

*Е.А. Морозов, Д.В. Поздняков, В.И. Сычѳв*

**СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ МНОГОЛЕТНИХ ВАРИАЦИЙ  
НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ  
БИСКАЙСКОГО ЗАЛИВА**

*Eu.A. Morozov, D.V. Pozdnyakov, V.I. Sychev*

**OBSERVATIONS OF MULTI-YEAR SPATIAL DYNAMICS  
OF BIOCHEMICAL VARIABLES IN THE BAY  
OF BISCAY FROM SPACE**

*Гидрооптические свойства прибрежных и в значительной части открытых частей Бискайского залива не являются водами типа 1 в силу влияния ряда факторов, таких как интенсивный речной сток, ресуспензия донных отложений под влиянием сильных ветров, развитие кальцифицирующих водорослей и некоторых других. Это обстоятельство не позволяет эффективно использовать стандартные алгоритмы обработки цвета морской воды, предложенные Национальной Администрацией США по Аэронавтике и Космосу/NASA для данных SeaWiFS и MODIS или Европейским космическим агентством/ESA для данных MERIS. Авторами разработан набор новых, специализированных под изучаемый водный объект алгоритмов для оценки количества и пространственного распределения концентрации общей взвеси, биомассы фитопланктона (через концентрацию хлорофилла-а,). Проведены идентификация и картирование областей цветения двух вредных видов фитопланктона *Lepidodinium chlorophorum* и *Emiliana huxleyi*.*

*Посредством последовательной процедуры стыковки данных датчиков SeaWiFS и MODIS для таких оптически сложных вод сезонные и декадная динамика биогеохимических процессов в Бискайском заливе были задокументированы и выяснена их связь с внутренними гидрологическими процессами и внешними атмосферными воздействиями.*

*Ключевые слова: хлорофилл, общая взвесь, вредные цветения водорослей, гидрооптический алгоритм, нейронная сеть, воды типа 2.*

*The hydro-optical properties of coastal and largely off-coastal waters of the Bay of Biscay are essentially non-case 1 waters due to a wealth of factors encompassing, inter alia, extensive river discharge, wind-driven bottom sediments resuspension, development of calcifying algae, etc. This precludes the employment of standard NASA (SeaWiFS, MODIS) or ESA (MERIS) ocean colour algorithms. We developed an array of new dedicated algorithms for assessing from SeaWiFS and MODIS the abundance and areal extent of suspended minerals, endemic non-harmful algal blooms, as well as identification and mapping of areas of two harmful phytoplankton groups – *Lepidodinium chlorophorum* and *Emiliana huxleyi*. Through a thoroughly substantiated procedure of bridging of SeaWiFS and MODIS data on such optically complex waters, seasonal to decadal dynamics in the biogeochemical processes and specifically algal ecology in the Bay of Biscay is documented and related to intrinsic hydrological processes, external forcing and climatic tendencies in the area.*

*Key words: Chlorophyll, suspended matter, harmful algae blooms, hydrooptical algorithm, neural network, case 2 waters.*

### **1. Введение**

Бискайский залив располагается в северо-восточной части Атлантического океана вдоль западного побережья Франции, от Бреста на юг к испанской границе и северному побережью Испании в районе испанской страны Басков.

Береговая линия залива сильно изрезана эстуриями и бухтами, характеризующимися весьма биопродуктивными экосистемами.

Его внешняя граница определяется по линии, соединяющей мыс Ортегаль ( $43^{\circ} 46' N 7^{\circ} 52' W$ ) с Пенмарч Поинт ( $47^{\circ} 48' N 4^{\circ} 22' W$ ) [1]. Простирающийся далеко в залив континентальный шельф оказывается ареной сильного волнения и штормов, за что этот регион получил свою известность как опаснейший для судоходства, особенно в период с поздней осени и до начала весны.

Экосистема пелагиальной части залива является местом обитания многочисленных видов китов и дельфинов, а также таких рыб, как сардина и макрель. Однако народнохозяйственное значение Бискайского залива не ограничивается исключительно промышленным рыболовством: здесь получили широкое развитие туризм, аквафермерские хозяйства, судоходство, добыча песка и гравия, а также разработки по получению волновой, приливной и ветровой электроэнергии.

Прибрежная зона имеет высокую и неуклонно возрастающую плотность населения, так как здесь располагаются разнообразные промышленные предприятия, интенсивно ведется сельское хозяйство. Таким образом, экологический статус прибрежной зоны и его изменения имеют важное значение для прибрежных стран.

Большая пространственная протяжённость и частые штормовые условия значительно затрудняют проведение морских наблюдений биогеохимических процессов, происходящих в Бискайском заливе, с помощью традиционных методов, таких как судовые измерения. Спутниковый мониторинг, как компонент интегрированной системы мониторинга, может предоставить больше возможностей, некоторые такие примеры обсуждаются нами в данном исследовании.

### **2. Источники и характеристика данных**

Авторами использован обширный банк данных *in situ* по концентрации хлорофилла фитопланктона (*X/L*) и общей взвеси (*OB*), сформированный французским институтом IFREMER [2].

Данные были собраны синхронно и квазисинхронно (СКС) с пролётами SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field of View Sensor) и MODIS-Aqua (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer for Aquatic studies) с 409 станций (*X/L*) и 213 (*OB*) для SeaWiFS и 261 (*X/L*) и 155 (*OB*) для MODIS в течение 1998–2004 гг. (для SeaWiFS) и 2002–2007 гг. (для MODIS). Общее число пар СКС измерений для SeaWiFS и MODIS было соответственно 1236 и 886 для *X/L* и 625 и 361 для *OB*.

