

Исследование пространственно-временной изменчивости первичной продукции Азорского района по данным спутниковых измерений

А.В. Колдунов, А.Г. Черкашёва

*Санкт-Петербургский государственный университет
199178 Санкт-Петербург, В.О., 10 линия, д. 33/35
E-mails: koldunovaleksey@gmail.com, aynask@gmail.com*

В работе приводятся результаты исследования пространственно-временной изменчивости первичной продукции в Азорском районе Атлантического океана, рассчитанной по спутниковым данным. В ходе исследования были рассчитаны статистические характеристики значений первичной продукции, описана их межгодовая и сезонная изменчивость. Проведен динамико-стохастический анализ, по результатам которого были изучены динамические факторы изменчивости первичной продукции. Для обнаружения фронтальных зон были рассчитаны поля дивергенции первичной продукции.

Ключевые слова: Атлантический океан, Азорские острова, первичная продукция, фронтальные зоны.

Введение

Азорский регион располагается между Азорским течением и южным ответвлением Северо-Атлантического течения и является динамически относительно спокойной областью Северной Атлантики. Скорости поверхностного течения здесь составляют в среднем около 10 см/с [1]. Интенсивность синоптической изменчивости динамики вод Азорского региона представляется достаточно умеренной. На нее оказывают влияние такие структуры, как, к примеру, Средиземноморские вихри (в англоязычной литературе известные как Meddies) и вихри, отделившиеся от Азорского течения [2]. Эти структуры могут или охватывать все глубины океана, или существенно влиять на состояние выше- и нижележащих вод. Данные вихри, предположительно, оказывают значительное влияние на транспорт вод с различными физическими и биологическими характеристиками. Океанографические условия способствуют также формированию в районе биотических и динамических фронтов, играющих важную роль в формировании общей изменчивости региона. Исследования субтропической северо-западной части Атлантического бассейна позволили предположить, что синоптические вихри могут являться важным фактором, определяющим биологическую продуктивность этих широт. Однако, подобные расчеты не проводились для субтропической северо-восточной части Атлантического бассейна, включающей в себя Азорский регион. Данная работа посвящена изучению особенностей пространственно-временной изменчивости первичной продукции под влиянием динамических факторов, таких как адвекция и турбулентная диффузия, а также изучению распределения зон вергенции, как показателей положения фронтальных зон.

Исследуемый район включает в себя Азорские острова и окружающие его воды (33° - 43° с.ш. и 22° - 32° з.д.). В работе использовались данные о первичной продукции (ПП) за 2002-2007гг, рассчитанные при помощи модели VGPM [3], по данным спектрорадиометра MODIS и сенсора SeaWiFS о концентрации хлорофилла (CHL), фотосинтетически активной радиации (PAR) и температуры водной поверхности (SST). Массив данных содержит временные ряды в узлах регулярной сетки с пространственной дискретностью около 9 км и шагом по времени 8 суток.

Среднегодовая и среднемесячная изменчивость первичной продукции

Осреднение по всему временному периоду (рис. 1) выявило в целом уменьшение значений ПП с севера на юг. Наибольшая активность роста ПП (более 450 мгС/м²/день) отмечена непосредственно вблизи Азорских островов (38°-39° с.ш. и 26° -30° з.д.), а также к северо-западу от них. К северо-востоку от Азорских островов также расположена область повышенных значений ПП, но меньшая по площади.

