3. Расчет первичной продукции по уменьшению концентрации биогенных элементов с удалением вод от центра апвеллинга.

4. Правомерность использования гидрохимического индекса как показателя интенсивности апвеллинга и биопродуктивности вод.

5. Связи сезонных миграций промысловых пелагических видов рыб с пространственно-временной изменчивостью гидрохимических условий.

**Личный вклад автора состоит** в обработке и анализе первичных гидрохимических материалов, собранных в экспедициях АтлантНИРО в район Канарского апвеллинга в 1994-2008 гг. Автором впервые в летних рейсах 2006-2008 гг. выполнен полный комплекс определений биогенных элементов как в минеральной, так и в органической формах, кроме того были отработаны методики и проведено определение мочевины и железа.

**Апробация работы.** Основные результаты представлялись и обсуждались на ежегодных отчетных сессиях ВНИРО 2007-2008 гг., в лаборатории морской экологии отдела Экологических основ изучения биопродуктивности гидросферы ФГУП «ВНИРО», на Методическом Совете по океанологическим исследованиям АтлантНИРО, на расширенном семинаре кафедры географии океана факультета географии и геоэкологии Российского государственного университета им. Иммануила Канта (г. Калининград), а также на XIV Международной конференции по промысловой океанологии в 2008 г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 работ, из них 3 в изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура диссертации:** введение, 4 главы, заключение, список используемой литературы. Общий объем диссертации составляет 147 страниц печатного текста, включая 50 рисунков, 13 таблиц. Список литературы содержит 138 публикаций на русском и иностранных языках.

Автор искренне благодарен научному руководителю д.г.н., профессору В.В.Сапожникову, главному научному сотруднику АтлантНИРО д.г.н., профессору П.П. Чернышкову за помощь и внимание к работе, старшему научному сотруднику АтлантНИРО к.г.н. В.Н. Шнару за ценные советы и консультации в области промысловой океанологии, сотрудникам лаборатории морской экологии ФГУП «ВНИРО» к.б.н. Н.В. Аржановой, к.х.н. Н.В. Мордасовой, к.б.н. А.И. Агатовой за консультации и обсуждение результатов исследований, сотруднику отдела научно-промысловой разведки АтлантНИРО Е.А. Смольяниновой, принимавшей участие в гидрохимических работах, к.г.н. Е.Н. Тимохину и к.г.н. И.Л. Глезу за помощь в математической обработке материалов.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

**Первая глава** содержит физико-географическую характеристику района Канарского апвеллинга, описание климатических зон, в пределах которых располагается исследуемый район и основные характеристики атмосферной циркуляции. В этой главе представлен литературный обзор изученности экосистемы апвеллинга, приводится описание структуры водных масс, горизонтальной циркуляции вод и прибрежного апвеллинга, дается краткая характеристика гидрохимических условий района и их влияния на формирование зон повышенной биопродуктивности вод.

**Во второй главе** представлены сведения об использованных в работе материалах и методах их обработки. В основу положены результаты 24-х экспедиций АтлантНИРО в район ЦВА, выполненных в холодный и теплый период 1994-2008 гг. В летний период 2006-2008 гг., кроме традиционных многолетних определений минерального фосфора и растворенного кислорода, были получены данные по всем минеральным формам азота, кремнию и железу, а также органическим формам фосфора и азота (включая определение мочевины в 2008 г.).

Для анализа циркуляционных особенностей района использовались данные по аномалиям уровня океана, полученные из Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии Геофизического центра РАН.

Анализ распределения хлорофилла "а" и первичной продукции, измеренной радиоуглеродным методом, был проведен на основе результатов, полученных в 11-ти экспедициях АтлантНИРО в 1994-2004 гг.

В качестве данных по распределению рыб использовались материалы промысловой статистики и индексы поверхностной плотности SA (т/миля<sup>2</sup>) пелагических видов рыб (скумбрии, ставриды, сардинеллы, сардины, анчоуса), полученные в летний период во время выполнения 12-ти тралово-акустических съемок на шельфе Марокко и Мавритании (1995-2008 гг.).

Для расчета первичной продукции (по методу Вейхарта), использовались стехиометрическая модель органического вещества Редфилда-Ричардса и атомарное соотношение C:Si:N:P=106:23:16:1, которое позволяет рассчитать количество образовавшегося органического вещества ( $\Delta C$ ) по уменьшению концентраций основных биогенных элементов ( $\Delta P$ ,  $\Delta Si$  и  $\Delta N$ ) в поверхностном слое на широтном разрезе по формулам:

$$\Delta C_P = \Delta P * 106 * 12 \quad (1),$$

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

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

где  $\Delta C_P$ ,  $\Delta C_{Si}$ ,  $\Delta C_N$  – первичная продукция, рассчитанная по убыли минерального фосфора ( $\Delta P$ ), кремния ( $\Delta Si$ ) и суммарного азота (нитратов, нитритов и аммония) ( $\Delta N$ ) в поверхностном слое в мг C/м<sup>3</sup> соответственно; 12 – атомный вес углерода.

Для анализа гидрохимической структуры поверхностных вод был применен статистический метод кластерного анализа. В качестве данных были использованы среднемноголетние (1994-2008 гг.) значения температуры, солености, концентрации фосфатов и растворенного кислорода для холодного и тепло периода года.

**Третья глава** посвящена анализу пространственно-временной (среднемесячной, сезонной и многолетней) изменчивости гидрохимической структуры вод Канарского апвеллинга. На основе данных, полученных в летние сезоны 2006-2008 гг., выявлены общие закономерности распределения и аккумуляция минеральных и органических форм азота и фосфора, а также растворенного кислорода, кремния и суммарного железа ( $Fe^{2+}$  и  $Fe^{3+}$ ). Разработана классификация пространственной структуры поверхностных вод шельфа Марокко и Мавритании на уровне пяти подрайонов.

Основные факторы, влияющие на гидрохимическую структуру вод Канарского апвеллинга: 1) прибрежный апвеллинг, интенсивность которого тесно связана с интенсивностью северо-восточного переноса воздушных масс; 2) циркуляция водных масс; взаимодействие северной и южной атлантических центральных водных масс (САЦВ и ЮАЦВ); Сенегало-Мавританский фронт (СМФ) и его миграция вдоль побережья Мавритании; 3) мезомасштабные процессы (образование вихревых структур, поперечных струй, меандров и др.); 4) процессы фотосинтеза и минерализации органических форм биогенных элементов.