Диапазон концентраций хлорофилла, определённый по данным экспедиций и прибрежных станций, составил 0,01–52,9 мкг/л и 0,01–35,24 мкг/л для пар

данных SeaWiFS и MODIS соответственно. Для *ОВ* диапазоны концентраций по этим датчикам составили соответственно 0,118,8 мг/л и 0,18–18,97 мг/л.

В дополнение к парным СК-С данным, большое число измеренных *in situ* концентраций *ХЛ* и *ОВ* было использовано для оценки точности работы разработанных биооптических алгоритмов (см. раздел ниже) индивидуально для SeaWiFS и MODIS (около 9100 и 7100 измерений для SeaWiFS и MODIS по *ХЛ* и 2500 и 1710 по *ОВ* соответственно).

Спутниковые данные уровня L2 (1998–2004 гг. для SeaWiFS и 2002–2007 гг. для MODIS) в виде спектральных нормализованных восходящих яркостей с пространственным разрешением 1 км были загружены с сайта NASA (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am>). Эти данные были получены в NASA посредством обработок приходящего светового сигнала алгоритмами версий 5.2 для SeaWiFS и 1.1 для MODIS, которые включают в себя процедуры атмосферной коррекции NASA. Указанные процедуры автоматически переключаются между режимами визирования вод типа 1 и типа 2 по известной классификации Мореля [14].

Данные SeaWiFS и MODIS уровня L2 были использованы для расчёта спектральных значений коэффициента отражения для дистанционного зондирования под поверхность  $R_{rsw}(\lambda)$ , как описано в [3, 4]. Для разработки биооптических алгоритмов были взяты исключительно пары СКС измерений. Остальная часть данных спутниковых измерений была использована для оценки эффективности работы разработанных алгоритмов восстановления параметров качества воды, а также для оценки совместимости данных SeaWiFS и MODIS.

Для интерпретации природы особенностей среднемесячных и сезонных вариаций исследуемых биогеохимических явлений в Бискайском заливе, в дополнение к данным по цвету океана, привлекались спутниковые данные по приводному ветру (датчик QuikSCAT) и температуре поверхности воды (датчик MODIS).

### 3. Методология

#### 3.1. Алгоритмы для восстановления концентраций *ХЛ* и *ОВ* в прибрежных водах Бискайского залива по данным SeaWiFS и MODIS

Гоин и др. [2] показали, что стандартные алгоритмы NASA для восстановления концентраций *ХЛ* дают результаты с большими ошибками, если применяются к *прибрежным* водам Бискайского залива. Поэтому авторами были разработаны целевые биооптические алгоритмы, предназначенные для этой части акватории залива и адекватно учитывающие особенности ее оптических свойств. Алгоритмы, разработанные нами отдельно для *ХЛ* и *ОВ* и индивидуально для SeaWiFS и MODIS, основаны на использовании нейронных сетей (НС) [5], создаваемых с использованием программного пакета SNNS (<ftp://ftp.informatik.uni-stuttgart.de/pub/SNNS/>).

Экспериментально было установлено, что для данной задачи оптимальной является конфигурация сети с 6 нейронами на входном слое, 10 и 3 нейронами, соответственно в первом и втором скрытом слоях и одним нейроном в выходном слое, отражающим соответственно концентрацию *X/L* или *OB*. На нейроны входного слоя подаются значения подводного коэффициента отражения для дистанционного зондирования  $R_{rsw}(-0, \lambda)$  на длинах волн 412, 443, 490, 510, 555 и 670 нм для сети SeaWiFS и на 412, 443, 488, 531, 555 и 667 нм для сети MODIS. По определению,  $R_{rsw}(\lambda)$  есть спектральная восходящая яркость света под поверхностью воды,  $L_u(-0, \lambda)$ , нормированная на спектральную падающую освещенность на том же уровне,  $E_d(-0, \lambda)$ .

После окончания тренировок и проверки сети полученная среднеквадратичная ошибка составила 3,2 мкг/л (SeaWiFS) и 2,50 мкг/л (MODIS) для *X/L* and 2,9 мг/л (SeaWiFS) и 2,9 мг/л (MODIS) для *OB*.

Сравнение восстановленных НС-алгоритмам искомым концентраций с СКК парами, измеренными *in situ* (но незадействованными в обучении НС) показало, что коэффициент корреляции  $r$  составил в случае *X/L* 0,79 и 0,72 для SeaWiFS and MODIS соответственно и 0,71 и 0,74 в случае *OB* для SeaWiFS and MODIS соответственно.

Для сравнения, значения коэффициента корреляции  $r$  для алгоритма ОС5 (который широко используется для анализа данных цвета океана в Бискайском заливе, но который восстанавливает лишь один параметр – *X/L* [2]) характеризуются значениями  $r = 0,7$  (среднеквадратичная ошибка: СКО = 5,390 мкг/л) для SeaWiFS и  $r \sim 0,6$  (СКО =  $\sim 3$  мкг/л) для MODIS [6].

