

На правах рукописи

Морозов Евгений Александрович

АЛГОРИТМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ
ХЛОРОФИЛЛА-А И ОБЩЕЙ ВЗВЕСИ
И ИДЕНТИФИКАЦИИ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ
LEPIDODINIUM CHLOROPHORUM И *EMILIANA*
HUXLEYI ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ НА
ПРИМЕРЕ БИСКАЙСКОГО ЗАЛИВА

Специальность: 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург 2013

Работа выполнена в Научном фонде "Международный центр по окружающей среде и дистанционному зондированию имени Нансена" и федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Российский государственный гидрометеорологический университет"

Научные руководители: доктор физико-математических наук, проф.
Поздняков Дмитрий Викторович

кандидат физико-математических наук, проф.
Сычѳв Виталий Иванович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, проф.
Кудрявцев Владимир Николаевич

кандидат географических наук, доц.
Шилов Игорь Олегович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ)

Защита состоится 06 июня 2013 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета Д 212.197.02 при Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу: 195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект, д. 98.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ).

Автореферат разослан 4 мая 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат географических наук,



проф. В. Н. Воробьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность.

Бискайский залив (БЗ) является важным природным объектом: прибрежная зона имеет высокую плотность населения и здесь располагаются разнообразные промышленные предприятия и активно ведётся сельское хозяйство (Treguer, 1979; 2000; ICES, 2008; ICES, 2010; OSPAR Commission, 2000).

Фитопланктон — один из важнейших индикаторов состояния экосистемы. По изменениям динамики этого первичного продуцента можно судить о состоянии экосистемы в целом, прежде всего, имея в виду её трофический статус.

С возрастанием общей антропогенной нагрузки на БЗ усиливается влияние на трофический статус этой акватории и светового климата в водном столбе. Продуцирование микроводорослями, как фототрофными растительными организмами, регулируется в значительной степени доступностью световой энергии в водном столбе. В прибрежных водах важным регулятором светового режима является взвесь, в основном терригенного происхождения. Следовательно, для более полного понимания процессов, происходящих в водной экосистеме на её нижнем трофическом уровне, необходимо уметь оценивать и содержание терригенной взвеси, и её влияние на перенос солнечного излучения в водном столбе.

К этому следует добавить, что в последние годы всё большее внимание начинают привлекать и учащающиеся случаи массового развития вредоносных видов водорослей, как в прибрежной, так и в пелагиальной части БЗ (*Lepidodinium chlorophorum* и *Emiliania huxleyi*, соответственно).

Таким образом, слежение за экологическим состоянием прибрежной зоны и его изменением представляет интерес с многих точек зрения.

Однако ввиду большой площади БЗ традиционный мониторинг с научно-исследовательских судов и стационарных пунктов не в состоянии адекватно справляться с этой задачей. В этом отношении спутниковые дистанционные системы, и прежде всего те, которые оперируют в видимом диапазоне электромагнитного спектра, оказываются наиболее предпочтительными. Это в свою очередь означает, что требуются соответствующие алгоритмы для выделения и

количественной оценки искомой информации из интегрального светового сигнала, выходящего из-под поверхности воды и воспринимаемого спутниковым датчиком.

БЗ является примером оптически очень неоднородного водного объекта, что, естественно, представляет серьёзное затруднение для разработки адекватного био-оптического алгоритма обработки спутниковых данных о цвете океана, и последующего анализа результатов восстановления параметров качества воды (ПКВ).

До настоящего времени отсутствовали достаточно точные методы и биооптические алгоритмы, которые позволили бы, по возможности, комплексно исследовать со спутников указанную совокупность проблем экосистемы БЗ на низшем трофическом уровне.

В свете сказанного выше разработка и реализация такого рода алгоритмов представляется чрезвычайно своевременной задачей.

В силу сложнейших связей между гидро-биологическими и геофизическими процессами, на повестку дня выдвинута задача синергетического использования спутниковой информации в разных спектральных интервалах.

Наконец, характерные для региона БЗ сложные метеорологические условия, частая облачность в зимний период, а также сложная по своей природе динамика био-геохимических процессов в БЗ и необходимость использования протяжённых рядов данных выдвигают задачу совмещения спутниковых данных аналогичного предназначения.

В данной диссертационной работе мы постарались как можно более полно решить упомянутые выше задачи.