Гидрохимическая структура вод во многом определяется локальными зонами апвеллинга с повышенным содержанием биогенных элементов и пониженными концентрациями кислорода, которые, как правило, приурочены к районам мысов и выступов, и их положение зависит от рельефа дна (каньоны, возвышенности и т.д.) и ширины шельфа. В океанической части, находящейся под влиянием олиготрофных вод субтропического антициклонического круговорота, количество биогенных элементов мало, а относительное содержание кислорода близко к 100%-ному насыщению.

В зоне прибрежного апвеллинга подъем вод происходит с глубин 150-200 м, расположенных ниже пикноклина. Концентрация биогенных элементов в промежуточном слое и глубина залегания пикноклина во многом определяют поступление их в поверхностный слой. В районе Канарского апвеллинга это зависит от взаимодействия САЦВ и ЮАЦВ, граница между которыми отчетливо выделяется по гидрохимическим параметрам и располагается практически в течение всего года в районе  $21^{\circ}$  с.ш. (мыс Кап Блан).

С северной водной массой на юг поступают более соленые, с меньшим содержанием биогенов и более насыщенные кислородом воды, а с южной - менее соленые, с большим содержанием биогенных элементов и менее насыщенные кислородом. Это приводит к меридиональному увеличению в слоях 200 - 500 м с севера на юг концентраций минерального фосфора от 0.4 - 1.1 до 1.8-2.1 мкг-ат/л (рис. 1) и нитратного азота от 6.7-11.0 до 23.5 -

26.5 мкг-ат/л. Характер вертикального распределения нитратов и растворенного кремния повторяет характер распределение фосфатов.

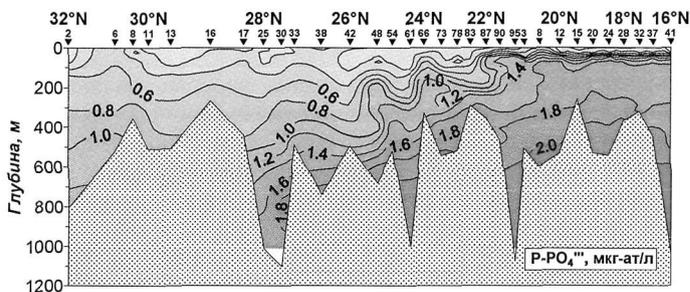


Рис. 1. Вертикальное распределение минерального фосфора (мкг-ат/л) на меридиональном разрезе по материковому склону от 32° до 16° с.ш.

Усиление пассатной циркуляции и ее сезонный характер определяют сезонную изменчивость интенсивности апвеллинга и положения Сенегало-Мавританского фронта (СМФ), который хорошо прослеживается по температуре поверхностного слоя. В летний период года СМФ располагается в районе 21° с.ш. (мыс Кап Блан), а в холодный период мигрирует на юг до 8°-10° с.ш.

Значительное влияние на распределение биогенных элементов у побережья Северо-Западной Африки оказывает формирование различных мезомасштабных структур. Их возникновение может быть связано с неустойчивостью состава больших объемов шельфовых вод в процессе подъема их к поверхности. Большую роль при этом играют топографические факторы и устойчивость вдольберегового течения. Участки подъема изолиний к поверхности в большинстве случаев приурочены к подводным возвышенностям (рис. 1).

Характер распределения нитратов, фосфатов и растворенного кремния по периферии шельфа во многом обуславливают процессы фотосинтеза. В результате преобразования минеральных соединений азота, фосфора и кремния в органические в процессе фотосинтеза происходит обеднение ими поверхностного слоя и накопление их ниже пикноклина при деструкции органического вещества.

В летний период 2006-2008 гг. распределение гидрохимических параметров в поверхностном слое отражало основные особенности циркуляции вод и процессов фотосинтеза, а также различия в характеристиках вод южного и северного происхождения. Свойственный району с интенсивным апвеллингом подъем глубинных вод с температурой ниже 18°C находился в прибрежной зоне от 24°00' до 27°30' с.ш. Эти воды максимально недонасыщены по кислороду, в 2006 г его минимальное значение 4.27 мл/л

(77.2%) отмечалось южнее мыса Бохадор (25°00' с.ш.). В отличие от растворенного кислорода для апвеллинговых вод характерны повышенные концентрации биогенных элементов: фосфатов - до 1.3-2.0 мкг-ат/л, нитратов - до 7.00-12.1 мкг-ат/л, кремния - до 15.3 мкг-ат/л.

В районе между 19°20' и 24°00' с.ш. кроме подъема вод сказывалось влияние более теплых поверхностных вод Северной ветви Межквассатного противотечения. Здесь отмечались участки с повышенными концентрациями биогенных элементов (фосфатов до 1.5 мкг-ат/л, нитратов до 7.8 мкг-ат/л, растворенного кремния до 9.0 мкг-ат/л) и пониженным содержанием кислорода (до 4.4 мл/л). Южная часть этого района находится под влиянием циклонического круговорота (Гвинейского купола).

Южнее мыса Тимирис (19°20' с.ш.) в летний период прибрежный апвеллинг не прослеживался. Вследствие выноса с юга прогретых океанических вод Гвинейского залива, температура на поверхности превышала 26°C. Средние концентрации биогенных элементов в поверхностном слое были низкими: содержание фосфатов варьировало от 0.1 до 0.5 мкг-ат/л, нитратов - от аналитического нуля до 0.5 мкг-ат/л, растворенного кремния от 1.0 до 6.0 мкг-ат/л. Здесь отмечалась характерная для тропической зоны гидрохимическая структура вод, однако в районе от 18°20' до 17°40' с.ш. выделялся участок с повышенными концентрациями фосфатов (до 0.8 мкг-ат/л) и кремния (до 12.8 мкг-ат/л).

