

## Исследование изменчивости первичной продукции в Японском море по спутниковым данным на основе ЭОФ-анализа

Ю.В. Шамбарова <sup>1</sup>, И.Е. Стёпочкин <sup>2</sup>, С.П. Захарков <sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева  
Владивосток, 690041, Россия  
E-mail: shambarova@poi.dvo.ru*

<sup>2</sup>*Морской государственный университет им. адм. Г.И. Невельского  
Владивосток, 690059, Россия  
E-mail: fizeg@gmail.com*

В работе приводятся результаты исследований пространственно-временной изменчивости первичной продукции (ПП) Японского моря, рассчитанной по спутниковым данным. Проанализирован ряд наблюдений с 2003 по 2012 гг. за сезонной и межгодовой изменчивостью первичной продукции. Проведен анализ пространственных и временных структур первичной продукции с применением метода эмпирических (естественных) ортогональных функций. В результате были выделены 3 значимых моды, вклад в общую дисперсию которых составил для первой моды – 54,8%, второй и третьей – 16,2% и 7,1%. Было выявлено, что наибольшая пространственная изменчивость ЭОФ1 отмечалась в юго-восточной части и прибрежном районе Приморского края. В пространственной распределении ЭОФ2 наблюдалось зонирование Японского моря вдоль субарктического фронта на северную и южную часть. Временная составляющая первой и второй моды связана с вкладом весеннего цветения и с динамикой изменчивости первичной продукции от года к году. ЭОФ3 показала особенности развития ПП в конкретных районах и в определенное время в Японском море.

**Ключевые слова:** первичная продукция фитопланктона, метод эмпирических ортогональных функций, дистанционное зондирование, спутниковые данные, Японское море.

### Введение

Японское море расположено в северо-западной части Тихого океана между материковым берегом Азии, Японскими островами и островом Сахалин в географических координатах 34°26' - 51°41' с.ш., 127°20' - 142°15' в.д. Для исследования изменчивости первичной продукции (ПП) нами был выделен район с координатами 34° - 49° с.ш. и 128° - 142° в.д. На севере и северо-востоке Японское море соединяется с Охотским морем проливами Невельского и Лаперуза (Соя), на востоке – с Тихим океаном Сангарским (Цугару) проливом, на юге – с Восточно-Китайским морем Корейским (Цусимским) проливом. Японское море располагается в двух климатических зонах: субтропической и умеренной, разделяемых субполярным фронтом. В пределах этих зон выделяются два сектора с отличающимися климатическими и гидрологическими условиями: суровый холодный северный (зимой частично покрытый льдом) и мягкий, теплый, прилегающий к Японии и берегам Кореи (Гидрометеорология и гидрохимия морей, 2003).

Первичная продукция (ПП) представляет собой массу новообразованного органического вещества за определенный период времени. Мера ПП – скорость новообразования органического вещества. Для всех последующих этапов продукционного процесса, происходящего в водоеме, ПП является материальной и энергетической основой (Промысловая океанология, 2008).

Анализ ПП фитопланктона широко используется для оценки биологической продуктивности морей и океанов. С продукции фитопланктона в морских и океанических экоси-

стемах начинаются трофические цепи и сети, а на их базе строятся пищевые пирамиды. Исследование продукционных характеристик необходимо для понимания биогеохимических процессов. Наиболее важно и актуально в современной науке изучение роли углерода в биогеохимических циклах морской среды, потому что ПП, фотосинтезированная океаническим фитопланктоном, является неотъемлемой частью в круговороте углерода. В тех областях, где наблюдается высокая ПП фитопланктона, действует своеобразный «биологический насос», который уводит углерод из поверхностных слоев (Ducklow, 2001; Martin et al., 2011), благодаря чему в них понижается парциальное давление  $\text{CO}_2$ , и парниковый углекислый газ поступает из атмосферы в океан. Знание механизмов, контролирующих ПП в морях и океанах, является особо значимым вопросом в изучении морских экосистем на всех пространственных уровнях.

Помимо этого, необходим постоянный мониторинг биопродукционных параметров с точки зрения промысла. Японское море является одной из наиболее богатых областей Мирового океана по рыбным запасам и высокопродуктивной морской экосистемой ( $>300 \text{ гС/м}^2/\text{год}$ ) (Yamada et al., 2005). Исходя из этого, актуально исследование распределения ПП по акватории Японского моря, которая имеет своеобразные гидрологические условия, для выявления зон, благоприятствующих скоплению гидробионтов, что, в свою очередь, помогает определить промысловую обстановку в регионе, который имеет значительные биологические ресурсы.

Одной из проблем для изучения ПП в исследуемой акватории является недостаток пространственных и временных данных *in situ*. Практически невозможно оценить количественную изменчивость в масштабе бассейна по имеющимся данным измерений (Carr et al., 2006). Используя традиционные методы исследования, нельзя получить полную картину пространственно-временной изменчивости изучаемого параметра. Поэтому для преодоления этих недостатков привлекаются спутниковые данные, которые, начиная с 70-х годов XX века, получили широкое применение во многих областях науки. В последние десятилетия спутниковые данные о цвете моря все шире используются для оценки биопродуктивности морей и океанов. Большое преимущество спутникового зондирования по сравнению с океанологическими наблюдениями заключается не только в полноте охвата изучаемой акватории, но и в оперативности и регулярности получаемых данных. Эти важные преимущества компенсируют недостаток спутниковых данных, который заключается в отражении условий лишь сравнительно тонкого поверхностного слоя (Новиненко, Шевченко, 2007).

Работ, посвященных пространственно-временной изменчивости ПП как Мирового океана, так и отдельных областей, включая Японское море, сравнительно немного. В основном они выполнены зарубежными авторами, и чаще всего в них, с целью преодоления недостатка натуральных наблюдений для оценки изменчивости ПП, используются спутниковые данные (Platt, Sathyendranath, 1993; Behrenfeld, Falkowski, 1997; Kim, 2000; Kameda, Ishizaka, 2005; Yamada, 2005; Carr et al., 2006; Rousseaux, Gregg, 2014).