Таким образом, точность восстановления концентрации *X/L* разработанного авторами комплекса НС-алгоритмов выше точности ОС5. Кроме того, НС-алгоритмы восстанавливают и другой чрезвычайно важный в экологическом отношении параметр – *OB*, определяющий вместе с *X/L* световой режим и условия фотосинтетической активности в водном столбе.

### **3.2. Алгоритм для идентификации и картирования *Lepidodinium chlorophorum***

Нам не известны разработанные к настоящему моменту алгоритмы для определения/идентификации *L. chlorophorum*. Как и в подразделе 3.1, для данного исследования было использовано программное обеспечение SNNS. Архитектура сети в этом случае состояла из 6 нейронов во входном слое (по числу спектральных каналов датчика MODIS-Aqua; в этом исследовании были использованы только данные датчика MODIS), 6 нейронов в скрытом слое и один нейрон в выходном слое, отражавшем наличие или отсутствие этого вида планктона.

В качестве входных данных выступали спектральные значения коэффициентов отражения для дистанционного зондирования под поверхностью воды  $R_{rsw}(\lambda)$  на длинах волн, соответствующих 6 каналам видимого диапазона

MODIS. Входные значения  $R_{rsw}(\lambda)$  на 6 каналах инвертируются сетью, результатом чего в выходном нейроне является число, варьирующее от 0 до 1. Значение 0 означает отсутствие цветения *L. chlorophorum*, а значение 1 означает соответственно, что пиксель достоверно принадлежит к области цветения *L. chlorophorum*. Результаты в промежутке между 1 и 0 считаются переходными от отсутствия цветения к цветению. Такие значения округлялись до 0 или до 1.

Наряду с НС-алгоритмом, авторами был разработан для этой же цели и алгоритм, основанный на методе нечётких С-средних: (нС-с) (fuzzy C-means), в котором нечёткие кластеры описываются матрицей нечёткого разбиения. Нечёткое разбиение позволяет легко решить проблему отнесения к одному из классов объекта находящегося на границе двух классов. Это осуществляется присвоением объекту степени принадлежности, равной 0,5.

Проведение процедуры нечёткой кластеризации основано на нелинейной оптимизации: в нашем случае это метод неопределённых множителей Лагранжа. Реализация алгоритма осуществляется по последовательной итеративной схеме [7].

Благодаря содержанию в пигментной системе *L. chlorophorum* ХЛ-*b* и перидина, поглощающего в голубой области спектра [8], сигнал в третьем канале MODIS (488 нм) оказывается редуцированным, в результате чего в восстановленном спектре  $R_{rsw}(\lambda)$  появляется минимум (или отрицательный прогиб). Это свойство было использовано нами для предварительной фильтрации спектров  $R_{rsw}(\lambda)$  перед их обработкой обоими алгоритмами (НС и нС-с). Следует подчеркнуть, что примененный критерий не является самодостаточным: эффективность идентификации обоими алгоритмами *L. chlorophorum* обеспечивается учётом спектральных особенностей, извлечённых из *всех* каналов MODIS в видимом диапазоне спектра. Тем не менее, использование этого критерия оказывается весьма полезным для повышения точности работы алгоритмов НС и нС-с.

Для проверки эффективности идентификации *L. chlorophorum* алгоритмами НС и нС-с было произведено сравнением с измерениями *in situ* количества клеток *L. chlorophorum* на двух станциях *viz.* Ouest-Loscolo и Le-Croisic (расположенных на 47° 27' N -2° 32' W и 47° 18' N -2° 31' W ). Выяснилось (см. табл.), что во всех случаях с высокой концентрацией *L. chlorophorum* наличие этой водоросли определялось обоими алгоритмами безошибочно; однако когда концентрация *L. chlorophorum* невысока или она не является доминирующей в фитокомплексе, точность идентификации снижается за счёт подавления сигнала *L. chlorophorum* в результирующем спектре  $R_{rsw}(\lambda)$  другими группами/таксонами фитокомплекса. В результате для данной выборки в 67 % случаев цветения *L. chlorophorum* определяются верно каждым из двух разработанных алгоритмов и 75 %, когда оба алгоритма применяются совместно (ансамблевый режим). Таким образом, наиболее перспективно применение обоих алгоритмов в ансамблевом режиме.

**Эффективность идентификации *L.chlorophorum* алгоритмами НС и нС-с**

Станция	Дата	Концентрация <i>L. chlorophorum</i> (клеток/мл), определённая <i>in situ</i>	Алгоритм НС	Алгоритм нС-с
Ouest-Loscolo	09/09/2002	7 200	0	0
Ouest-Loscolo	24/09/2002	380 000	1	1
Ouest-Loscolo	07/06/2004	34 000	1	1
Ouest-Loscolo	19/09/2005	400 000	1	1
Ouest-Loscolo	03/10/2005	200 000	1	1
Ouest-Loscolo	07/11/2006	66 000	0	0
Ouest-Loscolo	29/05/2007	8600	0	0
Ouest-Loscolo	12/06/2007	160 000	1	1
Ouest-Loscolo	24/07/2007	900 000	1	1
Le-Croisic	09/07/2007	7 450 000	1	0
Le-Croisic	06/08/2007	28 800	1	1
Le-Croisic	15/07/2008	6200	0	1

**3.3. Алгоритм для идентификации и количественной оценки биомассы *Emiliania huxleyi* (по концентрации ХЛ) в присутствии диатомовых водорослей**

Ранее Батч и др. [9] разработали алгоритм для определения концентрации ХЛ в клетках *E. huxleyi* и кокколит (отделившихся от клеток этой микроводоросли пластин) в океанских водах при отсутствии в них других сопутствующих видов фитопланктона. В Бискайском заливе цветения *E. huxleyi* сопровождаются цветением диатомовых водорослей. Это определило необходимость разработать специализированный алгоритм для этой области залива. Наш алгоритм основан на многокомпонентной гидрооптической модели (см. ниже), включённой в процедуру многомерной оптимизации Левенберга-Марквардта (Л-М) [10].