На расстоянии 35-40 км от зоны подъема вод содержание биогенных элементов становится чрезвычайно низким: фосфатов до 0.05-0.1 мкг-ат/л, растворенного кремния до 0.3 мкг-ат/л, концентрация нитратного азота падает практически до аналитического нуля. Относительное содержание растворенного кислорода при этом увеличивалось до 100% насыщения и более, что свидетельствует о преобладании здесь процессов фотосинтеза над процессами деструкции органического вещества.

В океанической части при отсутствии нитратного азота количество аммонийного азота, который также может быть использован в процессах первичного продуцирования, изменялось в широких пределах (от значений менее 0.1 до 1.9 мкг-ат/л).

Повышенные концентрации мочевины (до 1,1 мкг-ат/л) отмечались как в прибрежных зонах интенсивного подъема вод, так и в океанической части (рис. 2), причем в прибрежной зоне эти концентрации равномерно распределены по вертикали, что вероятно связано со скоплением зоопланктона.

Органические формы азота и фосфора в поверхностном слое характеризовались пятнистым распределением (рис. 2). В океанической части они практически повсеместно преобладали над минеральными формами и их доля изменялась от 86 до 99% (для азота) и от 50 до 85% (для фосфора) (рис. 3). Исчерпание минеральных форм азота свидетельствует об образовании первичной продукции за счет рециклинга азота или процессов азотфиксации. Отчетливо прослеживалось увеличение органических форм азота и фосфора в направлении от берега в открытую часть океана (рис. 3).

В придонных слоях в прибрежной зоне доля органического азота и фосфора варьировала от 63 до 85% и от 8 до 29% соответственно. В океанической части она была значительно ниже и составляла 41-57% и от аналитического нуля до 6% соответственно, что может быть обусловлено как интенсификацией деструкционных процессов в придонных слоях, так и интенсивным обменом вода-дно.

В толще воды содержание органического азота и фосфора характеризуется несколькими промежуточными максимумами. "Детритный" максимум приурочен к слою сезонного пикноклина на глубинах от 50 до 75 м. Он обусловлен скоплением детрита, опустившегося из эвфотического слоя и более четко выражен при увеличении интенсивности фотосинтетической деятельности фитопланктона. Скачки максимумов проявляются также на глубинах 150-200 м и 400-500 м, что, вероятно, связано со скоплением на этих глубинах бактери- и зоопланктона. Таким образом, продукционно-деструкционные процессы, наряду с динамическими, определяют гидрохимическую структуру вод в районе Канарского апвеллинга.

Показано, что железо (сумма двух- и трехвалентного) распределено по всей акватории неравномерно, пятна с максимальными концентрациями (от 18.6 до 48.1 мкг/л) в поверхностном слое совпадают с зонами повышенных концентраций органических форм фосфора (рис.2). Сложность вертикального и горизонтального распределения суммарного железа в зоне подъема вод определяется, как большим разнообразием форм его нахождения в океанических водах в зависимости от pH и Eh (редокс-потенциала) среды, так и источниками попадания его в толщу воды, в частности с золотыми потоками из Сахары.

Для прибрежной зоны и периферии шельфа Северо-Западного побережья Африки были рассчитаны среднemesячные значения температуры, солёности, содержания фосфатов и растворенного кислорода. Распределение фосфатов и растворенного кислорода в этих зонах согласуется с особенностями распределения температуры и солёности и во многом определяется сезонным характером апвеллинга и внутригодовой изменчивостью положения СМФ.

По характеру распределения выделены два района с повышенным содержанием фосфатов. Пространственно-временная изменчивость положения зон максимальных концентраций (0.95 - 1.15 мкг-ат/л) в первом районе обусловлена сезонными миграциями СМФ и влиянием вод ЮАЦВ. Северная граница повышенных концентраций фосфатов (более 0.65 мкг-ат/л) в течение года находится в районе 22°30' с.ш., что определяется областью распространения ЮАЦВ, а южная смещается с 19°30' с.ш. (положение в августе) до 16° с.ш. (в марте), вместе со смещением СМФ. Южнее 18° с.ш., куда в теплый период года распространяется тропическая поверхностная водная масса, апвеллинг не прослеживается, содержание фосфатов уменьшается до 0.25 мкг-ат/л. Между 24°30' и 28°00' с.ш. выделен участок с концентрацией фосфатов от 0.45 до 0.65 мкг-ат/л, приуроченный к зоне интенсивного апвеллинга.

На периферии шельфа картина распределения аналогична, но концентрации минерального фосфора значительно ниже (от 0.85 до 0.1мкг-ат/л), что связано с его ассимиляцией в процессе фотосинтеза.

Во втором районе (32° с.ш.) максимальные значения фосфатов (0.85-1.25 мкг-ат/л) в прибрежной зоне отмечались в течение всего года, а по периферии шельфовой зоны - в ноябре-декабре. Возможно, это связано с их накоплением в циклонических вихрях в этом районе или с хозяйственной деятельностью человека.

По распределению растворенного кислорода также выделены два района. Граница между ними определяется как различными характеристиками водных масс северного и южного происхождения, так и сезонной изменчивостью положения зон интенсивного апвеллинга и располагается между 22 и 23° с.ш. В северной части преобладают более высокие значения растворенного кислорода (5.0-6.0 мл/л), к югу – более низкие (4.1- 4.9 мл/л). В летний период (июнь - октябрь) на акватории между 26°30' и 29°30' с.ш. отмечается увеличение интенсивности апвеллинга и уменьшение значений растворенного кислорода до 4.8-4.2 мл/л. В районе между 33° и 35° с.ш. в летний период концентрации растворенного кислорода (более 6.0 мл/л) возрастают параллельно с уменьшением содержания минерального фосфора, что свидетельствует об интенсивных процессах фотосинтеза.

Повсеместно содержание растворенного кислорода увеличивается по мере удаления вод от центра апвеллинга в результате фотосинтеза. Однако по периферии шельфа с сентября по ноябрь воды со значениями растворенного кислорода меньше, чем в прибрежной зоне (менее 5.0 мл/л), распространяются на север до 27° с.ш., что свидетельствует о преобладании здесь деструкционных процессов.

Для уточнения структуры поверхностных вод была выполнена классификация с привлечением в качестве данных в узлах регулярной сетки не только среднесезонных значений температуры и солености, но также концентраций растворенного кислорода и фосфатов. Для теплого и холодного периодов года выделено 5 подрайонов (классов) (рис. 4). Среднеклассовые значения параметров представлены в табл. 1.