Целью данной работы является анализ пространственных и временных структур ПП с применением метода эмпирических (естественных) ортогональных функций (ЭОФ).

## Исходные данные и методика расчета ЭОФ

В работе были использованы открытые данные 3 уровня о ПП (<http://orca.science.oregonstate.edu>) в период с 2003 по 2012 гг. включительно. Данные содержат пространственные массивы с регулярной фиксированной географической сеткой с шагом 9 км. Данные, содержащиеся в каждом массиве, являются усредненными по времени за период 1 месяц. Данные ПП в массивах рассчитаны по модели VGPM (Vertically Generalized Production Model), предложенной Behrenfeld and Falkowski в 1997 г. (Behrenfeld, Falkowski, 1997), по данным спектро-радиометра MODIS Aqua. Модель VGPM – одна из наиболее широко используемых моделей для изучения ПП Мирового океана. Преимущества данной модели заключаются в том, что ее разработка велась на основе набора данных из 11283 измерений первичной продукции фитопланктона, выполненных с применением радиоуглеродного анализа в различных акваториях Мирового океана. В рамках модели ПП рассчитывается следующим образом:

$$IPP = 0,66125 \cdot PB_{opt} \cdot \frac{PAR}{PAR + 4,1} \cdot Zeu \cdot Chlopt \cdot H,$$

где  $IPP$  – значение первичной продукции, интегрированной по глубине,  $PAR$  – ежедневная фотосинтетически активная радиация над морской поверхностью ( $E/m^2$ ),  $Zeu$  – глубина эвфотического слоя (m);  $Chlopt$  – концентрация хлорофилла ( $mg/m^2$ ),  $H$  – длительность светового дня (h).  $PB_{opt}$  – параметр, контролирующий ПП в модели, полиномиальная функция температуры поверхности океана ( $T$ ), которая рассчитывается по следующей формуле:

$$PB_{opt}(T) = 1,2956 + 0,2749T + 6,17 \cdot 10^{-2} T^2 - 2,05 \cdot 10^{-2} T^3 + 2,462 \cdot 10^{-3} T^4 - 1,348 \cdot 10^{-4} T^5 + 3,4132 \cdot 10^{-5} T^6 - 3,27 \cdot 10^{-8} T^7.$$

Валидация модели VGPM показала высокую (от 0,72 до 0,78) корреляцию смоделированных и «in-situ» значений всех без исключения параметров.

В нашей работе для анализа пространственно-временной изменчивости первичной продукции в Японском море был применен метод эмпирических (естественных) ортогональных функций (ЭОФ), который получил широкое распространение в океанологии для анализа самых разных параметров. В ряде работ подробно описан метод и его использование (Мещерская и др., 1970; Фортус, 1980; Ляхов, 2006). Это полезный инструмент для анализа спутниковых снимков, в нашем случае данных MODIS Aqua. Применение этого метода позволяет одновременно исследовать пространственную и временную изменчивость изучаемого параметра (Kim, 2000; Цхай, 2007; Iida, Saitoh, 2007; Olita, 2011).

Для метода ЭОФ необходимы временные ряды без пропусков данных. Для этого были проведены следующие процедуры. Первоначально в каждой точке массива исходных данных временной ряд за весь исследуемый период (120 значений) был дополнен путем сплайновой интерполяции, если в нем имелись пропуски. При интерполяции принималась

во внимание разреженность данных в ряду и частота пропусков во избежание получения ложных значений. В частности, не допускалось наличие более 2 пропусков между любыми двумя точками. Такие ряды исключались из рассмотрения. Если ряд отвечал этим требованиям, но процедура интерполяции по каким-либо причинам давала сбой, и ряд не удавалось восстановить полностью, то эта точка массива также исключалась из анализа. В итоге в границах исследуемого района были выбраны только точки, имеющие полные соответствующие временные ряды. Далее, чтобы обеспечить непрерывность пространственного распределения данных, а также при анализе выявить значимые моды изменчивости и исключить шум, пространственное разрешение было уменьшено. Весь район был разбит на ячейки размера 27×27 км (всего получилось 2060 ячеек). В каждой такой ячейке выполнено усреднение данных по всем попавшим в нее точкам. Затем была составлена пространственно-временная матрица данных размером 120×2060 (Ляхов, 2006), и рассчитана ее корреляционная матрица размером 2060×2060.

В результате сингулярного разложения корреляционной матрицы было получено 2060 (по числу узлов матрицы) пространственно-временных мод (РС-параметр) и соответствующие веса, дающие оценку вклада каждой моды в общую изменчивость. Значения временной функции РС-параметра были нормированы на стандартное отклонение, а значения пространственных мод были умножены на стандартное отклонение. Вес каждой моды ( $\lambda_k$ ) рассчитывался из ее собственного числа ( $\mu_k$ ) по формуле:

$$\lambda_k = \frac{\mu_k}{\sum_{k=1}^N \mu_k},$$

где  $N$  – число мод,  $k$  – порядковый номер веса в массиве, упорядоченном по убыванию весов. На *рис. 1а* представлен график зависимости натурального логарифма веса от его порядкового номера.

Согласно графику, на интервале с 1-й по 111-ю моду наблюдается вогнутая кривая, на интервале со 112-й по 1800-ю моду наблюдается почти прямая линия, на интервале с 1801-й по 2060-ю моду наблюдается выпуклая кривая. Это позволяет отнести первый интервал к первой группе мод Крэддока, включающей в себя интерпретируемые моды; второй интервал – ко второй группе мод Крэддока. Эта группа формируется высокочастотными физическими сигналами и шумовыми составляющими за счет ошибок данных, а прямая линия указывает на самоподобие этих мод. Третий интервал относится к третьей группе мод Крэддока. Эта группа содержит самые малые веса и связана с потерей положительной определенности корреляционной матрицы. (Craddock, 1973). На *рис. 1б* представлен график зависимости самого веса от порядкового номера моды на интервале с 1-й по 10-ю. На графике видно, что уже у 3-й моды вклад в общую дисперсию составляет менее 10%. Поэтому было принято решение использовать для интерпретации полученных результатов первые 3 моды как наиболее статистически значимые. С ними связано 78,1% от общей дисперсии. Первая мода (ЭОФ1) объясняет 54,8% общей дисперсии, вторая (ЭОФ2) и третья (ЭОФ3) моды – 16,2% и 7,1%, соответственно.