**3.3.1. Описание процедуры Л-М**

Процедура основывается на сравнении измеренного со спутника коэффициента отражения для дистанционного зондирования под поверхностью воды  $R_{rsw}(\lambda)$ , который является функцией вектора концентраций  $C$ , включающего в себя все сосуществующие цветообразующие компоненты в воде (ЦОК) и соответствующие им спектральные удельные коэффициенты поглощения  $a^*(\lambda)$  и обратного рассеяния  $b_b^*(\lambda)$  с его рассчитанным/модельным эквивалентом  $R_{rsw}^*(\lambda)$ .

Многомерное (среднеквадратичное) решение задачи достигается за счёт минимизации квадратов расхождений  $g_i(C)$  между  $R_{rsw}^*(\lambda)$  и  $R_{rsw}(\lambda)$ :

$$f(C) = \sum ig_i^2(C),$$

$$\text{где } g(C) = \sum_j \frac{R^*_j (\lambda\lambda - R_{rsw_j}(\lambda\lambda C))}{R_{rsw_j}(\lambda\lambda C)}.$$

Абсолютный минимум  $f(C)$  может быть найден алгоритмом конечных разностей Левенберга-Марквардта [11, 12], обеспечивающим быстрое схождение процедуры итерации. Мы использовали параметризацию  $R^*_{rsw}(\lambda)$  для вод типа 2, предложенную в [13], которая применима для широкого диапазона солнечных зенитных углов и углов обзора, близких к надиру.

### 3.3.2. Гидрооптическая модель

Известно, что кальцифицирующая водоросль *E. huxleyi* развивается в основном в открытых частях Бискайского залива [14]. Клетки *E. huxleyi* покрыты пластинками карбоната кальция (называемыми кокколитами). Число пластинок у отдельной клетки может значительно варьировать. Таким образом, области цветения *E. huxleyi* даже в открытых водах следует рассматривать как ареалы вод типа 2 [15].

Мы затабулировали значения удельного спектрального коэффициента обратного рассеяния [ $b_b^*(\lambda)$ ] клеток *E. huxleyi* и кокколитов, используя графические данные в [16], и применили значения удельного спектрального коэффициента поглощения [ $a^*(\lambda)$ ] кокколитофора, полученного в [17]. Кокколиты считаются не поглощающими в видимом диапазоне спектра.

В соответствии с [15], некальцифицирующим фитопланктоном, предшествующим и, отчасти, сопутствующим цветению *E. huxleyi* в Бискайском заливе являются в основном диатомовые. Данные об их спектральных значениях  $a^*(\lambda)$  и  $b_b^*(\lambda)$  приведены, например, в [18].

Таким образом, первичные гидрооптические характеристики вод, подверженных цветению *E. huxleyi* (открытые воды Бискайского залива, не содержащие растворённое органическое вещество и минеральную взвесь континентального происхождения [19]), могут быть представлены следующим образом (для простоты, зависимость от длины волны опущена):

$$a = a_w + a^*_d C_d + a^*_{coc} C_{coc} + a^*_{cc} C_{cc};$$

$$b_b = b_{bw} + b^*_{bd} C_d + b^*_{coc} C_{coc} + b^*_{cc} C_{cc},$$

где индексы  $w, d, coc, cc$  обозначают соответственно воду, диатомовые водоросли, кокколитофоры (*E. huxleyi*) и кокколиты;  $a^*_{cc}$  может быть принято равным 0, в соответствии со сказанным выше.

### 3.4. Процедура стыковки спутниковых данных

Исследование [20] совместимости данных SeaWiFS и MODIS, обработанных НС-алгоритмами для Бискайского залива, показало, что после пространственного и временного осреднения данные SeaWiFS и MODIS могут быть надёжно объединены в единый временной ряд. Средняя абсолютная ошибка и коэффициент корреляции для периода перекрытия данных SeaWiFS и MODIS (июль 2002 – декабрь 2004 гг.) оказались соответственно 18,24 % и 0,91 для *ХЛ* и 8,63 % и 0,93 для *ОВ* (рис. 1).

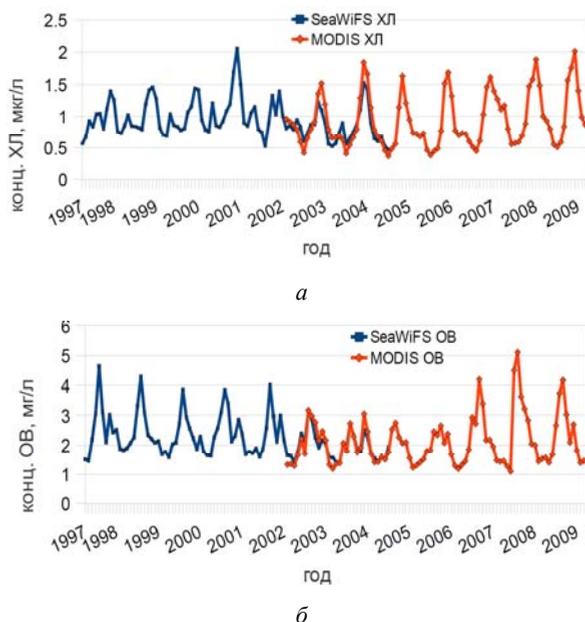


Рис. 1. Временные ряды (1997–2009 гг.) вариаций концентраций *ХЛ*, мкг/л (*а*) и *ОВ*, мг/л (*б*), усредненных по прибрежной зоне (внешней границей которой является 200 м изобата)