Первый подрайон занимает значительную часть шельфа Марокко: летом - от 21°00' с.ш. (м. Кап Блан) до 33°00' с.ш., зимой – от 21°00' с.ш. до 30°20' с.ш. Структура поверхностных вод в этом подрайоне формируется за счет вод Канарского течения, которое на широте м. Кап Блан (21° с.ш.) отклоняется на запад и дает начало Северному Пассатному течению. Среднеклассовые концентрации минерального фосфора в первом подрайоне в течение всего года невысоки, что определяется процессами фотосинтеза. На южную часть подрайона существенно влияет СМФ, который в летний период может достигать 24° с.ш.

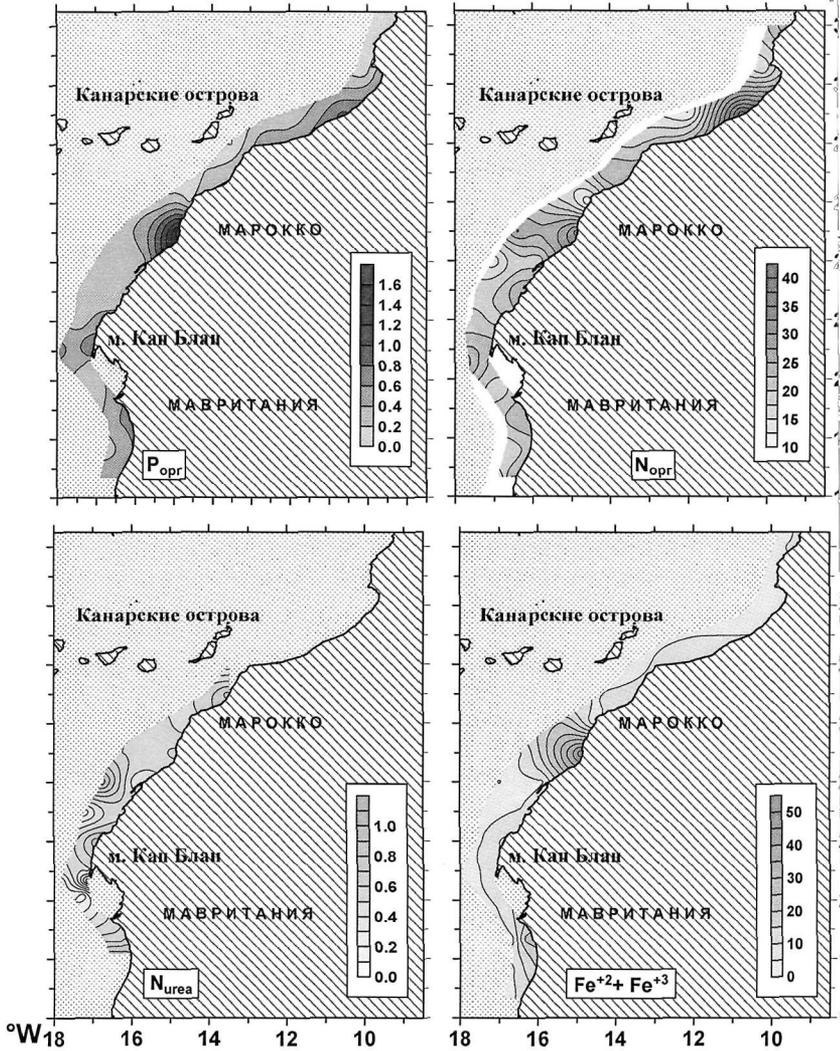


Рис.2. Распределение органических форм фосфора ( $P_{org}$ ) и азота ( $N_{org}$ ), азота мочевины ( $N_{urea}$ ) (мкг-ат/л) и железа (мкг/л) в поверхностном слое

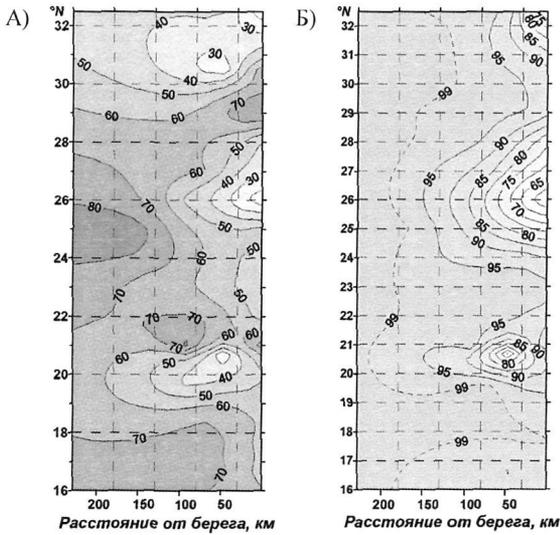


Рис. 3. Схема поверхностного распределения долей органического фосфора (А) и азота (Б) от их суммарного содержания, % (лето 2007 г.)

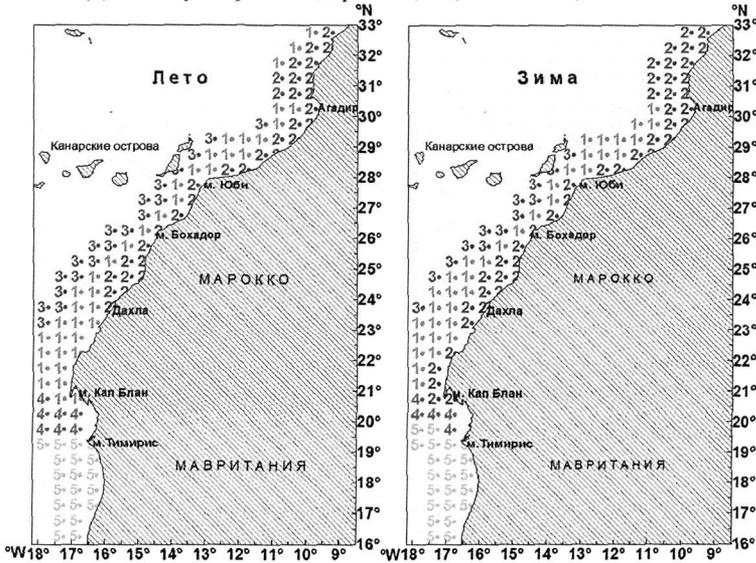


Рис. 4. Районирование поверхностных вод по среднееголетним значениям  $P-PO_4'''$  (мкг-ат/л),  $O_2$  (мл/л),  $T^\circ C$  и  $S\text{‰}$  в поверхностном слое