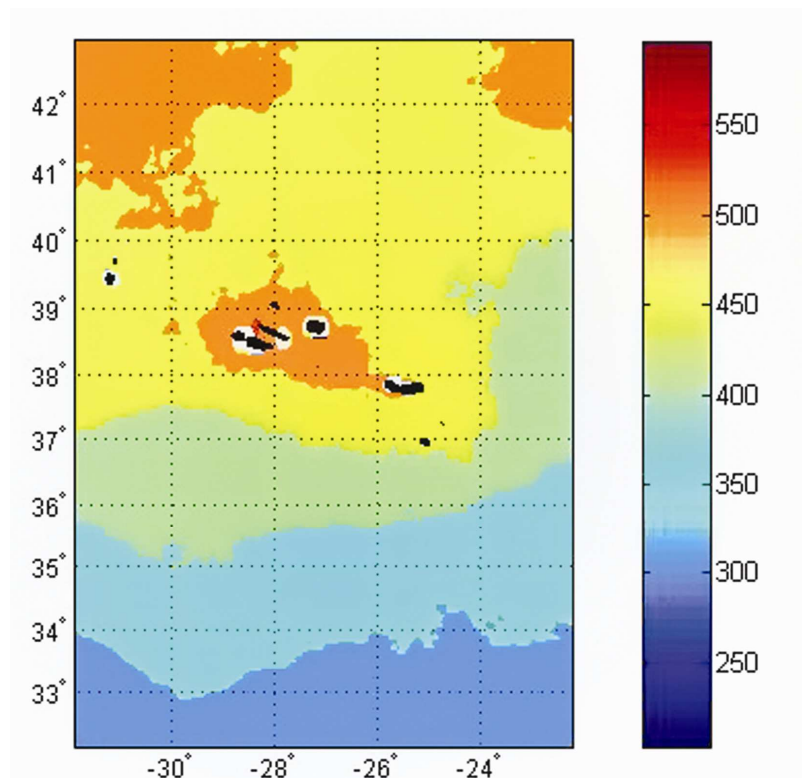


Рис.1 Поле средних значений первичной продукции (мг/м² в день), 2002-2007 гг.

При рассмотрении межгодовой изменчивости, можно отметить, что наиболее продуктивными являлись 2003 и 2007 годы. В 2003 году область с повышенными значениями ПП (более 450 мгС/м²/день) распространяется на весь участок к северу от 37° с.ш. При этом южная часть района характеризуется пониженными значениями ПП (ок. 250 мгС/м²/день). Также в 2003 году были отмечены максимальные значения ПП за исследуемые годы (более 600 мгС/м²/день) вдоль побережья островов и к северо-западу от них. В 2007 году не наблюдалось значений роста ПП выше 550 мгС/м²/день. Однако, область повышенных значений (более 450 мгС/м²/день) также как и в 2003 году, охватывает практически всю северную часть района (севернее 37° с.ш.). Наименее продуктивным является 2002 год, с областью минимальных значений (менее 250 мгС/м²/день) распространяющейся вплоть до 35° с.ш. на север. При этом область повышенных значений расположена на северо-востоке района, а не на северо-западе, как в остальные годы. В 2004, 2005 и 2006 годы зафиксирован значительно меньший разброс значений роста ПП, с повышенными значениями у побережья островов и к северо-востоку от них. В 2004 году максимум на северо-западе района более выражен, чем максимум на побережье. Наименьшая пространственная изменчивость наблюдается в 2005 году, разброс значений от севера к югу составляет всего 150 мгС/м²/день.

Изменчивость среднеквадратического отклонения первичной продукции

Для изучения изменчивости различных областей района были рассчитаны среднеквадратические отклонения (СКО) первичной продукции по всему полю сеточной области (рис. 2). Значения СКО уменьшаются с севера на юг от 350 до 150 мгС/м²/день до 37° с.ш., а южнее 37° с.ш значения СКО слабо колеблются, достигая 100 мгС/м²/день лишь в в районе около 32° с.ш. Области повышенных значений СКО совпадают с областями повышенных значений среднего содержания ПП (обширная область к северо-западу от Азорских островов и меньшая к северо-востоку).