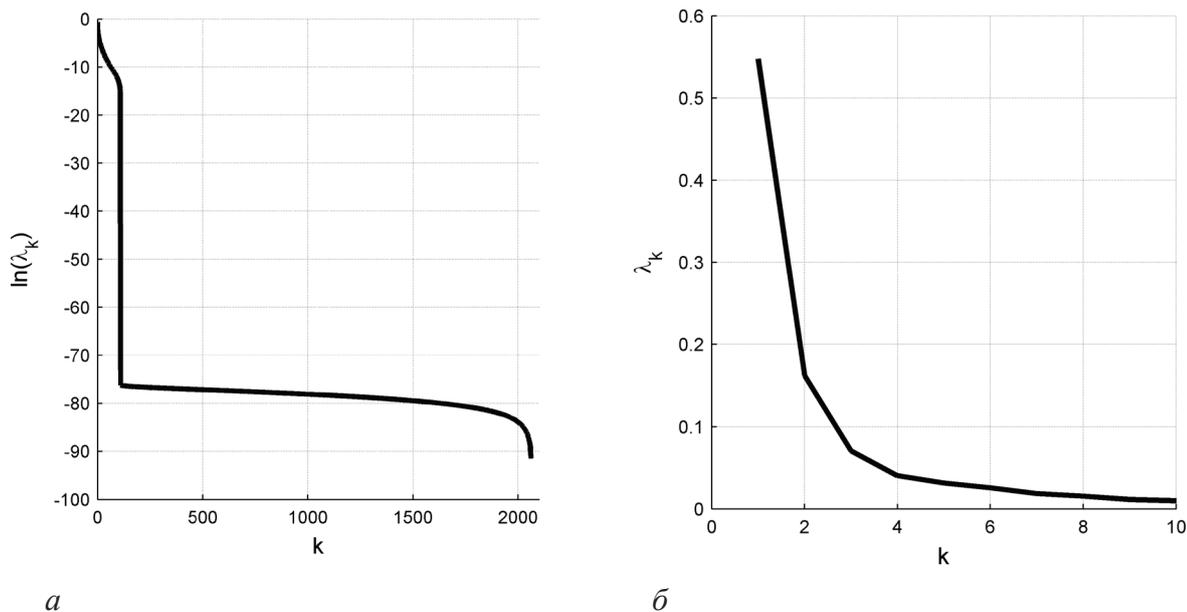


Рис. 1. а) - график зависимости натурального логарифма веса моды от ее порядкового номера; б) - график зависимости веса моды от ее порядкового номера на интервале с 1-й по 10-ю.

### Результаты и обсуждение

Анализ данных ПП, полученных с помощью дистанционных методов исследования в Японском море с 2003 по 2012 гг., показал, что наибольшего значения этот параметр достигал в 2009 г. (811,35 мгС/м<sup>2</sup>/год), а также высоким показателем продуктивности был отмечен 2004 год (789,48 мгС/м<sup>2</sup>/год). Низкие уровни ПП, 654,45 и 687,83 мгС/м<sup>2</sup>/год, отмечались в 2005 и 2012 гг. (рис. 2) Среднее значение за весь период с 2003 по 2012 гг. составило 742,81 мгС/м<sup>2</sup>/год. Такое различие величины ПП год от года, можно объяснить изменяющейся в течение изучаемых лет гидрологической обстановкой, складывающейся из совокупных факторов, влияющих на образование ПП в изучаемой акватории.

Наибольшие значения ПП наблюдаются в южной части (800-1200 мгС/м<sup>2</sup>/год) изучаемой акватории, а наименьшие – в северной части (400-600 мгС/м<sup>2</sup>/год). Это связано с различием гидрологических условий северной и южной зон по обе стороны субарктического фронта Японского моря. На границе фронта величины ПП колеблются от 600 до 800 мгС/м<sup>2</sup>/год (рис. 3). Субарктический фронт относится к устойчивым элементам циркуляции Японского моря и формируется между северным холодным районом и теплым южным районом (Yamada, 2004). Фронт разделяет теплые субтропические воды южной, юго-восточной частей моря и холодные субарктические воды северной и северо-западных областей (Гидрометеорология и гидрохимия морей, 2003). Положение фронта относительно стабильно как от года к году, так и от сезона к сезону. Фронтальная зона существует в течение всего года в центральной части Японского моря, где встречаются два типа вод (рис. 3). Поскольку физические условия отличаются в субарктической и субтропической части Японского моря, то предполагается, что характеристики экосистем

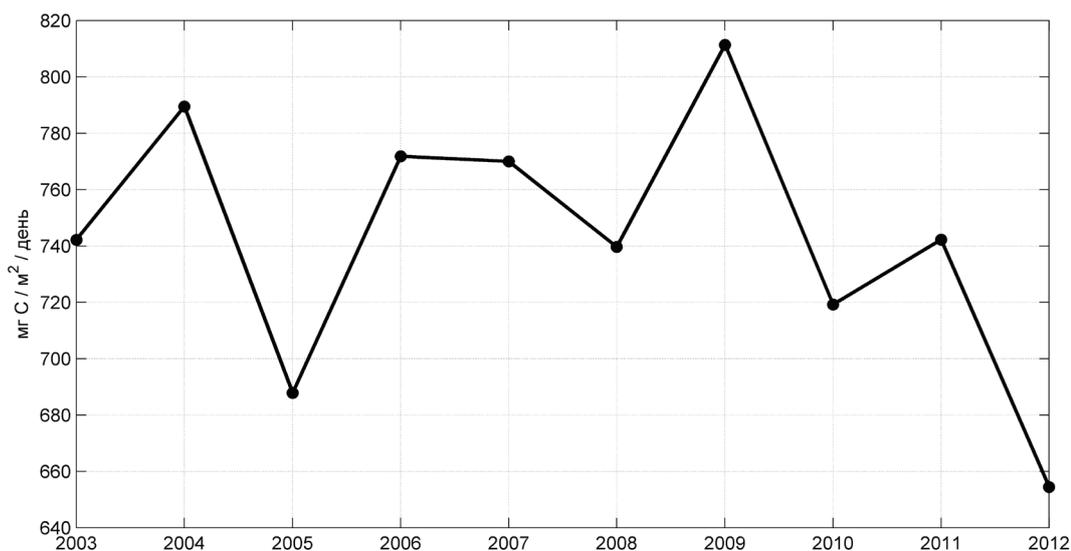


Рис. 2. Динамика среднегодовых значений ПП в период с 2003 по 2012 г.