### 4. Результаты и обсуждение: сезонная и межгодовая динамика биогеохимических процессов в Бискайском заливе

В полном соответствии с историческими данными, полученными *in situ* [21], сезонная изменчивость *ХЛ* в прибрежной зоне имеет два максимума: а) поздняя весна–раннее лето и осенний (конец сентября–октябрь). Более интенсивным является первое цветение. Время наступления пика цветения немного отличается от года к году, причины этих смещений обсуждаются ниже.

Пики изменчивости/максимумы концентрации *ОВ* случаются в январе и сопровождаются вторичными максимумами, наступающими в апреле–мае и осенью. Эта последовательность обусловлена особенностями сезонной динамики речного стока в Бискайский залив [21, 22]. В зимнее время области высоких концентраций *ОВ* появляются в результате ресуспензии донных осадков, вызы-

ваемых сильными прибрежными ветрами, что регулярно можно наблюдать по данным цвета океана. Это находит свое подтверждение в анализировавшихся авторами спутниковых данных датчика QuikSCAT (не проиллюстрированных здесь): продолжительность периода высокой концентрации *OB* в прибрежной зоне перекрывает не только январь (месяц максимального стока наиболее полноводных рек на французском побережье), но и февраль, а иногда и март в тех случаях, когда в прибрежной полосе скорости приводного ветра составляли 20 м/с и более.

Применение НС-алгоритма позволило не только точно задокументировать все фазы этого явления (его начало и развитие) [20], но и оценить количество ресуспензированных осадков, поступающих в воду, исходя из очевидно реалистического предположения, что водная толща в эти моменты полностью перемешана.

Межгодовые изменения, наблюдаемые из космоса, демонстрируют значительную межгодовую изменчивость в гидрологических и биогеохимических режимах Бискайского залива. Рис. 1 иллюстрирует временные ряды (1997–2009) изменений *ХЛ* (рис. 1, *а*) и *OB* (рис. 1, *б*) в прибрежных водах Бискайского залива. Эти данные показывают, что может быть выделено три периода с различным характером изменчивости *ХЛ*: 1998–2003; 2003–2004 и 2005–2008. Средний из этих трёх периодов характеризуется значительным уменьшением биомассы водорослей (среднее значение *ХЛ* составляет 0,86 мкг/л). Таким образом, различают два режима в функционировании экосистемы: первый (1998–2002) характеризуется медленным уменьшением первичной продуктивности (-0,36 мкг*ХЛ*/л за десятилетие), тогда как во втором режиме на протяжении 2005–2008 тренд изменяется на положительный со скоростью изменения  $\sim +0,58$  мкг*ХЛ*/л за десятилетие.

Основная изменчивость во временных рядах *OB* (рис. 1, *б*) обнаруживает весьма схожие с *ХЛ* тенденции (рис. 1, *а*): за период 1997–2009 существовал сравнительно короткий промежуток времени (2004–2006), характеризуемый значительным спадом поступления *OB* в прибрежные воды. Затем эта тенденция сменяется быстрым подъёмом поступления *OB*, который, как и в случае *ХЛ* (рис. 1, *а*) постепенно приводит к увеличению амплитуды сезонных колебаний.

Основываясь на этих двух временных рядах можно предположить, что период «затишья» был результатом временного уменьшения речного стока и, возможно, снижением ветровой активности в прибрежной зоне, который и вызвал уменьшение поступления *OB*, а также питательных веществ в воды этой части залива, что и сказалось на снижении уровня развития фитопланктона.

Исследование сезонной и межгодовой изменчивости в наступлении и развитии цветения *ХЛ* и увеличения концентраций *OB*, а также изменчивости пространственной протяжённости их ареалов обнаружили существование нескольких случаев/конкретных лет, когда характер этих явлений отличается от режима, обычного для прибрежных вод Бискайского залива (рис. 2).

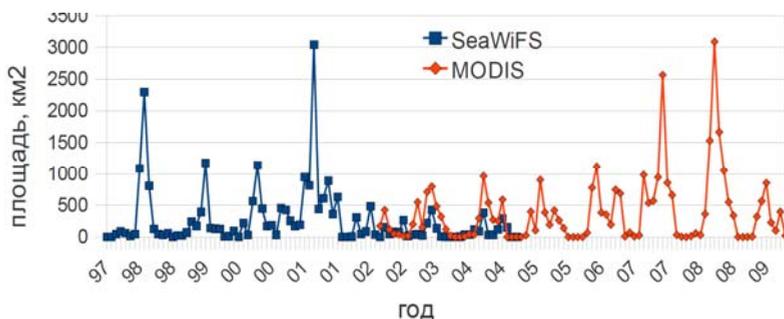


Рис. 2. Временные ряды вариаций площади, занимаемой цветением фитопланктона с концентрацией ХЛ более 7 мкг/л в северной части Бискайского залива