Цель исследования: Создание биооптических алгоритмов, позволяющих выявить характерные особенности состояния и динамики экосистемы БЗ на низшем уровне её трофической структуры и их связи с внутриводными и гидрометеорологическими процессами.

При этом решались следующие **задачи:**

1. Разработка алгоритма определения концентраций хлорофилла-а (ХЛ) и общей взвеси (ОВ) в шельфовой зоне БЗ по данным спутниковых

датчиков SeaWiFS и MODIS с использованием репрезентативной базы данных измерений *in situ*.

- 2 Разработка методики объединения данных по концентрациям ХЛ и ОВ, полученных со спутниковых датчиков SeaWiFS и MODIS.
- 3 Исследование эффективности объединения данных датчиков SeaWiFS и MODIS для увеличения покрытия акватории БЗ данными (в периоды с интенсивным облачным покровом).
- 4 Увеличение продолжительности ряда данных по пространственно-временным вариациям концентраций ХЛ и ОВ в БЗ за счёт объединения (bridging) данных с датчиков SeaWiFS и MODIS в единый временной ряд.
- 5 Разработка алгоритма идентификации цветений *L. chlorophorum* по данным датчика MODIS с использованием базы данных измерений *in situ*.
- 6 Исследование сезонной, межгодовой и пространственной динамики цветений *L. chlorophorum*.
- 7 Разработка алгоритма одновременного определения концентраций ХЛ и кокколитофоров кокколитофора *E. huxleyi*, а также ХЛ диатомовых в областях интенсивного цветения этого кокколитофора.
- 8 Разработка алгоритмов идентификации цветений кокколитофоров *E. huxleyi* по данным спутниковых датчиков CZCS, SeaWiFS и MODIS.
- 9 Разработка методики слияния данных спутниковых датчиков CZCS, AVHRR, SeaWiFS и MODIS по цветениям *E. huxleyi*.
- 10 Увеличение продолжительности длины ряда данных об интенсивных цветениях *E. huxleyi* за счёт объединения данных датчиков CZCS, AVHRR, SeaWiFS и MODIS.

Научная новизна.

- Разработаны наиболее точные на сегодняшний день алгоритмы восстановления концентраций ХЛ и ОВ в БЗ.
- Произведено объединение рядов данных по концентрациям ХЛ и ОВ в шельфовой зоне БЗ. Впервые составлены объединённые продолжительные ряды данных концентраций ХЛ и ОВ по спутниковым наблюдениям.
- Впервые получен ряд данных частотности цветений кокколитофоров *E. huxleyi* в БЗ за 30-летний период.

- Впервые применена для вод БЗ методика идентификации цветений *E. huxleyi* по данным спутниковых датчиков AVHRR и CZCS.
- Впервые разработан и применён алгоритм определения присутствия и картирования ареала цветения водоросли *Lepidodinium chlorophorum* в прибрежных водах БЗ за период 2002-2008 гг.
- Впервые для БЗ численно оценена эффективность объединения данных датчиков SeaWiFS и MODIS в зимний период для повышения покрытия акватории данными в периоды с интенсивной облачностью.

Практическая значимость.

Показана перспективность / принципиальная возможность комплексного исследования параметров качества вод (ПКВ) конкретного водного объекта с гидрооптически сложным составом вод на основе разнообразной исключительно спутниковой информации.

Результаты могут быть использованы для:

- усовершенствования мониторинга экологического состояния вод БЗ, включая получение информации о биопродуктивности вод в шельфовой зоне и световом климате этой акватории;
- для мониторинга возникновения и динамики развития вредоносных цветений *Lepidodinium chlorophorum* в прибрежных водах БЗ;
- для мониторинга вредоносных цветений *Emiliania huxleyi* в открытой/пелагиальной части БЗ;
- при идентификации вредоносных цветений водорослей также и в различных районах Мирового океана (в силу неспецифичности разработанных алгоритмов по отношению к типам природных вод).

Положения, выносимые на защиту.

1. Разработаны наиболее точные на настоящий момент алгоритмы для определения концентраций ХЛ и ОВ в шельфовых водах БЗ.

Впервые:

2. Разработаны с применением нейронных сетей и нечёткой логики алгоритмы идентификации цветений водоросли *Lepidodinium chlorophorum* в прибрежных водах БЗ.