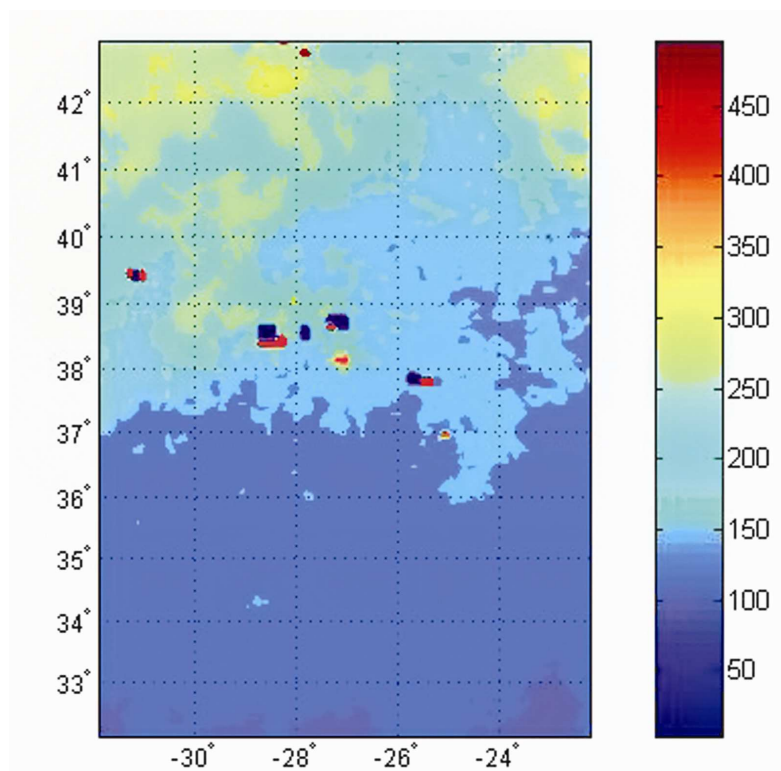


Рис.2. Поле значений СКО первичной продукции (мг/м² в день), 2002-2007 гг.

При анализе межгодовой изменчивости СКО наблюдается та же тенденция, что и при анализе карт среднего содержания ПП. Пространственная изменчивость СКО в 2002, 2003 и 2007 годах значительно более выражена, чем в 2004, 2005 и 2006. При этом наибольшая пространственная изменчивость СКО наблюдается в 2003 году, от максимальных значений (более 450 мгС/м²/день) на северо-западе до минимальных (менее 100 мгС/м²/день) в южной части района. Область минимальных значений сильно смещена к югу. В 2007 году выражен максимум на северо-востоке участка (до 450 мгС/м²/день), однако он невелик и сменяется минимальными значениями (ок. 100 мгС/м²/день) уже на 40° с.ш. Область повышенных значений наблюдается также на северо-западе района, хотя максимальные значения здесь не так велики (ок. 300 мгС/м²/день). Южнее 38° с.ш значения СКО колеблются в незначительных пределах, медленно убывая с севера на юг (от 150 до 100 мгС/м²/день). 2002 год характеризуется наименьшими значениями СКО (от 50 мгС/м²/день на юге до 300 мгС/м²/день на севере района). Наибольшие значения отмечаются в северо-восточной части района. 2005 год, который при анализе карт среднего содержания ПП являлся наименее изменчивым по пространству, характеризуется большими перепадами значений СКО чем 2004 и 2006 года (от 400 мгС/м²/день на северо-западе до 100 мгС/м²/день на юге района). В 2004 году значения СКО в целом по району низкие (ок. 100-150 мгС/м²/день) с локальным максимумом на северо-западе района (ок. 100 мгС/м²/день). Значения СКО 2005 года менее прочих изменяются по пространству (от 100 мгС/м²/день на юге до 300 мгС/м²/день на северо-востоке региона).

Сезонная изменчивость первичной продукции

На графике осредненного по пространству временного хода ПП (рис. 3.) явно выражены весенние максимумы и почти не выражены осенние. Также стоит отметить одну заметную вспышку цветения первичной продукции в 2003 году, приходящуюся на второй пик весеннего цветения. Остальные годы характеризовались относительно схожими между собой характерами внутригодовой изменчивости, хотя каждый имеет некоторые особенности. Так в 2004 году весенняя вспышка была самой кратковременной, а в 2006 самой продолжительной. В 2005 году весеннее цветение проходило аналогично таковому в 2003 году, но второй максимум по величине не отличался от первого, хотя и был также ярко выражен.