Некоторые из этих отклонений/изменений могут быть объяснены атмосферно-погодными факторами, но в 1999, 2007 и 2008 гг. движущей силой было, очевидно, вызванное апвеллингом поступление питательных веществ из донных осадков, что находит свое отражение во временной динамике поля концентрации ХЛ (увеличении периода цветения фитопланктона). Рис. 3 иллюстрирует эту ситуацию на начало июня 2008 г. Анализ спутниковых данных датчиков QuikSCAT и MODIS по силе приповерхностного ветра и температуре поверхности воды (не проиллюстрированных здесь) полностью подтвердил, что в этот период, действительно, в северной части залива сформировался апвеллинг, который был вызван продолжительными (длительностью несколько дней) северо-восточными ветрами. Возникновение апвеллингов в северной части Бискайского залива описано во многих судовых исследованиях (см., например, [22]).

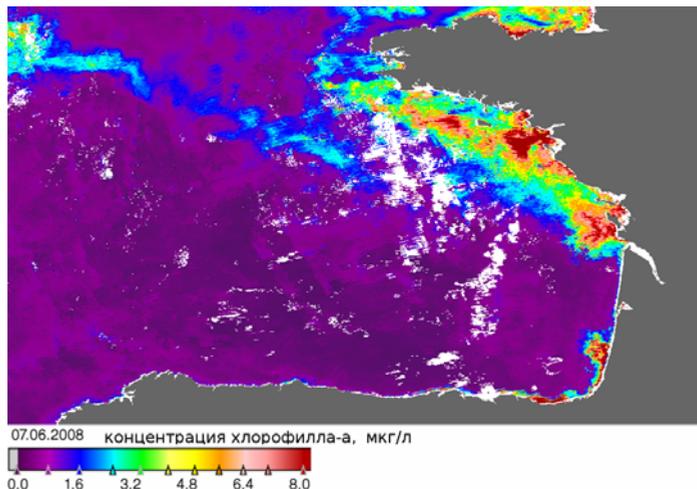


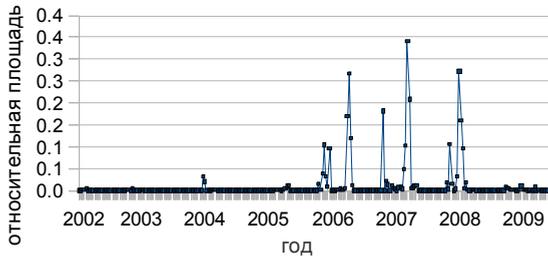
Рис. 3. Цветение фитопланктона в первую неделю июня 2008 г., вызванное апвеллингом

Вышеупомянутые данные по случаям ресуспенции донных осадков зимой, а также и усиление и большая протяжённость цветений фитопланктона, вы-

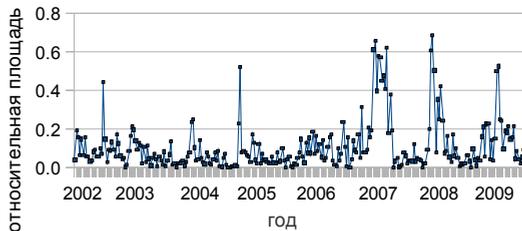
званные апвеллингом в середине лета показывают, что биогеохимические поля в Бискайском заливе подвержены значительному влиянию ветровой активности в этом регионе.

Как отмечалось выше, в Бискайском заливе развиваются виды фитопланктона, относящиеся к разряду вредных, в частности, зеленой динофлагеллятной водоросли *Lepidodinium chlorophorum* и кальцифицирующей водоросли *Emiliana huxleyi*.

Основанное на спутниковых данных, исследование многолетней изменчивости динамики цветения *L. chlorophorum* во французской части побережья Атлантического океана, показало, что существуют две области, в которых такие цветения происходят довольно спорадично, но каждое событие имеет большую пространственную протяжённость (см., например, рис. 4, *a*), тогда как в других районах, в основном смежных с дельтами впадающих в залив рек (см. рис. 4, *б*), этот вид фитопланктона развивается ежегодно, но часто в достаточно ограниченных, не больших по площади областях. Как иллюстрирует рис. 4, за последнее десятилетие эти события приобретают тенденцию к учащению и распространению по более протяженной области, что могло бы быть связано с климатическими изменениями в районе.



*a*



*б*

Рис. 4. Интенсивность цветений *L. chlorophorum* (относительная область занята водорослями) в море Д'Ируаз (*a*) и в районе р. Шаранга (*б*)

Рис. 5, *a* иллюстрирует случай интенсивного цветения кокколитофоры *E. huxleyi* в центральной, пелагиальной части Бискайского залива, выявленного по снимку MODIS, обработанному Л-М-алгоритмом. Последствием цветения

*E. huxleyi* является массивное образование кокколитов, которое продемонстрировано на рис. 5, в. Этому цветению предшествовало интенсивное развитие диатомовых, следы которого различимы на восточной периферии цветения *E. huxleyi* (рис. 5, б).