3. Разработан алгоритм одновременного определения концентрации кокколитофитов, ХЛ кокколитофора *Emiliania huxleyi* и ХЛ диатомовых водорослей в районах цветения *E. huxleyi* по данным датчиков SeaWiFS и MODIS.

4. Разработаны алгоритмы идентификации цветений кокколитофоров по данным датчиков SeaWiFS, MODIS, CZCS.

5. На количественном уровне показана оправданность / эффективность объединения данных SeaWiFS и MODIS с помощью взаимосовместимых алгоритмов для исследования пространственно-временной изменчивости ХЛ и ОВ в шельфовой зоне БЗ с применением разработанных алгоритмов. Подтверждено, что по шельфовой зоне пространственно-временная изменчивость в распределениях ХЛ и ОВ обусловлена в основном поступлением вещества с материковым стоком и периодическим влиянием ветрового перемешивания и апвеллингов.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались на следующих конференциях:

VI Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы исследования Земли из космоса", Институт космических исследований РАН, Россия, Москва (10-14 ноября 2008 г.); Международный симпозиум по атмосферной радиации и динамике – МСАРД-2009, Петергоф, С.-Петербург, Россия (22-26 июня 2009 г.); Седьмая Всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, Россия (16-20 ноября 2009 г.); Oceans from space symposium, Венеция, Италия (26-23 апреля 2010 г.); ESA Living planet symposium, Берген, Норвегия (28 июня – 2 июля 2010 г.); Восьмая всероссийская открытая конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса", Москва, Россия (15-19 ноября 2010 г.); 64-я конференция профессоров, преподавателей и научных работников, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия (25 января – 5 февраля 2011 г.).

Основные результаты работы использованы при подготовке курсов "обработка спутниковой информации" и "аэрокосмические методы" для студентов специальности океанология и магистров гидрометеорологов океанологического факультета РГГМУ.

Публикации. По теме работы опубликовано 14 печатных работ, из которых 5 – статьи в ведущих рецензируемых журналах по данной тематике. Некоторые из результатов работы использованы при написании книги "Monitoring of harmful algal blooms", Lasse H. Pettersson and Dmitry Pozdnyakov, Springer-Praxis, 2013.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 5 глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 225 страниц; содержит 79 иллюстраций, 9 таблиц. Список литературы включает 197 библиографических ссылок, из них 177 работ из зарубежных и международных изданий.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи работы, отражена научная новизна и значение результатов для науки и практики, а также сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** рассматриваются современные пути решения обратной задачи ДЗ водной поверхности в видимом диапазоне спектра, описываются принципы построения алгоритмов её решения. Рассмотрены алгоритмы получения по спутниковым данным дополнительной информации: температуры поверхности океана (ТПО), скорости и направления ветра. Рассмотрены характеристики современных спутниковых датчиков видимого и ИК диапазонов, данные которых использовались в работе. Приведены принципы построения алгоритмов обработки спутниковых данных о цвете вод и даны конкретные примеры наиболее распространённых из них.

В нашем случае решение прямой задачи сводится к нахождению спектральной зависимости подповерхностного коэффициента отражения для дистанционного зондирования в водной среде $R_{rsw}(\lambda, -0)$ от концентраций компонентов водной среды и их оптических свойств. Использование коэффициента $R_{rsw}(\lambda, -0)$ обусловлено тем, что он связан с определяемой по дистанционным данным яркостью водной поверхности $L_w(\lambda, +0, \theta_v, \varphi_v, \lambda)$ измеряемой со спутника:

$$R_{rsw}(-0, \lambda, \theta_0, \varphi) = T_{surf} L_w(+0, \theta_v, \varphi_v, \lambda) / E_d(+0, \lambda), \quad (1)$$

где T_{surf} – фактор ослабления солнечного света при прохождении через раздел вода – воздух, $E_d(+0, \lambda)$ – освещенность водной поверхности, θ_0 – солнечный зенитный угол, φ – угол визирования водной поверхности спутниковым датчиком.

Подповерхностный коэффициент же отражения для дистанционного зондирования может быть параметризован через первичные гидрооптические

характеристики, определяемые непосредственно компонентами морских вод. В частности для средних широт и для характерных для них высот Солнца и вертикального визирования эффективно следующее соотношение (Jerome и др. 1989):

$$R_{rsw} = -0,00036 + 0,110(b_b/a) - 0,0447(b_b/a)^2, \quad (2)$$

где $a = \sum_i C_i a_i^*$; $b_b = \sum_i C_i (b_b^*)_i$, $i = 1, 2, \dots, I$, где a_i^* , $(b_b^*)_i$, – удельные, т.е. отнесенные к единице концентрации C_i , первичные гидрооптические характеристики (ПГХ).