Таблица 1. Среднеклассовые значения параметров поверхностных вод на шельфе Марокко и Мавритании

№ кл.	Лето					Зима				
	*N	T°C	S‰	P-PO <sub>4</sub> <sup>'''</sup> , (мкг-ат/л)	O <sub>2</sub> , (мл/л)	*N	T°C	S‰	P-PO <sub>4</sub> <sup>'''</sup> , (мкг-ат/л)	O <sub>2</sub> , (мл/л)
1	40	19.07	36.39	0.34	5.27	36	19.28	36.49	0.31	5.25
2	34	17.27	36.25	0.47	5.26	45	17.77	36.34	0.54	5.20
3	20	20.77	36.62	0.24	4.99	13	20.74	36.67	0.26	5.01
4	7	21.71	35.96	0.70	4.68	5	20.41	35.98	0.83	4.48
5	20	25.62	35.96	0.36	4.78	22	23.47	35.95	0.72	4.71

\*N - количество объектов (узлов) в каждом классе.

Второй подрайон расположен в непосредственной близости от берега и приурочен, как правило, к зоне квазипостоянного прибрежного апвеллинга, где на поверхность поднимаются трансформированные воды САЦВ. В теплый сезон эти воды распространяются от 33°00' с.ш. до 22°30' с.ш. (п. Дахла), а в холодный сезон до 21°00' с.ш. (м. Кап Блан). В результате подъема в эвфотический слой промежуточных вод здесь отмечаются более высокие, чем в первом подрайоне средние концентрации фосфатов.

Третий подрайон расположен на склоне и по периферии шельфа Марокко: летом - от 23°00' до 29°30' с.ш., зимой - от 23°30' до 28°30' с.ш. Температура воды на поверхности здесь выше, чем в первом и втором подрайонах, а концентрации фосфатов самые низкие для всей исследуемой акватории, что обусловлено влиянием олиготрофных вод субтропического антициклонического круговорота.

Четвертый подрайон соответствует зоне взаимодействия вод Канарского течения и Северной ветви Межпассатного противотечения (северная и южная поверхностные водные массы). В результате смешения этих вод формируется водная масса, которая в летний период распространяется от 21° с.ш. (м. Кап Блан) до 19°20' с.ш. (м. Тимирис). Зимой площадь подрайона незначительно уменьшается. Здесь наблюдались самые высокие значения фосфатов и низкие значения растворенного кислорода, что согласуется с характеристиками ЮАЦВ.

Для пятого подрайона, расположенного к югу от м. Тимирис до южной границы зоны Мавритании (16°с.ш) характерны теплые воды, ассоциированные с Северной ветвью Межпассатного противотечения. В зимний период здесь отмечаются более высокие концентрации минерального фосфора.

Таким образом, с помощью классификации поверхностных вод по их гидрохимическим характеристикам выявлена сложная структура

поверхностных вод. Для теплого периода года почти во всех подрайонах прослежена тенденция к постепенному уменьшению средних значений растворенного кислорода и минерального фосфора. Для холодного периода выявлена незначительная тенденция увеличения концентраций кислорода в подрайонах Мавритании и в подрайоне прибрежного апвеллинга на шельфе Марокко.

Практически во всех районах наблюдалось синхронное изменение концентраций растворенного кислорода и фосфатов в течение всего исследуемого периода, что указывает на тесную связь процессов, обуславливающих их распределение. Неоднозначный характер межгодовой изменчивости гидрохимических показателей требует их более детального анализа.

Сложность гидрохимического режима вод определяется также неоднородностью Канарского течения. Оно не представляет собой целостного потока и состоит из серии струй, меандров, круговоротов. Некоторые циклонические круговороты имеют квазистационарный характер. Так, летом 2004 г. области высоких концентраций фосфатов в прибрежной зоне наблюдались в циркулирующих циклонического типа: у мыса Барбас (22°20' с.ш.) - 0.4 мкг-ат/л, на 24°10' с.ш. - 0.8 мкг-ат/л и на 26°20' с.ш. - более 1.0 мкг-ат/л. В 2006 и 2007 гг. высокие значения концентраций фосфатов до 1.2 мкг-ат/л отмечались также у мыса Барбас и в прибрежной зоне на 24°40'-25°00' с.ш. В зимний период из-за сезонного уменьшения интенсивности Канарского течения вихревые образования формируются значительно слабее.

**В четвертой главе** на основе данных пространственно-временной изменчивости гидрохимических показателей для летнего и зимнего периодов 2004 г. и 2006-2008 гг. проведены расчеты суточной первичной продукции. Показано, что ее величины, рассчитанные по убыли содержания фосфатов в поверхностном слое, наиболее репрезентативны. Обоснована значимость гидрохимического индекса в качестве дополнительного показателя интенсивности апвеллинга и биопродуктивности вод. Дан комплексный анализ межгодовой изменчивости гидрохимической структуры и биопродуктивности вод, распределения промысловых скоплений и биомассы пелагических видов рыб.

Изменения гидрохимических показателей прибрежных вод по мере удаления от центра апвеллинга в большей степени обусловлены процессами продуцирования органического вещества, чем горизонтальным и вертикальным перемешиванием водных масс.

Для расчета суммарной первичной продукции использовались соотношение Редфилда-Ричардса и уравнения (1)-(3), согласно которым, уменьшение концентраций минеральных форм основных биогенных элементов ( $\Delta P$ ,  $\Delta Si$  и  $\Delta N$ ) в поверхностном слое пропорционально количеству образовавшегося в результате фотосинтеза органического углерода ( $\Delta C$ ).

С использованием метода Вейхарта рассчитали, что запас биогенов был использован фитопланктоном в течение первых 3-15 суток. По изменению

содержания биогенных элементов в эвфотическом слое была рассчитана суточная продукция фитопланктона в мг  $C/m^3$ -сутки (ПП<sub>P</sub> – по убыли фосфатов, ПП<sub>Si</sub> – по убыли кремния, ПП<sub>N</sub> – по убыли азота). Результаты расчета для летнего периода 2007-2008 гг. представлены в табл. 2.