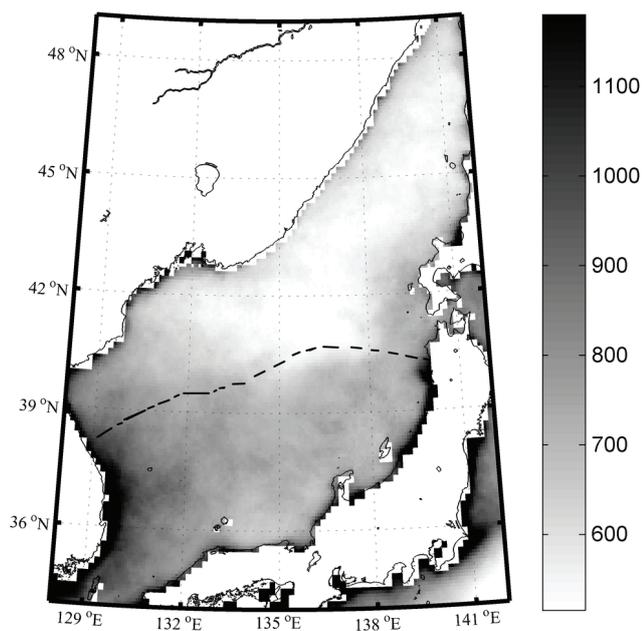


Рис. 3. Карта средних значений ПП ( $\text{mgC}/\text{m}^2/\text{год}$ ) за период с 2003 по 2012 гг. с изображением субарктического фронта

должны различаться в обоих регионах (Onitsuka, Yanagi, 2005). Отдельно следует отметить прибрежную зону, в которой наблюдаются высокие значения ПП от  $1000 \text{ mgC}/\text{m}^2/\text{год}$  и более. В прибрежной зоне Японского моря большую роль в образовании ПП играет материковый сток, который является дополнительного источником биогенных элементов. В южной и в центральной части, изучаемой акватории, продуктивность зависит, прежде всего, от гидрографических процессов (Kim et al., 2000; Yamada et al., 2005). По всей видимости, сезонное распределение и развитие полей первичной продукции в различных

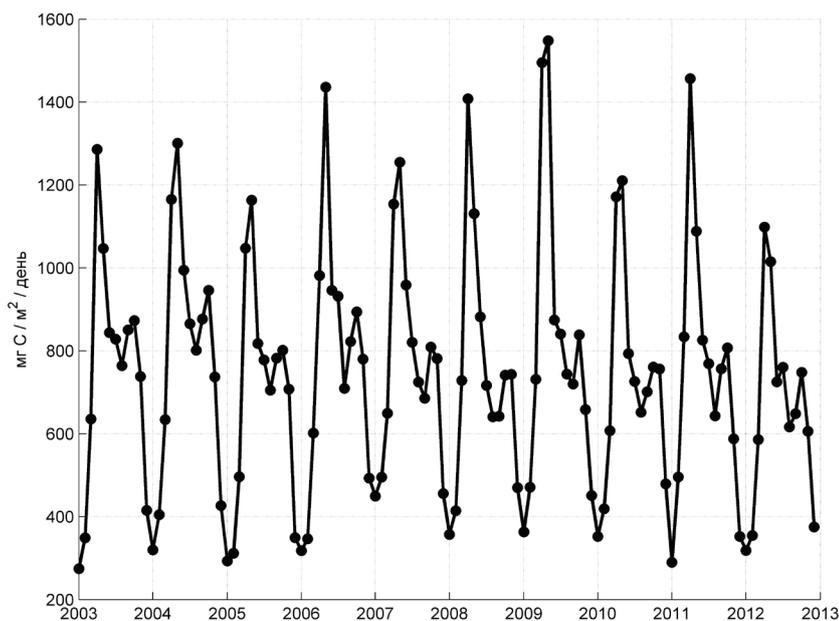


Рис. 4. Среднемесячный ход значений ПП за исследуемый период (2003-2012 гг.), усредненный по акватории Японского моря

частях Японского моря определяется соотношением факторов, которые способствуют обеспечению фитопланктона биогенными элементами и светом.

В течение всего исследуемого промежутка времени в годовом ходе ПП для Японского моря выделялись два пика повышения продуктивности (весной и осенью) (рис. 4). Это подтверждается выводами других ученых о бимодальном цветении фитопланктона в Япономорской акватории, которое происходит весной и осенью, как и в других умеренных зонах Мирового океана (Kim et al, 2000; Yamada et al., 2004, 2005). Увеличение температуры поверхности океана и формирование стратификации вызывает весеннее цветение, а истощение запасов питательных веществ приводит к завершению пика цветения. Осеннее цветение связано с разрушением летней стратификации, а именно в осенний сезон в связи с понижением температуры поверхностных слоев моря происходит разрушение сезонного термоклина. Сроки возникновения цветения фитопланктона различны между субарктической и субтропической частями Японского моря (Kim et al., 2000; Yamada et al., 2004). Так, по спутниковым данным зарубежными учеными было подтверждено, что сроки цветения отличаются между субарктической и субтропической частями Японского моря. Kim и др. (2000) в своей работе проанализировали спутниковые изображения хлорофилла-*a* со спутника CZCS, которые показали временные и пространственные вариации концентрации пигмента, и обнаружили, что весной и осенью цветение в субтропической части происходит раньше, чем в субарктической. Масштабы и продолжительность весеннего цветения отличаются в разных частях моря, потому что они имеют различный уровень расслоения и концентрации биогенных элементов (Kim et al., 2000).