В главе 2 приведена географическая характеристика БЗ. Описаны метеорологический и гидрологический, режимы, гидробиологические и гидрохимические свойства вод, охарактеризованы фитопланктон, общая взвесь и растворённое органическое вещество, а также оптические свойства вод БЗ.

В главе 3 описаны созданные нами алгоритмы обработки спутниковых данных.

В разделе 3.1 описана разработка гидрооптического алгоритма для восстановления концентраций ХЛ и ОВ в шельфовой зоне БЗ. Дана характеристика баз данных использованных для разработки алгоритмов.

Имея обширную базу синхронных и квази-синхронных со спутниковыми измерениями (СКС) данных *in situ*, включающую СКС данные со значениями из всего диапазона изменения параметров в БЗ, мы выбрали метод нейронных сетей (НС).

В НС соседние слои соединены между собой: каждый нейрон в отдельном слое соединён связью (i) с каждым нейроном следующего слоя. Каждая связь имеет вес (w), и выходное значение O каждого нейрона рассчитывается в соответствии с выражением

$$O = f(-bias + \sum_i w_i x_i) \quad (3)$$

где $bias$ – специфичное для каждого нейрона значение, w_i – вес связи, x_i – выходное значение, получаемое по связи от предыдущего слоя (у нейронов во входном слое есть только одна входная связь и x_i являются значениями выходного слоя), f – нелинейная сигмоидная функция, дающая на выходе возрастающие значения в диапазоне от 0 до 1 по мере того, как значение аргумента изменяется от $-\infty$ до $+\infty$:

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-v_j)} \quad (4)$$

где v_j – взвешенная сумма всех сигналов на входе нейрона s .

Алгоритм обучения представляет собой процедуру, осуществляющую последовательность действий для настройки весов.

Оптимальной для наших целей оказалась конфигурация сети с 6 нейронами во входном слое, 10 и 3 нейронами в первом и втором скрытых слоях и одним нейроном в выходном слое (см. рис. 1).

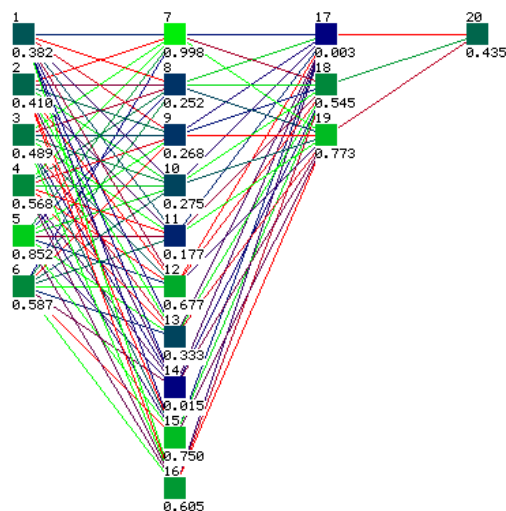


Рисунок 1. Универсальная схема нейронных сетей, использованных в данном исследовании для восстановления концентраций ХЛ и ОВ.

Для настройки сети, был создан тренировочный массив данных, состоящий из векторов концентраций ХЛ и ОВ, измеренных *in situ* и соответствующих им спектров R_{rsw} .

В разделе 3.2 описана разработка биооптических алгоритмов для идентификации и оконтуривания областей цветений *L. chlorophorum*.

Исходя из анализа объёма и характера имевшейся в нашем распоряжении базы дистанционных данных и измерений *in situ*, для автоматической идентификации *L. chlorophorum* были выбраны два независимых подхода: НС и метод, основанный на нечёткой кластеризации с-средних.

Для обучения НС алгоритма идентификации *L. chlorophorum* использовался подход аналогичный описанному в разделе 3.1, но в качестве данных *in situ* использовались результаты наземных наблюдения именно за цветениями фитопланктона *L. chlorophorum*.