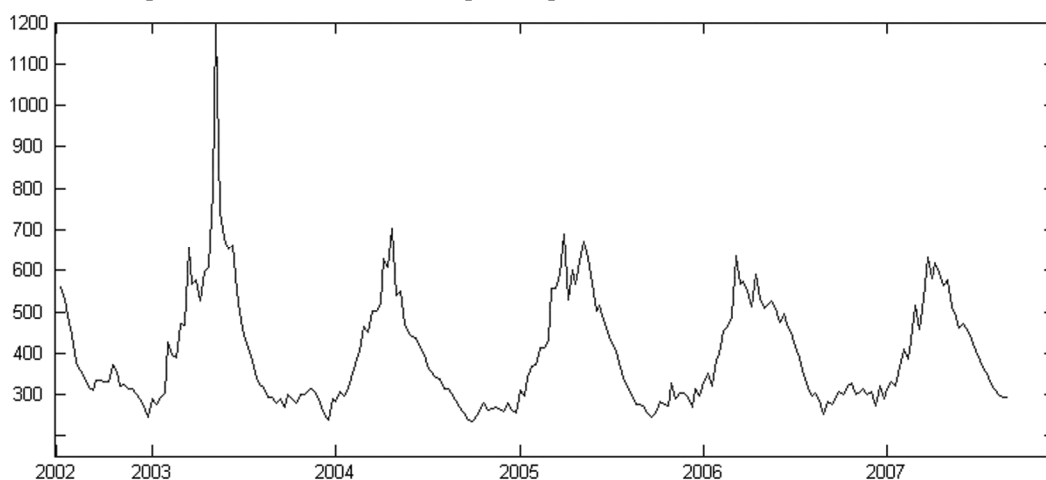


Рис. 3. Временной ход первичной продукции ($\text{мгС}/\text{м}^2$ в день), 2002-2007 гг.

При рассмотрении пространственно-временной изменчивости полей ПП, можно видеть, что цветение начинается в январе на юге района, уже к февралю охватывая практически всю область южнее островов и достигая достаточно высоких значений (около $500 \text{ мгС}/\text{м}^2/\text{день}$). К марту область высокой продуктивности сосредотачивается вокруг островов в районе $35-40^\circ$ с.ш. В дальнейшем область в повышенными содержаниями ПП продолжает распространяться к северу, и в мае наибольшие значения содержания ПП (более $800 \text{ мгС}/\text{м}^2/\text{день}$) наблюдаются именно к северу от островов. В этом же месяце начинается затухание вспышки цветения в южных районах.

В июне значения начинают понижаться и на севере района, достигая минимальных значений к сентябрю (менее $200 \text{ мгС}/\text{м}^2/\text{день}$ на юге и около $300 \text{ мгС}/\text{м}^2/\text{день}$ на севере области). С октября вновь наблюдается увеличение концентраций ПП в районе островов, но в связи с тем, что оно является весьма незначительным (достигает в отдельных районах $400 \text{ мгС}/\text{м}^2/\text{день}$) по сравнению с весенне-летним цветением, вряд ли может считаться второй вспышкой цветения.

Динамико-стохастический анализ изменчивости первичной продукции

В работе был использован динамико-стохастический анализ [4], суть которого заключается в следующем. Пространственно-временную изменчивость ПП можно записать в виде уравнения переноса, диффузии и биотической трансформации в виде:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial x} + v \frac{\partial P}{\partial y} = A\Delta P + bP + cP^2, \quad (1)$$

где P - первичная продукция, u и v - составляющие вектора скорости, Δ - лапласиан, b - коэффициент отражающий рост биомассы, c - коэффициент, отражающий внутривидовую конкуренцию. Биотическая часть представляет собой уравнение логистического роста (уравнение Ферхюльста) и описывает экспоненциальный рост фитопланктона ограниченный внутривидовой конкуренцией.

Уравнение (1) можно представить как уравнение множественной регрессии:

$$\frac{\partial P}{\partial t} = a_0 + a_1 \frac{\partial P}{\partial x} + a_2 \frac{\partial P}{\partial y} + a_3 \Delta P + a_4 P + a_5 P^2, \quad (2)$$

где $\frac{\partial P}{\partial t}$ – предиктант; $\frac{\partial P}{\partial x}$, $\frac{\partial P}{\partial y}$, ΔP , P , P^2 – предикторы; $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ – коэффициенты

регрессии. Таким образом, коэффициенты регрессии имеют определённый физический смысл. Так, a_1 и a_2 – составляющие вектора скорости на параллель и меридиан, a_3 – коэффициент горизонтальной турбулентной диффузии, a_4 – коэффициент роста биомассы, a_5 – коэффициент внутривидовой конкуренции, a_0 – коэффициент, учитывающий все неучтенные эффекты (такие как выедание, расходы на дыхание, вертикальная турбулентная диффузия). То есть, аппарат множественной регрессии позволяет рассчитать все рассматриваемые коэффициенты. Таким образом, опираясь на данные по пространственно-временному распределению хлорофилла, можно получить оценки физических характеристик уравнения (1).

По результатам проведения динамико-стохастического анализа были получены значения коэффициентов регрессии, а также значение коэффициента множественной корреляции, показывающего степень адекватности модели исходным данным (рис. 4). Наибольшие значения коэффициента множественной корреляции наблюдаются в южной части района, которая отмечена самым интенсивным цветением и наибольшими значениями первичной продукции. В среднем по району значения этого коэффициента превышают 0.5, что говорит в пользу пригодности используемой модели.