Среднемесячный ход значений ПП за период с 2003 по 2012 гг. представлен на *рис. 4*. Максимумы ежемесячных временных рядов наблюдаются в весенний сезон, так, например, в мае 2009 г. - 1580 мгС/м<sup>2</sup>/день (*рис. 4*). Минимальные значения наблюдаются в зимний сезон за весь исследуемый временной промежуток и варьируют от 259,8 мгС/м<sup>2</sup>/день в декабре 2003 г. и до 515,6 мгС/м<sup>2</sup>/день в феврале 2007 г. Сезонная изменчивость ПП вызвана сезонной динамикой физических факторов.

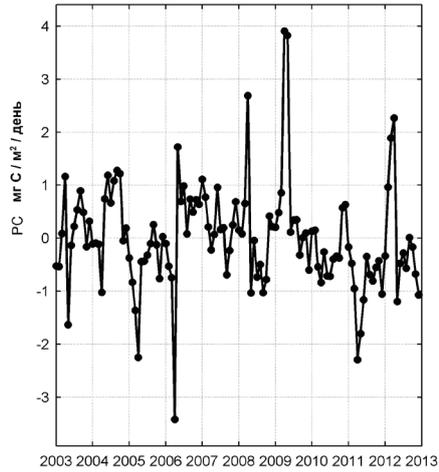
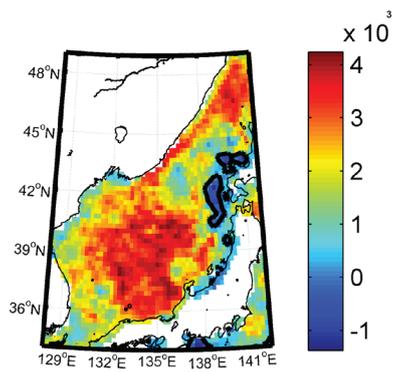
Расчитанные нами ЭОФ позволили проанализировать пространственную изменчивость ПП, в изучаемой акватории за 10 лет – с 2003 по 2012 гг.

Первая мода анализа ЭОФ показывает, прежде всего, районы, в которых наблюдается наибольшая изменчивость изучаемого параметра (*рис. 5*). ЭОФ1 характеризовала синхронные изменения на преобладающей части исследуемой акватории. Анализируя пространственное распределение первой моды, можно выделить зоны повышенной изменчивости ПП. Это такие районы, как юго-восточная часть Японского моря, побережье Приморского края и центральная часть Японского моря. Юго-восточная часть Японского моря находится в субтропической климатической зоне, которая характеризуется наличием теплых вод восточной ветви Цусимского течения. Поэтому здесь факторами, контролирующими развитие ПП, являются освещенность и циркуляция вод, обеспечивающая район биогенами. Причем в субтропических водах солнечная радиация влияет на уровень ПП не только как источник энергии для фотосинтезирования, но и как один из факторов, влияющих на сезонные изменения в гидрологических условиях (термическая стратификация, вертикальное перемешивание) (Kim et al., 2000).

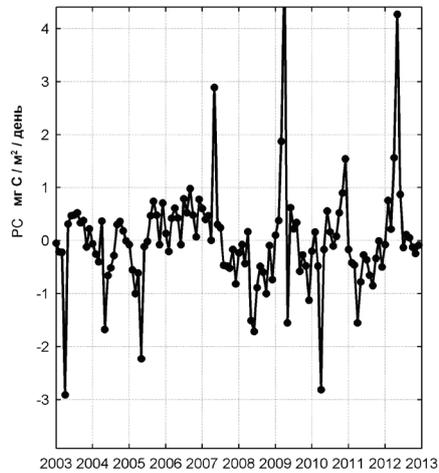
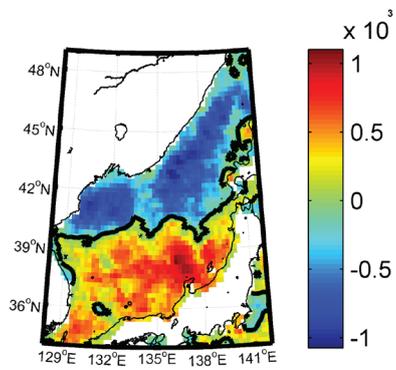
Вблизи побережья Приморского края большую роль в образовании ПП играет совокупность факторов, таких как материковый сток и циркуляция вод, в частности Приморское течение – поток холодных опресненных вод вдоль побережья континента от северной части Татарского пролива до залива Петра Великого вдоль северо-западной берега Японского моря, с севера на юг. В прибрежных районах чаще всего высокая ПП обусловлена повышенным запасом биогенных элементов, поступающих из различных естественных и антропогенных источников (Sakata, 2012).

Изменчивость ПП в центральной части Японского моря обусловлена гидрографическими особенностями района, такими как крупномасштабное конвективное перемешивание в зимний период, богатые питательными веществами воды в зимне-весенний период (Nagata, 1998). Помимо этого, происходит усиление влияния на воды центральной части Японского моря прибрежных вод Восточно-Китайского моря, которое приводит к увеличению концентраций биогенных элементов в слое 0-30 м (Андреев, 2014). На графике временной составляющей первой моды (PC1) на *рис. 5a* видны пики, которые указывают на периоды максимального воспроизводства ПП в определенное время года. PC1 связана с вкладом весеннего и осеннего цветения в общую изменчивость ПП в исследуемой акватории. Причем в некоторые годы (2004, 2005, 2010, 2011) вклад осеннего цветения в общую динамику ПП был больше, чем вклад весеннего цветения.