Исходной информацией для нечёткой кластеризации основанной на средних является матрица наблюдений X , каждая строчка которой представляет собой результат измерения n признаков одного из M объектов кластеризации. Задача кластеризации состоит в разбиении объектов из матрицы X на несколько подмножеств (кластеров), в которых объекты более схожи между собой, чем с объектами из других кластеров. В нашем случае использовалось разбиение на два подмножества: *L. chlorophorum* и не *L. chlorophorum*.

В разделе 3.3 описаны алгоритмы, с помощью которых производились исследования цветений кокколитофора *E. huxleyi*. В рамках алгоритма на основе многомерной оптимизации Левенберга-Марквардта для определения кокколитофоров и кокколитов по данным SeaWiFS и MODIS мы оперируем следующими величинами: $R_{rsw}(\lambda, C, a, b_b)$ – значение коэффициента отражения для дистанционного зондирования непосредственно под поверхностью воды на длине волны λ_j , рассчитанного по параметризации (1) для заданных значений вектора концентраций $C = (C_{chl}, C_{mv}, C_{pov})$ и спектральных значений суммарного поглощения a и рассеяния назад b_b в водном столбе, S_j – значение коэффициента отражения для дистанционного зондирования, измеренное дистанционным датчиком на длине волны λ_j , параметризации (2) для заданных значений вектора концентраций $C = (C_{chl}, C_{mv}, C_{pov})$ и спектральных значений суммарного поглощения a и рассеяния назад b_b в водном столбе.

Вектор концентрации C наиболее близкий к реальному его значению достигается при поиске абсолютного минимума функции невязки $f(C)$:

$$f(C) = \sum_j g_j^2(C), \quad (5)$$

где g_j – величина невязки измеренного и рассчитанного коэффициентов отражения, которая может быть вычислена следующим способом:

$$g_j = [S_j - R_{rsw}(\lambda_j, C, a, b_b)]. \quad (6)$$

При поиске искомого вектора концентрации C используется следующая итерационная формула:

$$C_{k+1} = C_k + \lambda_k (F_k^t F_k + \mu_k D_k)^{-1} F_k R_{rsw}(C_k), \quad (7)$$

где k – номер шага итерации, $F_k = |\partial R_{rsw} / \partial C_k|$ – матрица $n \times m$; F_k^t – транспонированная матрица F_k , D – диагональ матрицы $F_k^t F_k$, μ_k – направление минимизации, λ – длина шага оптимизации.

Метод многомерной оптимизации отыскивает минимум функции невязки для нескольких стартовых векторов концентраций C_0 . В качестве окончательного решения задачи принимается вектор концентраций C , который дает наименьшее из значений функции невязки.

Для исследования многолетней изменчивости цветений *E. huxleyi* с использованием всех доступных данных о цвете океана, был разработан алгоритм, который может быть применен к данным SeaWiFS, MODIS и менее совершенного датчика CZCS.

Алгоритм основан на выявлении в спектре яркости восходящего излучения водной поверхности в областях цветения *E. huxleyi* характерных спектральных особенностей, с использованием которых была настроена система порогов по отношению к высоте и форме анализируемого спектра, что позволяет выделять пиксели с цветением этой водоросли.

Для получения коэффициента отражения для дистанционного зондирования, R_{rs} в спектральной области единственного канала видимого диапазона (580 нм – 680 нм) датчика AVHRR и выявления случаев цветения *E. huxleyi*, мы использовали процедуру атмосферной коррекции, предложенную в (Smyth *et al*, 2004). Ввиду невысокой энергетической чувствительности датчика AVHRR имелась возможность регистрировать только факт цветения водоросли *E. huxleyi*.

В главе 4 описана оценка точности разработанных нами алгоритмов восстановления ПКВ в БЗ.

В разделе 4.1 приведена оценка точности биооптических алгоритмов восстановления ПКВ: НС-алгоритмов (НСА) для восстановления концентраций ХЛ и ОВ в шельфовой зоне; НСА и алгоритма с-средних для идентификации *L. chlorophorum*.

При оценке по коэффициенту корреляции (r) и среднеквадратической ошибке (СКО), точность НС-алгоритма для ХЛ характеризуется следующими значениями: $r=0,79$ (СКО = 3,17 мкг/л) и $r=0,72$ (СКО = 2,45 мкг/л) для СКС данных SeaWiFS и MODIS, соответственно (см. рис. 2 а, б).