Таблица 2. Первичная продукция, рассчитанная для зоны Марокко по Вейхарту (Weichart, 1980), мг  $C/m^3$ -сутки

Район	2007 г. (летний период)			2008 г. (летний период)			
	ПП <sub>P</sub>	ПП <sub>Si</sub>	ПП <sub>N</sub>	ПП <sub>P</sub>	ПП <sub>Si</sub>	ПП <sub>N</sub>	ПП <sub>N</sub> (с учетом мочевины)
27° с.ш.	60.5	18.9	29.3	85.8	10.7	46.6	51.5
26.5° с.ш.	505.9	40.8	111.5	228.2	10.9	74.9	-
26° с.ш.	50.1	5.1	24.4	25.8	2.9	15.5	17.1
25° с.ш.	104.7	7.4	60.1	95.3	7.9	55.7	68.0
24° с.ш.	119.1	19.5	75.5	60.0	4.8	32.9	55.0
22° с.ш.	67.3	14.1	7.2	196.9	69.3	150.8	172.4
21° с.ш.	194.3	9.1	-	73.0	10.2	11.8	19.3

При расчете  $\Delta N$  учитывались определяемые минеральные формы азота (нитраты, нитриты и аммоний), а также мочевина. Показано, что добавление 30% азота мочевины (максимальное значение 2008 г.) увеличивает соотношение N:P от 7.4 до 9.3, что в целом недостаточно для обеспечения потребностей фитопланктона в азоте.

Соотношение кремния, азота и фосфора в поднимающихся глубинных водах непосредственно в зоне апвеллинга значительно отличается от соотношения Редфилда-Ричардса и изначально азот, либо кремний находятся в относительном дефиците, а фосфор в избытке ( $Si/P < 23$  и  $N/P < 16$ ). Недостаток кремния, возможно, компенсируется переносом его из аридных зон Африки в океан. Этот процесс носит локальный характер и происходит эпизодически, что отражается на изменчивости отношения  $Si/N$  в поверхностном слое (от 1 до 35). Максимальные значения наблюдались в зоне Мавритании.

Обеспечение фитопланктона азотом, возможно, происходит за счет азотфиксации с помощью диазотрофов. Эти процессы, в свою очередь, лимитируются доступным железом и фосфором, которые могут также поступать в поверхностные воды с золовыми потоками из Сахары, что позволяет лучше понять роль железа в продукционных процессах. При этом минеральный азот остается элементом, лимитирующим процессы фотосинтеза.

Выявлено, что расчетная величина первичной продукции, соответствующая убыли минерального фосфора, максимальна. Значительно ниже величины, рассчитанные по убыли азота и кремния. При оценке

первичной продукции по изменению содержания биогенных элементов в эвфотическом слое обычно не учитывается их поступление в воду из атмосферы, а также в результате минерализации органического вещества (рециклинга) или азотфиксации. Тем не менее, расчеты первичной продукции по убыли фосфатов дают наиболее репрезентативные величины суммарной первичной продукции, хотя и в этом случае недоучитываются дополнительные потребление и поступления минерального фосфора.

Использование гидрохимических данных позволило с помощью расчетных методов оценить биопродуктивность района апвеллинга в целом. Полученные результаты подтверждаются прямыми определениями первичной продукции радиоуглеродным методом. Рассчитанные по методу Вейхарта значения первичной продукции согласуются с данными других авторов (табл. 3).

Таблица 3. Величины первичной продукции, полученные разными методами

Район	Первичная продукция, мг С/м <sup>2</sup> ·сутки		
	Рассчитанная по Вейхарту (2004 г.)	Прямые измерения (АтлантНИРО, 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 <sup>1</sup>	-
28.5° с.ш. (М. Юби)	2,9	>0.9	3.1 <sup>3</sup> 2.4 <sup>4</sup>
17.6° с.ш.	2.4	>1.3	-
31.5-30.5° с.ш.	1.8 <sup>2</sup>	-	2.4 <sup>4</sup> 1.3 <sup>5</sup>

<sup>1</sup> - средние данные за 1994-1999 гг.; <sup>2</sup> - рассчитано по данным 1998 г.;

<sup>3</sup> - по данным Basterretxea and Aristegui (2000); <sup>4</sup> - по данным Minas et al (1982);

<sup>5</sup> - по данным Grall et al (1982)

Таким образом, величина убыли содержания фосфатов ( $\Delta P$ ) в поверхностном слое может использоваться в качестве дополнительного показателя интенсивности апвеллинга и биопродуктивности вод, как гидрохимический индекс, рассчитанный по разности концентраций непосредственно в зоне поднятия вод и в пункте ее максимального уменьшения вследствие ассимиляции.

Использование гидрохимических индексов позволило выявить пространственно-временную изменчивость продуктивности и интенсивности апвеллинга в различных зонах в летний период 2006-2008 гг. (рис. 5). Для сравнения был рассчитан термический индекс апвеллинга. Положительные

значения гидрохимического индекса и отрицательные значения термического индекса соответствуют более интенсивным процессам апвеллинга. Наиболее интенсивный апвеллинг в исследованном районе наблюдался в летний период 2007 г., а наименее интенсивный - в 2006 г., что согласуется с метеорологическими и океанологическими условиями.

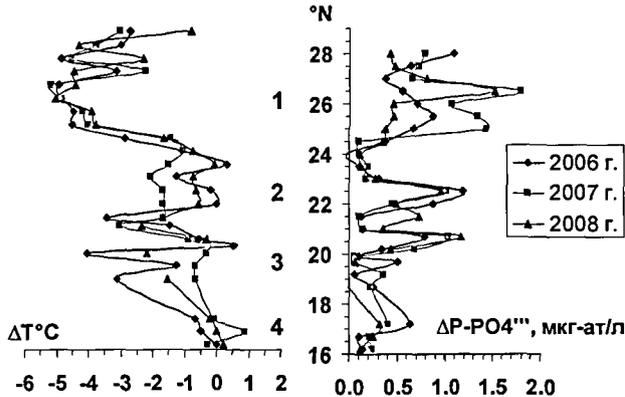


Рис. 5. Изменчивость термического ( $\Delta T$ ) и гидрохимического ( $\Delta P$ ) индексов по широте.