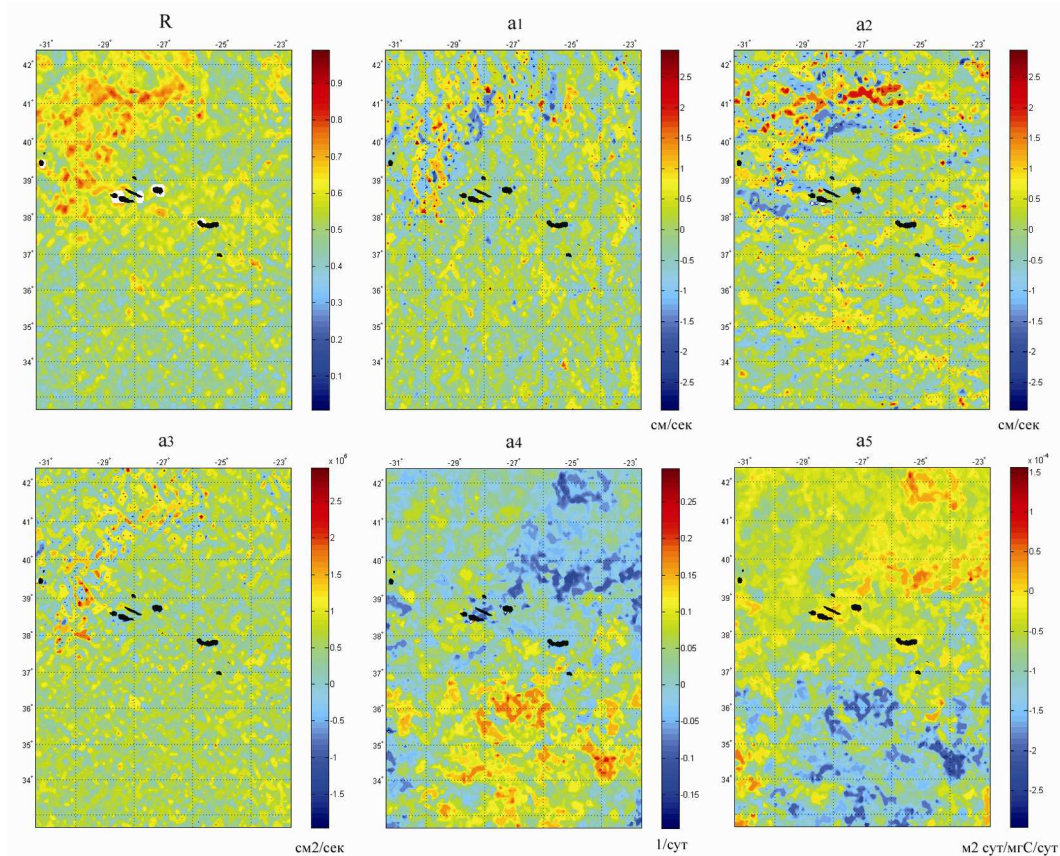


Рис. 4. Пространственное распределение коэффициента множественной корреляции R и коэффициентов регрессии для уравнения (2)

Проведем анализ и динамико-биотическую интерпретацию пространственного распределения каждого коэффициента регрессии по отдельности. Члены a_1 (проекция вектора на параллель) и a_2 (проекция вектора на меридиан) уравнения имеют смысл адвекции. Значения обоих коэффициентов колеблются от -4 до 4 см/с, причём разброс их примерно одинаков относительно нуля как в сторону

положительных, так и в сторону отрицательных значений. Наибольший разброс значений наблюдается к северо-западу от островов. В качестве коэффициента горизонтальной турбулентной диффузии в уравнении выступает член a_3 . Как и в случае с коэффициентами адвекции, значения его имеют как отрицательные, так и положительные значения. Среднее по пространству значение близко к единице. Наибольший разброс значений вновь наблюдается к северо-западу от островов. Коэффициент a_4 , отражающий в уравнении рост биомассы имеет размерность сутки⁻¹. Отметим, что в целом положительные значения преобладают над отрицательными. К югу же от островов отрицательные значения отсутствуют вовсе. Здесь наблюдается ярко выраженный максимум с наибольшими значениями этого коэффициента - 0.2 суток⁻¹. Отрицательные значения отмечаются на северо-востоке области. Также в уравнение входит коэффициент a_5 , отражающий внутривидовую конкуренцию и имеющий размерность м³/мг-сутки. Распределение этого коэффициента в пространстве имеет схожий характер с распределением коэффициента, характеризующего неограниченный рост, причём в местах максимума коэффициента неограниченного роста выражены минимумы коэффициента внутривидовой конкуренции и наоборот. В среднем, значения этого коэффициента отрицательные.