Точность НС-алгоритма для восстановления концентраций ОВ характеризуется следующими значениями: $r = 0,71$ (СКО = 2,865 мг/л) для SeaWiFS и $r \sim 0,74$ (СКО = 2,877 мг/л) для MODIS (см. рис. 2 в, г).

О высокой точности алгоритма также говорит сравнение среднеквадратической ошибки восстановления по спутниковым данным концентрации ХЛ и ОВ со среднеквадратическим отклонением соответствующих наборов СКС данных *in situ* (табл. 1).

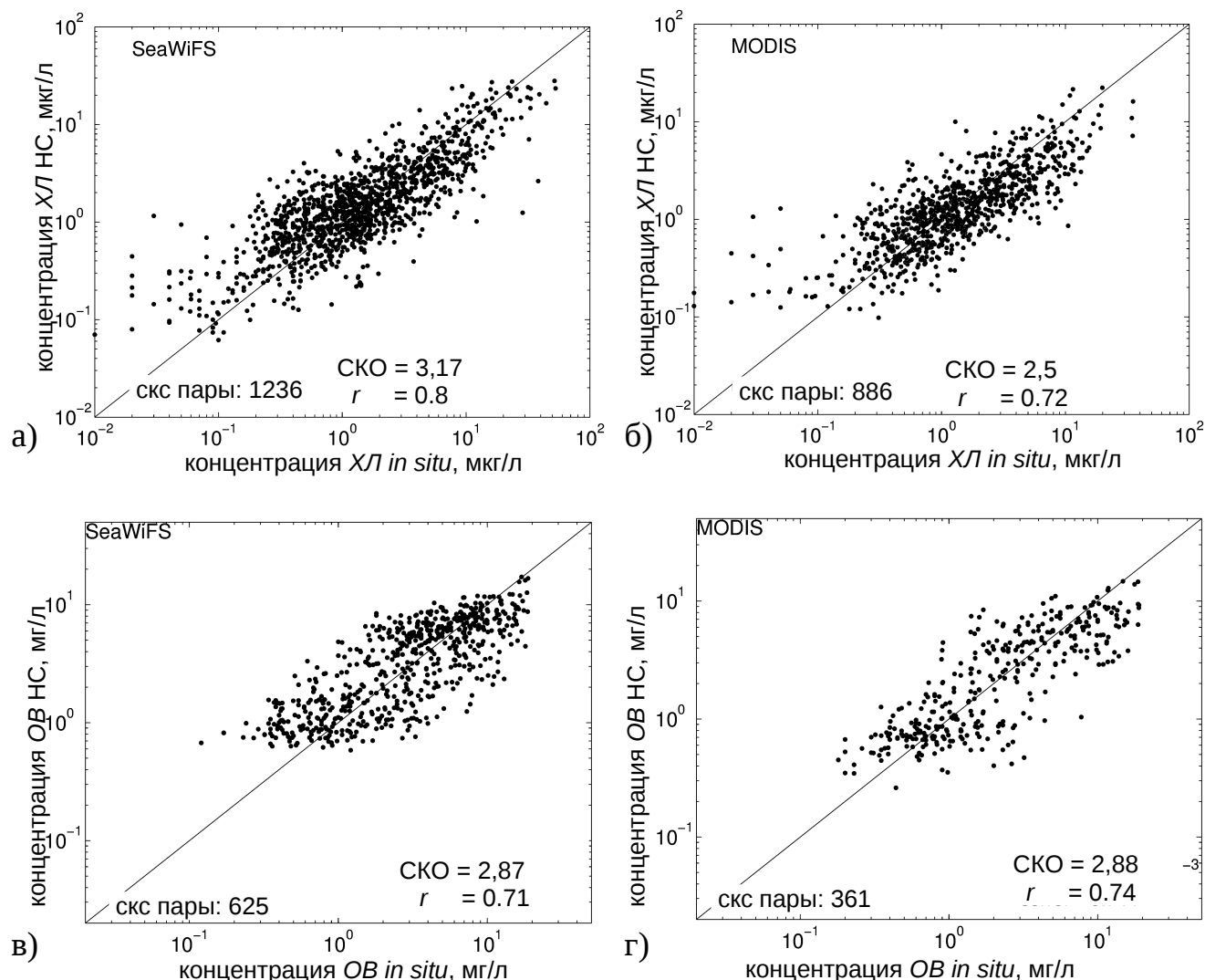


Рисунок 2. Результаты сравнения восстановления концентраций ХЛ алгоритмом НС для SeaWiFS (а) и MODIS (б) и концентраций ОВ, полученных алгоритмом НС для SeaWiFS (в) и MODIS (г), с измерениями *in situ*.