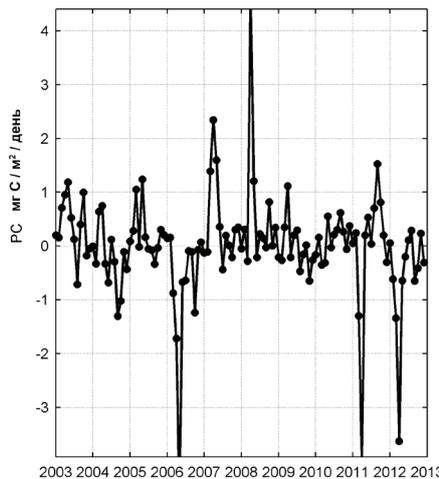
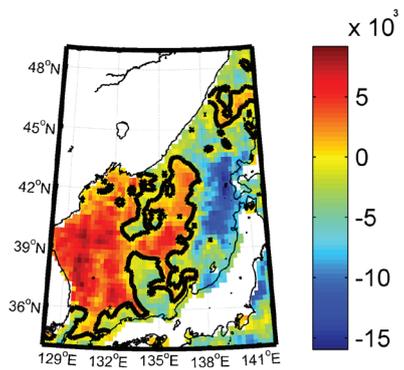
В ЭОФ2 выделяются два максимума изменчивости, отражающие противофазность межгодовых колебаний ПП. Границей положительных и отрицательных значений является



(a)



(б)



(в)

Рис. 5. Пространственные распределения и соответствующие РС, рассчитанные для первых трех мод ПП ( а – ЭОФ1 и РС1; б – ЭОФ2 и РС2; в – ЭОФ3 и РС3). Черным цветом отмечена нулевая изолиния

субарктический фронт. Пространственная функция второй моды положительна в субтропической части моря и отрицательна в субарктической части моря (рис. 5б).

РС2 связана с особенностями развития цветения фитопланктона, интенсивностью цветения и изменчивостью распределения ПП в акватории Японского моря. В субарктической части моря отмечаются весенние пики 2003, 2004, 2005, 2010, 2011 гг., а в субтропической части моря аномально высокие весенние пики 2007, 2009, 2012 гг. Причем во временных составляющих первой и второй моды выделялся весенний пик 2009 года, который имел аномально высокое значение ПП среди всех исследуемых лет.

Первые две моды описывали наиболее значимые закономерности в пространственно-временной изменчивости исследуемого параметра. Третья мода ЭОФ3 описывает особенности развития ПП в конкретных районах и в определенное время в Японском море (рис. 5в). Сопоставив и проанализировав значения пространственной и временной составляющих ЭОФ3, можно сделать вывод, что высокие значения наблюдаются в западной и юго-западной части, причем в весенний сезон 2007 и 2008 гг. они были намного выше, чем в остальные изучаемые годы.

При интерпретации собственных векторов, полученных в результате анализа ЭОФ, можно предположить, что такая изменчивость изучаемого параметра ПП, вызвана некоторыми факторами, оказывающими прямое или косвенное влияние на формирование ПП в исследуемой акватории: освещенность, температура, циркуляция вод, обеспеченность биогенами.

### Заключение

Изучена пространственно-временная изменчивость ПП в Японском море при помощи модели, основанной на спутниковых данных MODIS Aqua. Период исследования составил с 2003 по 2012 гг. Для этого мы использовали метод ЭОФ, который позволяет описать пространственную и временную изменчивости рядов данных при помощи ортогональных функций. В результате анализа спутниковых данных о ПП в Японском море с применением метода ЭОФ были выявлены наиболее значимые закономерности в пространственно-временной изменчивости исследуемого параметра. Было установлено, что в первой моде ЭОФ выделяются максимумы в таких районах, как юго-восточная часть Японского моря, побережье Приморского края и центральная часть Японского моря. Во второй моде южная зона характеризуется более высокими значениями пространственной функции по сравнению с северной зоной, что связано, прежде всего, с различным в этих районах соотношением факторов, которые способствуют обеспечению фитопланктона биогенными элементами и светом. Анализ третьей моды показал особенности развития ПП в конкретных районах и в определенное время в Японском море. Высокие значения здесь наблюдаются в западной и юго-западной части моря.

В дальнейших работах, для понимания изменчивости ПП и развития полей ПП в различных частях Японского моря, нами будет более подробно изучено соотношения

факторов, которые способствуют обеспечению фитопланктона биогенными элементами и светом.

Изучение пространственно-временной изменчивости ПП и наличие данных о ПП, полученных при помощи VGPM модели, важно для создания региональной модели оценки ПП в акватории, ввиду того, что это является отправной точкой для дальнейших исследований и помогает решить вопрос надежности данных в некоторых областях и промежутках времени.

Авторы выражают искреннюю благодарность сотрудникам ТОИ ДВО РАН с.н.с., к.ф.-м.н. Степанову Д.В., вед.н.с., д.ф.-м.н. Новотрясову В.В. за консультативную помощь в написании статьи.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ 14-05-31219 мол-а и при поддержке проекта ДВО 15-И-1-045.