Анализ биотических фронтальных зон и фронтов по данным течений и первичной продукции

Одним из способов определения фронтальных зон по спутниковым данным является определение зон конвергенции потоков [5]. По полям первичной продукции и скоростей течений в работе были рассчитаны поля дивергенции потока первичной продукции. При этом отрицательным значениям дивергенции соответствуют зоны конвергенции потока, интерпретируемые как фронтальная зона.

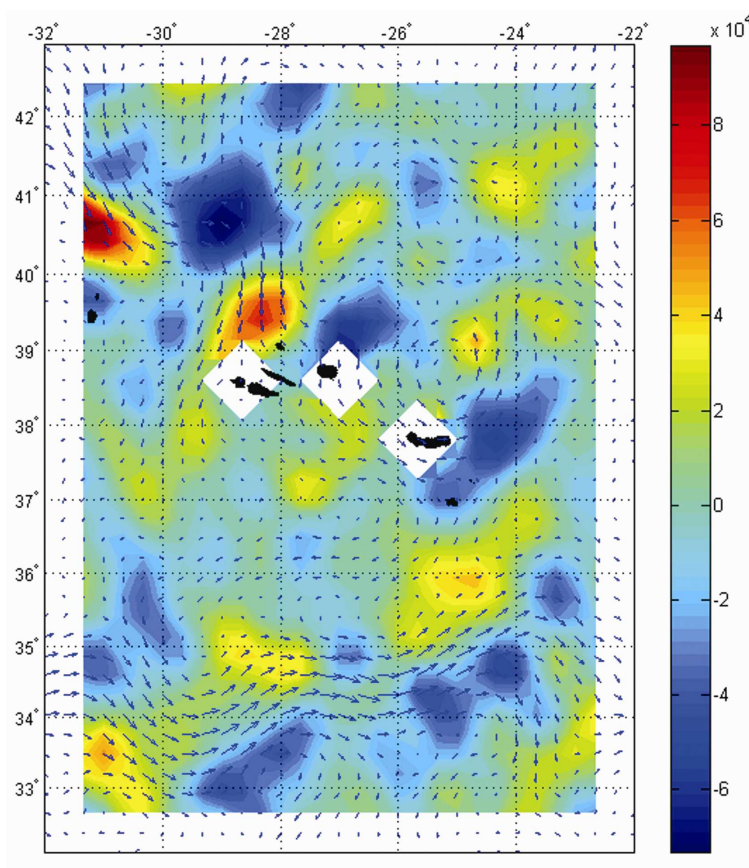


Рис. 5. Поле дивергенции потока первичной продукции с наложенными на него скоростями течений

На рис. 5 представлена карта значений дивергенции потока первичной продукции с наложенными на неё векторами скоростей геострофического течения, рассчитанного по альтиметрическим измерениям (данные AVISO). В поле дивергенции можно выделить 2 выраженные фронтальные зоны. Первая из них находится к северо-западу от островов. Она совпадает с зоной максимальных средних значений ПП и наиболее интенсивного цветения, а также областью, где максимально развиты адвекция и турбулентная диффузия. Эта фронтальная зона является наиболее выраженной. Вторая фронтальная зона занимает области к востоку и югу от островов. Южная ее часть совпадает с районом, где первой проявляется вспышка цветения в январе-феврале.

Сравнивая поле дивергенции с полем скоростей течений можно отметить, что северо-западная фронтальная зона приурочена к району локализации Южной Ветви Северо-Атлантического течения. Наименьшие значения дивергенции (характеризующие фронтальную зону) располагаются на широте 40° - 41° и долготе 28° - 30° , где наблюдается некоторый «разрыв» Южной Ветви Северо-Атлантического течения и скорости падают с 10 см/с до 6 см/с, а за фронтальной зоной вновь повышаются до 9 см/с. Также значительная конвергенция отмечена в районе 39° - 40° с.ш., 26° - 28° з.д., где скорости течения падают до 2-4 см/с. Южная фронтальная зона находится в районе распространения Азорского течения, в целом располагаясь на его периферии. Исключение составляет лишь юго-восток района, где фронтальная зона «заезжает» на область самого течения. Стоит отметить, что фронтальные зоны, в основном, располагаются на периферии течений, что весьма логично и говорит о пригодности данной методики для определения положения фронтальных зон.