Применение алгоритма к спутниковым изображениям выявляет пространственное распределение концентраций ХЛ и ОВ (см. рис. 3). В заштрихованной части выявляются структуры, идентифицируемые НС-алгоритмом, как и следовало ожидать, как область высоких концентраций ОВ, в действительности — это области скопления кокколитов *E. huxleyi* в местах

цветения этой водоросли, имеющие оптические свойства, схожие с минеральной взвесью теригенного происхождения.

Таблица 1. Стандартное отклонение значений концентраций, полученных *in situ*. Среднеквадратическая ошибка восстановления этих значений по спутниковым данным НСА и коэффициент корреляции, r между значениями полученными *in situ* и восстановленными по спутниковым данным.

| Параметр | Датчик | станд. откл. <i>in situ</i> | СКО | r |
|----------|---------|-----------------------------|-------------|-------|
| ХЛ | SeaWiFS | 5,132 мкг/л | 3,174 мкг/л | 0,795 |
| | MODIS | 3,494 мкг/л | 2,498 мкг/л | 0,720 |
| ОВ | SeaWiFS | 4,049 мг/л | 2,865 мг/л | 0,711 |
| | MODIS | 4,220 мг/л | 2,877 мг/л | 0,744 |

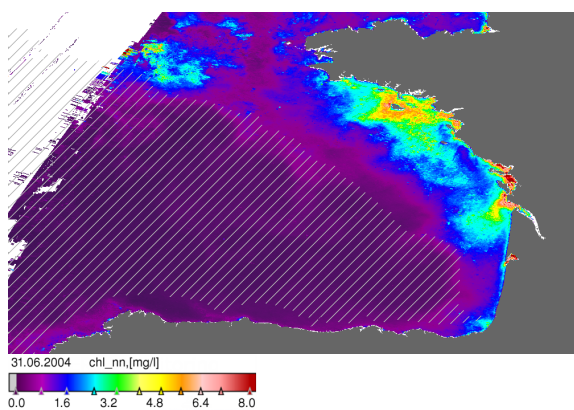
Результаты дистанционной идентификации *L. chlorophorum* (с применением НС-алгоритма (НСА) и алгоритма нечёткой классификации средних (АсС)) проверены по данным *in situ*.

В качестве примера на рисунке 4 (а, б) приведены результаты идентификации и оконтуривания цветения *L. chlorophorum* в море Д'Ируаз. Применение НСА и АсС для обработки этого изображения однозначно выявляет (Рис. 4.6 б) наличие области цветения.

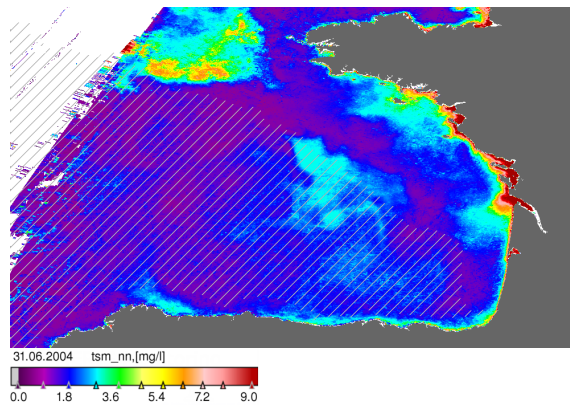
В разделе 4.2 описано совмещение данных разных датчиков цвета океана и выявление внутригодовой изменчивости ПКВ в шельфовой зоне БЗ. Исследован вопрос соотношения значений концентраций ХЛ и ОВ, восстанавливаемых в одном и том же пикселе по данным датчиков SeaWiFS и MODIS. Для этого были рассмотрены все доступные данные по БЗ за период их совместного функционирования (2002 – 2004 гг.) и выбраны случаи, для которых изображения SeaWiFS и MODIS получены с временным интервалом, не превышающим 2,5 часа.

Скатерограммы на рисунке 5 иллюстрируют расхождение между данными SeaWiFS и MODIS за 2003 год.