## Литература

1. Андреев А. Г. Межгодовые изменения параметров морской воды и концентрации хлорофилла *a* в Японском море в осенний период // Метеорология и Гидрология. 2014. № 8. С. 55-65.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Том VIII. Японское море. Вып.1. Гидрохимические условия. Гидрометеоиздат. 2003.398 с.
3. Зуенко Ю.И. Промысловая океанология Японского моря. Владивосток: ТИНРО-центр. 2008. 227 с.
4. Ляхов А.Н. Современные методы обработки данных в геофизике // Иркутск: Лекции БШФФ. 2006. С. 39-46.
5. Мещерская А.В., Руховец Л.В., Юдин М.И., Яковлева Н.И. Естественные составляющие метеорологических полей. Л.: Гидрометеоиздат, 1970. 199 с.
6. Новиненко Е.Г., Шевченко Г.В. Пространственно-временная изменчивость температуры поверхности Охотского моря по спутниковым данным // Иссл. Земли из космоса. 2007. № 5. С. 50-60.
7. Фортус М.И. Метод эмпирических ортогональных функций и его применение в метеорологии // Метеорология и гидрология. 1980. № 4. С. 113-119.
8. Цхай Ж.Р. Анализ сезонных вариаций концентрации хлорофилла-*a* методом естественных ортогональных функций в Охотском море по спутниковым данным // Иссл. Земли из косм. 2007. №6. С.37-45.
9. Behrenfeld M. J. and Falkowski P. G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration. *Limnol. Oceanogr.* 1997. № 42(1). P. 1-20.
10. Carr M-E., Friedrichs M.A.M, Schmeltz M., Aita M. N., Antoine D., Arrigo K.R., Asanuma I., Aumont O., Barber R., Behrenfeld M., Bidigare R., Buitenhuis E.T., Campbell J., Ciotti A., Dierssen H., Dowell M., Dunne J., Esaias W., Gentili B., Gregg W., Groom S., Hoepffner N., Ishizaka J., Kameda T., Le Quere C., Lohrenz S., Marra J., Merlin F., Moore K., Morel A., Reddy E.T., Scardi M., Smyth T., Turpie K., Tilstone G., Waters K., Yamanaka Y. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color // *Deep-Sea Res. II.* 2006. Vol. 53. P. 741-770.
11. Craddock J. M. Problems and prospects for eigenvector analysis in meteorology // *The Statistician.* 1973. Vol. 22. P. 133-145.
12. Ducklow H. W., Kirchman D. L., Anderson T. R. The magnitude of spring bacterial production in the North Atlantic Ocean // *Limnol. Oceanogr.* 2002. Vol. 47(6). P. 1684-1693.
13. Iida T., Saitoh S-I. Temporal and spatial variability of chlorophyll concentrations in the Bering Sea using empirical orthogonal function (EOF) analysis of remote sensing data // *Deep Res.II.* 2007. №54. P.2657-2671.
14. Kameda T., Ishizaka J. Size-fractionated primary production estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing. // *J. Oceanogr.* 2005. Vol. 61. P. 663-672.
15. Kim S.W., Saitoh, S., Ishizaka J., Isoda Y., Kishino M. Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentration in the Japan Sea derived from CZCS images // *J. of Ocean.* 2000. Vol. 56 (5). P. 527-538.
16. Martin P., Lampitt R.S., Perry M. J., Sanders R., Lee C., D'Asaro E. Export and mesopelagic particle flux during a North Atlantic spring diatom bloom // *Deep Sea Res. I.* 2011. Vol. 58. P.338-349.
17. Nagata H. Seasonal changes and vertical distributions of chlorophyll *a* and primary productivity at the Yamato Rise, central Japan Sea // *Plankton Biol. Ecol.* 1998. Vol. 42 (5). P. 159-170.
18. Olita A., Sorgente R., Ribotti A., Fazioli L., Perilli A. Pelagic primary production in the Alger-Provencal Basin by means of multisensory satellite data: focus on interannual variability and its drivers // *Ocean Dyn.* 2011. Vol. 11. P. 1005-1016.
19. Onitsuka G., Yanagi T. Differences in ecosystem dynamics between the northern and southern parts of the Japan Sea: Analyses with two ecosystem models // *J. of Oceanograph.* 2005. Vol. 61. P. 415-433.
20. Platt T., Sathyendranath S. Estimators of primary production for interpretation of remotely sensed data on ocean color// *J. of Geoph. Res.: Oceans.* 1993. Vol. 98. P. 14561-14576.
21. Rouseaux C. S., Gregg W. W. Interannual Variation in Phytoplankton Primary Production at A Global Scale // *Remote Sens.* 2014, Vol. 6. P. 1-19.

22. Sakata M., Yamada M., Mitsunobu S., Senga Y. Contribution of abiogenic and biogenic particles to trace-metal composition of phytoplankton assemblages in seawater of Shimizu Port, Japan // *J. of Oceanogr.* 2012. Vol. 68. Is. 5. P. 807
23. Yamada K., Ishizaka J., Yoo S., Kim H., Chiba S. Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll *a* concentration in the Japan/East Sea (JES) // *Prog. in Oceanogr.* 2004. Vol. 61. P. 193–211.
24. Yamada K., Ishizaka J., Nagata H. Spatial and temporal variability of satellite estimated primary production in the Japan Sea from 1998 to 2002 // *J.Oceanogr.* 2005. Vol. 61. P. 857–869.

## Study of the net primary production variability in the Japan Sea from satellite data using EOF-analysis

Yu.V. Shambarova <sup>1</sup>, I.E. Steepochkin <sup>2</sup>, S.P. Zakharkov <sup>1</sup>

<sup>1</sup> V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 6900041, Russia  
E-mail: shambarova@poi.dvo.ru

<sup>2</sup> Adm. G.I. Nevelskii Maritime State University, Vladivostok 690059, Russia  
E-mail: fizeg@gmail.com

Results of spatiotemporal variability research for net primary production (NPP) in Japan Sea using satellite remote sensing data are presented. Seasonal and interannual variability of NPP during the period of 2003-2012 was analyzed using the empirical orthogonal functions (EOF) method. Upon analyzing NPP, 3 statistically significant modes were selected; their contributions to entire variance were 54,8% (EOF1), 16,2% (EOF2) and 7,1% (EOF3). The greatest variability of EOF1 was revealed in the south-eastern part of Japan Sea and near the Primorsky Region coast. Spatial distribution of EOF2 was zoned for the northern and southern parts along the subarctic front. PC-parameter of the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> modes was determined by spring phytoplankton blooming and total inter-annual NPP dynamics. EOF3 shows NPP spatial-temporal evolution features in the Japan Sea.

**Keywords:** net primary production, phytoplankton, empirical orthogonal functions, remote sensing, satellite data, Japan Sea.