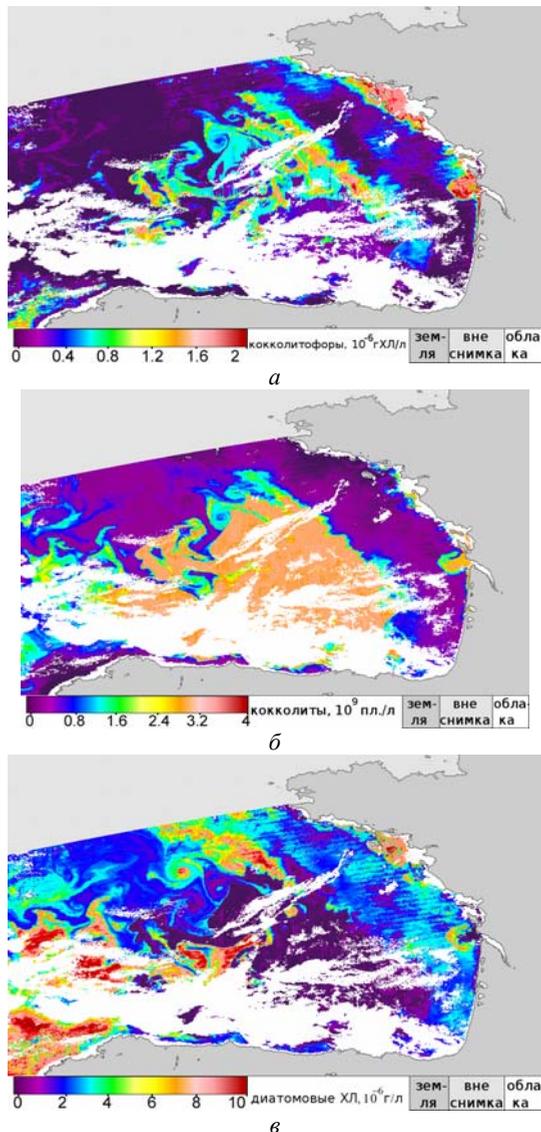
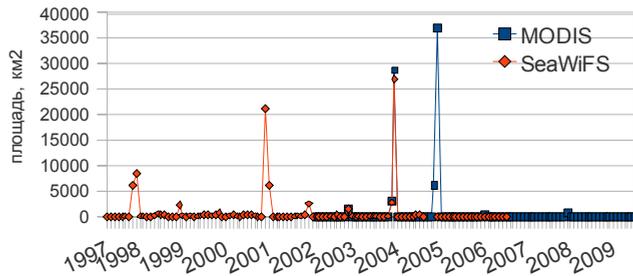
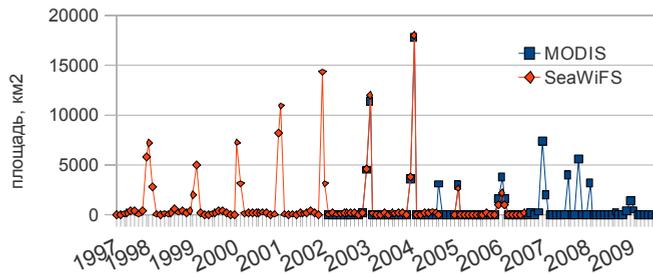


Рис. 5. Результаты восстановления концентраций (а) – кокколитофоров (мкгХЛ/л), (б) – кокколитов ( $10^9$  пластин/л) и диатомовых водорослей (в) (мкгХЛ/л), по данным MODIS за 5 мая 2005 г., с использованием алгоритма, основанного на процедуре многомерной оптимизации Левенберга-Марквардта и гидрооптической модели для открытой части Бискайского залива, описанных в тексте выше

Для исследования многолетней динамики образования цветений *E. huxleyi* использовались RGB-изображения (т.е. изображения в ложных цветах, получаемого комбинацией яркостных сигналов в красном, зеленом и голубом каналах), полученные по данным CZCS, SeaWiFS и MODIS (с 1997–2009 гг. для SeaWiFS и MODIS, и 1978–1986 гг. для CZCS). При анализе оценивались не только число, но также и пространственную протяжённость цветений. В эпоху CZCS цветения *E. huxleyi* были относительно небольшой протяжённости и располагались в районе моря Д'Ируаз (рис. 6, а). Позднее, цветения кокколитофор продвинулось к югу, распространяясь на значительно большую территорию (рис. 6, б). Как иллюстрирует рис. 6, эти более чем десятилетние спутниковые наблюдения свидетельствуют о том, что явление цветения *E. huxleyi* становилось всё более интенсивным до 2005 г., охватывая (например, в 2005 г., рис. 5, а) большую долю пелагиальной части Бискайского залива.



а



б

Рис. 6. Площадь, занимаемая *E. huxleyi* в Бискайском Заливе: а – центральная часть залива, б – море Д'Ируаз

Как свидетельствуют результаты наших исследований, в открытых частях Бискайского залива явления цветений вредных водорослей (в отличие от прибрежной зоны) происходят нерегулярно, с явной тенденцией к росту частотности этого явления во второй половине первого десятилетия XXI в. Можно предположить (как это уже отмечалось выше), что выявленные тенденции в харак-

тере полученных временных рядов по цветению *E. Huxleyi* и *L. Chlorophorum* обусловлены не просто вариациями погодных условий в конкретные годы, а некими климатическими сдвигами. Однако, безусловно, эта гипотеза нуждается в дополнительных исследованиях.