По характеру широтных изменений выделено четыре подрайона с различной интенсивностью апвеллинга: 1) подрайон севернее  $23^{\circ}30'$  с.ш.; 2) подрайон  $23^{\circ}30' - 21^{\circ}00'$  с.ш.; 3) подрайон  $21^{\circ}00' - 19^{\circ}20'$  с.ш.; 4) подрайон южнее  $19^{\circ}20'$  с.ш. Их положение соответствует подрайонам, выделенным методом кластерного анализа, а также подрайонам, выделенным другими авторами по гидрофизическим и гидробиологическим показателям.

Характер изменчивости среднееголетних (расчитанных по данным 1994-2008 гг.) значений индексов апвеллинга также отражает изменчивость положения и интенсивности зон апвеллинга, обусловленную особенностями режима пассатной циркуляции, интенсивность которой в зоне Марокко в летний период увеличивается. Особенно заметно это севернее  $23^{\circ}30'$  с.ш., где в летний период по термическому и по гидрохимическому индексам апвеллинг более интенсивный, а следовательно выше и биопродуктивность вод.

Анализ межгодовой изменчивости средних значений гидрохимического индекса позволил выделить годы с различной интенсивностью апвеллинга и биологической продуктивностью с 1994 по 2008 гг. (рис. 6). Максимальная интенсивность в летний период отмечалась в 1997, 1998, 2006 и в 2007 гг., минимальная - в 1994, 1995 и в 2004 гг. Летом 2008 г. интенсивность апвеллинга (индекс -  $0.5 \text{ мкг-ат/л}$ ) была выше среднееголетних значений (индекс -  $0.3 \text{ мкг-ат/л}$ ), но ниже, чем в аналогичный период 2006 и 2007 гг.

Зимой 2008 г. произошло сезонное уменьшение интенсивности подъема вод. Для оценки долгопериодных тенденций применялся тренд-анализ, который показал устойчивый рост интенсивности апвеллинга с 1994 по 1997 и с 2004 по 2007 гг.

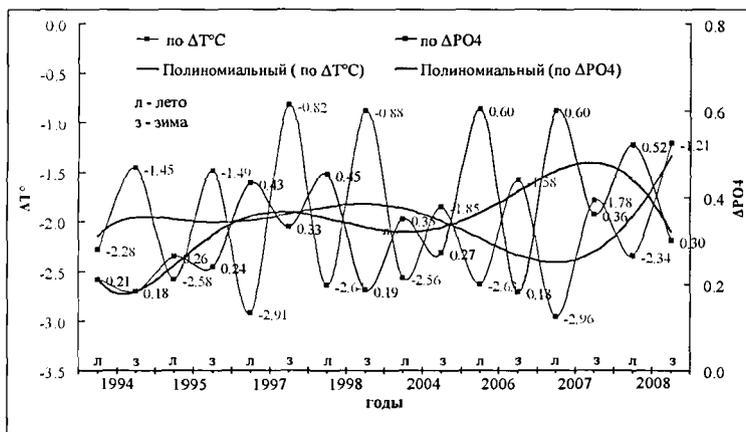


Рис. 6. Средние значения термического и гидрохимического индексов апвеллинга в зоне Марокко и их тренды с 1994 по 2008 гг.

Комплексные исследования экосистемы Канарского апвеллинга, выявили хорошую связь содержания фосфатов, с положением промышленных скоплений основных пелагических видов рыб этого района.

Наиболее четко годовая цикличность миграций пелагических рыб выражена у круглой сардинеллы (*Sardinella aurita*). Район обитания и миграция этого вида в значительной степени связаны с распределением поверхностных водных масс. По содержанию фосфатов прослежено положение фронтальной зоны, разделяющей южную и северную поверхностные водные массы (рис. 7А). С января по июль промышленные скопления круглой сардинеллы располагаются с южной стороны фронтальной зоны (к югу от м. Кап-Блан). Значения фосфатов в поверхностном слое в этот период изменяются от 0.5 до 1.2 мкг-ат/л. С июля по октябрь нагульные скопления круглой сардинеллы находятся в северной части ареала у м. Кап-Блан. Значения фосфатов здесь составляют 0.5-1.0 мкг-ат/л.

Миграции половозрелой европейской ставриды (*Trachurus trachurus*) также связаны с сезонной последовательностью широтных колебаний гидрологических условий. Эти миграции согласуются с сезонным распределением фосфатов и определяются сезонным перемещением участков наиболее интенсивного подъема глубинных вод, где отмечаются максимальные концентрации фосфатов (рис. 7 Б). Со смещением фронтальной зоны к югу

(декабрь-апрель) ставрида перемещается в зону Мавритании. В мае-сентябре, когда фронт смещается на север, промысловые скопления также мигрируют в северном направлении, оставаясь на северной периферии участка интенсивного подъема глубинных вод, где значения фосфатов изменяются от 0.5 до 0.8 мкг-ат/л.

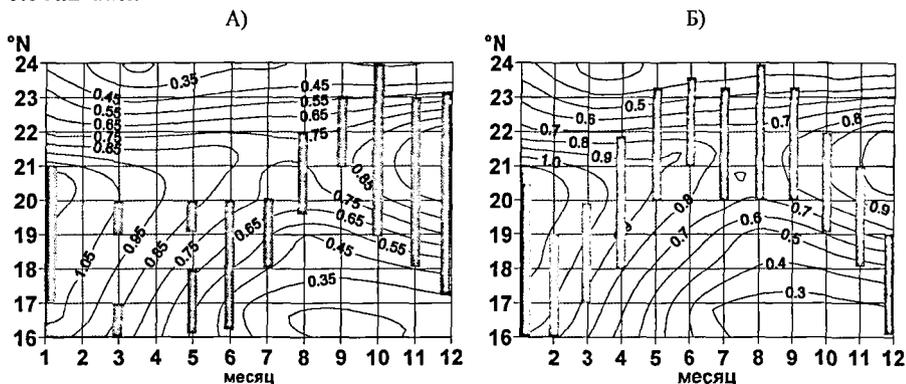


Рис. 7. Распределение промысловых скоплений круглой сардинеллы - А (Voely et al., 1982) и европейской ставриды - Б (Доманевский, 1998) в зависимости от пространственно-временной изменчивости содержания фосфатов (мкг-ат/л) на горизонте 10 м в прибрежной зоне Марокко и Мавритании

- положение скоплений круглой сардинеллы
- положение скоплений европейской ставриды

Сезонные миграции европейской сардины (*Sardina pilchardus*) определяются интенсивностью апвеллинга и положением фронтальной зоны. По данным тралово-акустической съемки промысловые скопления европейской сардины в июле 2006 г. наблюдались на широтах 24°30' - 26°00' с.ш., а в тот же период 2007 г. на 24°30' - 25°00' с.ш., что хорошо согласуется с зонами максимальных значений гидрохимических индексов апвеллинга.