### References

1. Andreev A. G. Mezhdogovoye izmeneniya parametrov morskoi vody i kontsentratsii khlorofilla *a* v Yaponskom more v osennii period (Interannual variations of sea water parameters and chlorophyll *a* concentration in the Japan Sea in autumn), *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2014, No. 8, pp. 55-65.
2. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei. Tom VIII.* Hydrometeorology and hydrochemistry of seas. Vol. VIII, Gidrometeoizdat, Vol. VIII, 2003, 398 p.
3. Zuenko Yu. I. *Promyslovaya okeanologiya Yaponskogo morya* (Fisheries Oceanography of the Japan Sea), Vladivostok: TINRO – centre, 2008, 227 p.
4. Lyakhov A.N. Sovremennyye metody obrabotki dannykh v geofizike (Modern methods of data processing in geophysics), *Lektsii BShFF*, Irkutsk, 2006, pp. 39–46.
5. Meshcherskaya A.V., Rukhovets L.V., Yudin M.I., Yakovleva N.I. *Estestvennye sostavlyayushchie meteorologicheskikh polei* (The natural part of the meteorological fields), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1970, 199 p.
6. Novinenko E.G., Shevchenko G.V. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' temperatury poverkhnosti Okhotskogo morya po sputnikovym dannym (Spatial and Temporal Variability of the Okhotsk Sea Surface Temperature from Satellite Data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 5, pp. 50-60.
7. Fortus M.I. Metod empiricheskikh ortogonal'nykh funktsii i ego primenenie v meteorologii (The method of empirical orthogonal functions and its application in meteorology), *Meteorologiya i Gidrologiya*, 1980, No. 4, pp. 113–119.
8. Tskhai Zh.R. Analiz sezonnykh variatsii kontsentratsii khlorofilla-*a* metodom estestvennykh ortogonal'nykh funktsii v Okhotskom more po sputnikovym dannym (Description of Seasonal Variability of Chlorophyll *a* Concentration by an Empirical Orthogonal Function Method in the Okhotsk Sea from SeaWiFS Satellite Data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2007, No. 6, pp. 37-45.
9. Behrenfeld M. J. and Falkowski P. G. Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration, *Limnol. Oceanogr.*, 1997, No.42(1), pp. 1–20.
10. Carr M-E., Friedrichs M.A.M, Schmeltz M., Aita M. N., Antoine D., Arrigo K.R., Asanuma I., Aumont O., Barber R., Behrenfeld M., Bidigare R., Buitenhuis E.T., Campbell J., Ciotti A., Dierssen H., Dowell M., Dunne J., Esaias W., Gentili B., Gregg W., Groom S., Hoepffner N., Ishizaka J., Kameda T., Le Quere C., Lohrenz S., Marra J., Merlin F., Moore K., Morel A., Reddy E.T., Scardi M., Smyth T., Turpie K., Tilstone G., Waters K., Yamanaka Y. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color, *Deep-Sea Res.* II, 2006, Vol. 53, pp. 741–770.

11. Craddock J. M. Problems and prospects for eigenvector analysis in meteorology, *The Statistician*, 1973, Vol. 22, pp. 133–145.
12. Ducklow H. W., Kirchman D. L., Anderson T. R. The magnitude of spring bacterial production in the North Atlantic Ocean, *Limnol. Oceanogr.*, 2002, Vol. 47(6), pp. 1684–1693.
13. Iida T., Saitoh S-I. Temporal and spatial variability of chlorophyll concentrations in the Bering Sea using empirical orthogonal function (EOF) analysis of remote sensing data, *Deep Res. II*, 2007, No. 54, pp.2657-2671
14. Kameda T., Ishizaka J. Size-fractionated primary production estimated by a two-phytoplankton community model applicable to ocean color remote sensing, *J. Oceanogr.*, 2005, Vol. 61, pp. 663-672.
15. Kim S.W., Saitoh, S., Ishizaka J., Isoda Y., Kishino M. Temporal and spatial variability of phytoplankton pigment concentration in the Japan Sea derived from CZCS images, *J. of Ocean.*, 2000, Vol. 56(5), pp. 527–538.
16. Martin P., Lampitt R.S., Perry M. J., Sanders R., Lee C., D'Asaro E. Export and mesopelagic particle flux during a North Atlantic spring diatom bloom, *Deep Sea Res. I*, 2011, Vol. 58, pp. 338-349.
17. Nagata H. Seasonal changes and vertical distributions of chlorophyll a and primary productivity at the Yamato Rise, central Japan Sea, *Plankton Biol. Ecol.*, 1998, Vol. 42(5), pp. 159-170.
18. Olita A., Sorgente R., Ribotti A., Fazioli L., Perilli A. Pelagic primary production in the Alger-Provencal Basin by means of multisensory satellite data: focus on interannual variability and its drivers, *Ocean Dynamics*, 2011, Vol.11, pp.1005-1016.
19. Onitsuka G., Yanagi T. Differences in ecosystem dynamics between the northern and southern parts of the Japan Sea: Analyses with two ecosystem models, *J. of Oceanograph.*, 2005, Vol. 61, pp. 415-433.
20. Platt T., Sathyendranath S. Estimators of primary production for interpretation of remotely sensed data on ocean color, *J. of Geoph. Res.: Oceans*, 1993, Vol. 98, pp. 14561–14576.
21. Rousseaux C. S., Gregg W. W. Interannual Variation in Phytoplankton Primary Production at a Global Scale, *Remote Sens.*, 2014, Vol. 6, pp. 1-19.
22. Sakata M., Yamada M., Mitsunobu S.; Senga Y. Contribution of abiogenic and biogenic particles to trace-metal composition of phytoplankton assemblages in seawater of Shimizu Port, Japan, *J. of Oceanogr.*, 2012, Vol. 68, Is. 5, pp. 807.
23. Yamada K., Ishizaka J., Yoo S., Kim H., Chiba S. Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll a concentration in the Japan/East Sea (JES), *Prog. in Oceanogr.*, 2004, Vol. 61, pp. 193–211.
24. Yamada K., Ishizaka J., Nagata H. Spatial and temporal variability of satellite estimated primary production in the Japan Sea from 1998 to 2002, *J.Oceanogr.*, 2005, Vol. 61, pp. 857–869.