### Заключение

Разработанные алгоритмы для восстановления некоторых параметров качества воды и идентификации цветений вредных водорослей вместе с полученным достоверным подтверждением совместимости данных SeaWiFS и MODIS для Бискайского залива позволили **впервые** установить и наблюдать во времени многочисленные сезонные, межсезонные и многолетние изменения в биогеохимических полях в прибрежных водах и пелагиальной зоне этого водного объекта. Синергетическое использование спутниковых данных о силе и направлении ветра, ТПО, данных о цвете океана и доступных *in situ* данных предоставило возможность интерпретировать наблюдаемую динамику биогеохимических полей в терминах региональных океанологических процессов и, предположительно, климатических изменений.

Авторы выражают благодарность коллегам из IFREMER за предоставленную уникальную базу синхронных и квазисинхронных с пролетом спутников SeaWiFS и MODIS данных, полученных измерениями *in situ* параметров качества воды в прибрежных водах Бискайского залива.

### Литература

1. Limits of Oceans and Seas, 3rd edition + corrections". International Hydrographic Organization. 1971. с. 42 ; [http://www.iho-ohi.net/iho\\_pubs/standard/S-23/S23\\_1953.pdf](http://www.iho-ohi.net/iho_pubs/standard/S-23/S23_1953.pdf).
2. Gohin F., Druon J. N. & Lampert L., (2002). A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 23(8), p. 1639-1661.
3. Jerome J. H, Bukata R.P. & Miller J.R. (1996), Remote sensing reflectance and its relationship to optical properties of natural water. *International Journal of Remote Sensing*, 17(1), сс. 43-52.
4. Pozdnyakov D.V., Pettersson L.H., Johannessen O.M., Lyaskovsky A.V., Filatov. N.N. & Bobylev L.P. (2003). SeaWiFS maps water quality parameters of the White Sea. *International Journal of Remote Sensing*, 24, p. 3-6.
5. Haykin S. (1998). *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*, сс. 31-36 (New Jersey: Prentice Hall).
6. Gohin F. (2009). personal communication
7. Shtobva S.D. (2009). "Introduction into the theory of fuzzy ensembles and fuzzy logic". <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/12.php>
8. Hoepffner N., Sathyendranath. (1993) S. Determination of the major groups of phytoplankton pigments from the absorption spectra of total particulate matter// *Journal of Geophysical Research*. V. 98. № C12, p. 22789-22803.
9. Balch W.M., Gordon H.R., Bowler B.C. et al. (2005). Calcium carbonate measurements in the surface global ocean based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Journal of Geophysical Research* Vol. 110 (C07001).

10. Korosov A.A., Morozov Eu.A., Pozdnyakov D.V., Pettersson L. H. & Grassl H. (2009) Spaceborne Identification and Mapping of the Areas of Coccolithophore Blooms in the Bay of Biscay. *Remote sensing of the Earth*, 3, p. 67-78.
11. Levenberg K. (1944). A method for the solution of certain non linear problems in least squares. *Quantitative and applied Mathematic*, 2, p. 164-168.
12. Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. *Journal of the International Society of Applied Mathematics*, 11(2), p. 36-48.
13. Jerome J.H, Bukata R.P. & Miller J.R., 1996, Remote sensing reflectance and its relationship to optical properties of natural water. *International Journal of Remote Sensing*, 17(1), p. 43-52.
14. Lavender S.J., Raitsos, D.E. & Pradhan Y., 2008. Variations in the phytoplankton of the North-Eastern Atlantic Ocean: from the Irish Sea to the Bay of Biscay. In V. Barale and M. Gade (Eds.), *Remote Sensing of the European Seas*, pp. 67-78 (Springer Science+Business Media B.V.).
15. Morel A. & Bricaud A., (1981). Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep Sea Res. P.I. A. Oceanogr. Res. Papers*, 28, p. 709-722.
16. Balch W.M.K., Drapeau D.T., Cucci T.L. et al. (1999). Optical backscattering by particulate inorganic and organic carbon fractions, *Journal of Geophysical Research* 104. cc. 1541 – 1558.
17. Bricaud A., Morel A. & Prieur L. (1983). Optical efficiency factors of some phytoplankters, *Limnology and Oceanography*, 28, p. 816-832.
18. Sathyendranath S. (2000). General Introduction. In: *Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and other Optically-Complex, Waters*. (Ed. S. Sathyendranath). IOCCG Report No.3, p. 5-21.
19. Gohin F, Saulquin B., Oger-Jeanneret H., Lozac'h L., Lampert L., Lefebvre A., Philippe Riou, P. & Bruchon F. (2008). Towards a better assessment of the ecological status of coastal waters using satellite-derived chlorophyll-a concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 112, p. 3329-3340.
20. Morozov E., Korosov A., Pozdnyakov D., Pettersson L. & Sychev V. (2010). A new area-specific bio-optical algorithm for the Bay of Biscay and assessment of its potential for SeaWiFS and MODIS/Aqua data merging, *International Journal Of Remote Sensing*. In press accepted.
21. Lampert L., Queguiner B., Labasque T., Pichon A. & Lebreton N. (2002). Spatial variability of phytoplankton composition and biomass on the eastern continental shelf of the Bay of Biscay (north-east Atlantic Ocean). Evidence for a bloom of *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) in spring 1998. *Continental Shelf Research*, 22, p. 1225-1247.
22. Puillat I., Lazure P., Jegou A.M., Lampert L. & Miller P.I. (2004). Hydrographical variability on the French continental shelf in the Bay of Biscay, during the 1990s, *Continental Shelf Research*, 24, p. 1143–1163.