Таким образом, пространственно-временная изменчивость содержания биогенных элементов в поверхностном слое, связанная с суммарной продуктивностью, в значительной степени определяет распределение промысловых скоплений некоторых пелагических видов рыб района Канарского апвеллинга.

### **Основные выводы:**

1. Основными процессами, определяющими изменчивость среднесезонных значений гидрохимических параметров в районе Канарского апвеллинга, являются динамика водных масс и интенсивность продукционно-деструкционных процессов.

2. Классификация поверхностных вод Канарского апвеллинга по совокупности гидрохимических показателей позволила выявить их сложную структуру, в составе которой выделено 5 подрайонов с различными значениями показателей.

3. По распределению биогенных элементов в зоне Марокко показано, что высокими значениями фосфатов (более 1.2 мкг-ат/л) отличаются не только районы апвеллинга, но и вихревые образования циклонического типа.

4. Величины первичной продукции района Канарского апвеллинга, рассчитанные по убыли содержания фосфатов в поверхностном слое, наиболее репрезентативны. Среднее значение суточной первичной продукции 2.3 гС/м<sup>2</sup>-сутки совпадает с результатами ее прямых измерений.

5. Показано, что биогенным элементом, лимитирующим процесс первичного продуцирования в период исследований, являлся азот.

6. Для оценки интенсивности апвеллинга предложено использовать гидрохимический индекс, рассчитанный по разности концентраций фосфатов непосредственно в зоне поднятия вод и в пункте их максимального уменьшения вследствие ассимиляции. Интенсивность апвеллинга в летний период, как правило, выше, чем в зимний. Устойчивый рост интенсивности апвеллинга происходил в период с 1994 по 1997 и с 2004 по 2007 гг., что связывается с глобальными процессами атмосферной циркуляции.

7. Пространственно-временная изменчивость содержания биогенных элементов в поверхностном слое напрямую связана с формированием кормовой базы, которая в значительной степени определяет меридиональные миграции промысловых пелагических видов рыб. Их максимальные поверхностные скопления приурочены к фронтальной зоне и к зонам интенсивного апвеллинга, выделенным по гидрохимическим параметрам.

8. Выявленные особенности пространственно-временной изменчивости гидрохимической структуры позволяют лучше понять механизмы формирования зон высокой продуктивности района Канарского апвеллинга, а также использовать гидрохимические данные при создании различных моделей с целью долгосрочного прогнозирования запасов промысловых видов рыб.

**Основные результаты работы, опубликованные в изданиях  
рекомендованных ВАК РФ:**

Духова Л.А., Шнар В.Н., Чернышков П.П., Смольянинова Е.А., Тимохин Е.Н., Ремесло А.В., Сапожников В.В. Исследование гидрохимической структуры вод Канарского апвеллинга в июле-августе 2008 г. // Океанология. 2009. Т. 49. № 4. С. 630-633 - 1.0 печ.л. (лично автором – 0.6 печ.л.).

Духова Л.А., Шнар В.Н., Чернышков П.П., Смольянинова Е.А., Краснобородько О.Ю., Михеев А.Б., Сапожников В.В. Комплексные исследования пелагической экосистемы у побережья Западной Африки на СТМ «Атлантида» в июле-августе 2007 г. // Океанология. 2008. Т. 48. № 3. С. 484-489 – 1.5 печ.л. (лично автором – 0.9 печ.л.).

Сапожников В.В., Чернышков П.П., Шнар В.Н., Духова Л.А., Батрак К.В. Комплексные исследования пелагической экосистемы района Канарского апвеллинга на СТМ "Атлантида" в июле-августе 2006 г. // Океанология. 2007. Т. 47. № 3. С. 473-476 – 1.0 печ.л. (лично автором – 0.4 п.л.).

**В прочих изданиях:**

Духова Л.А., Шнар В.Н., Глеза И.Л. Исследования гидрохимической структуры вод у побережья Западной Африки в 1994-2008 гг. // XIV Конференция по промысловой океанологии и промысловому прогнозированию. Сборник тезисов. Калининград. 2008. С. 66-68 – 0.3 печ.л. (лично автором – 0.15 печ.л.).

Чернышков П.П., Шнар В.Н., Духова Л.А., Батрак К.В., Бурыкин С.Н., Д.А. Донченко. Особенности гидролого-гидрохимического режима района Канарского апвеллинга в июле 2006 г. // Вопр. промысл. океан. 2006. Вып. 3. С.333-344 – 1.5 печ.л. (лично автором – 0.9 п.л.).

Духова Л.А., Шнар В.Н., Глеза И.Л., Малышко А.П. Сезонная изменчивость структуры вод и особенности распределения промысловых скоплений в районе Канарского апвеллинга // Вопр. промысл. океан. 2009. Вып. 6. №2. С. 146-156 – 1.4 печ.л. (лично автором – 1.0 п.л.).

Духова Л.А., Шнар В.Н., Тимохин Е.Н. Межгодовая изменчивость гидрохимических параметров в поверхностных водах в районе Канарского апвеллинга // Вопр. промысл. океанолог. 2009. Вып. 6. №2. С. 135-145 – 1.4 печ.л. (лично автором – 1.0 п.л.).

Подп. в печать 04.03.10 Объем 1,5 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 795  
ВНИРО. 107140, Москва В. Красносельская, 17