Выводы

Анализ полей среднего и среднеквадратического отклонения роста первичной продукции выявил следующие особенности пространственно-временной изменчивости содержания ПП. На широте 37° наблюдается четко выраженный фронт, отделяющий более продуктивную северную часть района от менее продуктивной южной. Максимальные значения роста первичной продукции отмечаются вдоль побережья островов и к северо-западу от них. Наиболее продуктивными являлись 2003 и 2007 годы, наименее продуктивным – 2002 год. Характер пространственной изменчивости в 2004, 2005 и 2006 годах сходен. Разброс между наименьшими и наибольшими значениями роста первичной продукции в эти годы минимален.

Результаты динамико-стохастического анализа, в целом, показали адекватность полученных уравнений множественной регрессии. Коэффициенты множественной корреляции во всех четырёх вариантах имеют значения, превышающие 0.5 на большей части выбранной акватории. В отдельных районах коэффициент множественной корреляции достигает 0.8, причём точки с наибольшими значениями локализуются на северо-западе акватории, в зоне южной ветви Северо-Атлантического течения и Срединно-Атлантического хребта. При этом биотический фронт, наблюдаемый на картах распределения первичной продукции и расположенный в летний период в районе 35 - 37° з.д., слабо проявляется в поле значений коэффициента множественной корреляции. Следует также отметить, что полученные значения коэффициентов уравнения регрессии не противоречат известным их оценкам по данным натурных измерений, что также свидетельствует в пользу адекватности результирующих уравнений. Сравнительный вклад биотических и абиотических факторов в пространственно-временную изменчивость первичной продукции крайне не равномерен по акватории и не имеет выраженной локализации. Наибольший вклад во временную изменчивость первичной продукции вносят биотические факторы, а среди динамических факторов наиболее значима горизонтальная турбулентность.

Работа выполнена в рамках проекта LAMAR (LAMAR-DRCT/FRCT- M2.1.2/F/008/2007).

Литература

1. *Juliano, M.F., Alves M.L.* The Atlantic Subtropical Front/Current Systems of Azores // *Journal of Physical Oceanography*. 2007. Vol. 37. No. 11. Pp. 2573-2598.
2. *Frantantoni, D.M.* North Atlantic Surface Circulation during the 1990 's observed with satellite-tracked drifters // *Journal of Geophysical Research*. 2001. Vol. 106. No. 10. Pp. 22067- 22093.
3. *Behrenfeld, M. J. and P. G. Falkowski.* Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration // *Limnol. Oceanogr.*, 1997. Vol. 42. Pp. 1–20.
4. *Колдунов А.В., Фукс В.Р.* Динамико-стохастический анализ изменчивости первичной продукции в океане на основе спутниковой информации // *Большие морские системы России в эпоху глобальных изменений (климат, ресурсы, управление): Материалы международной научной конференции (Ростов-на-Дону, 10-13 октября 2007 г.)*. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮНЦР АН, 2007. стр. 70-72.
5. *Фукс В.Р.* Выделение динамического и термодинамического фронта на поверхности моря на основе спутниковых съёмок // *Вестник СПбГУ*, 2007. Сер. 7. Вып. 1.

Studying spatiotemporal variability of primary production in Azores region by using satellite measurements data

A.V. Koldunov, A.G. Cherkasheva

*Saint Petersburg State University, Faculty of Geography and Geoecology
33/35 10th Line, St. Petersburg, 199178, Russia*

The results of primary production temporal-spatial variability investigating in the Azores region of Atlantic Ocean, calculated according to satellite data, are given in this work. In the study the statistical characteristics of the primary production values were calculated, their interannual and seasonal variability was described. The dynamics-stochastic analysis was made, and dynamic factors of the primary production variability were studied. The fields of the divergence of primary production were calculated for detecting the frontal zones.

Keywords: Atlantic Ocean, Azores, Primary production, frontal zones.