Был проанализирован набор статистических параметров (см. табл. 2), характеризующих совместимость значений ХЛ и ОВ, определённых в совпадающих по пространству и времени пикселях по данным SeaWiFS и MODIS.

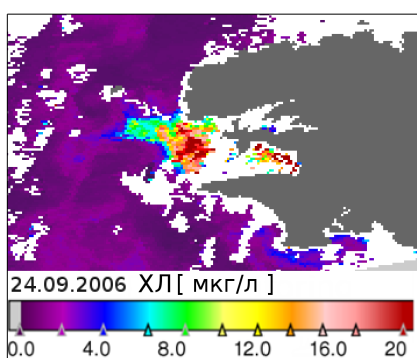


а)

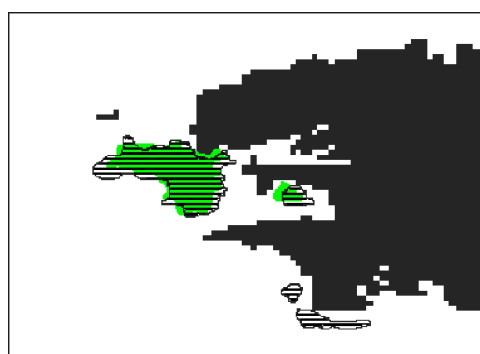


б)

Рисунок 3. Среднемесячные пространственные распределения ХЛ (а) и ОВ (б) полученные НС-алгоритмом, в шельфовой зоне БЗ (июнь 2004). Данные SeaWiFS.

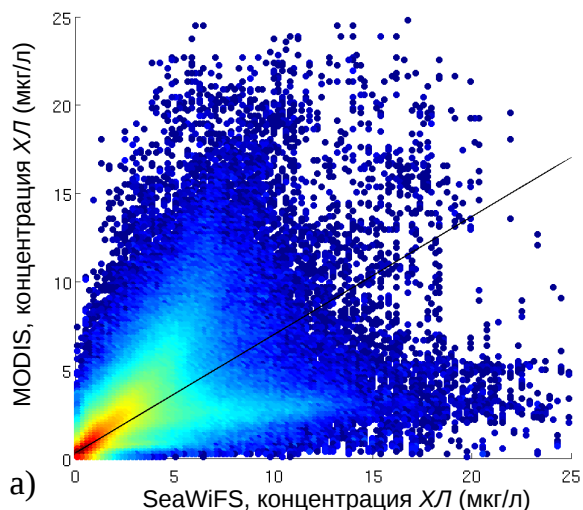


а)

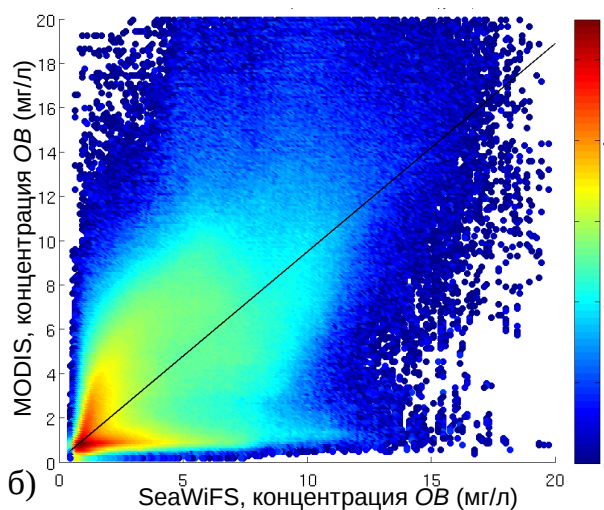


б)

Рисунок 4. Пространственное распределение ХЛ (а) и область цветения *L. chlorophorum* в море Д'Ируаз на 26.10.2006, выделенная с применением НСА (черная штриховка) и АсС (зелёная область) (б) к данным MODIS-Aqua.



а)



б)

Рисунок 5. Скатерограммы, иллюстрирующие соответствие между результатами восстановления концентраций ХЛ (а) и ОВ (б) по данным SeaWiFS и MODIS, использованным в данном исследовании. Цветовая шкала отражает значения

десятичного логарифма числа пар данных в точке графика. Чёрная линия определяется уравнением линейной регрессии между данными SeaWiFS и MODIS.

Для каждого месяца были рассчитаны следующие статистические параметры: угловой коэффициент (*S*) и свободный член (*I*) линейной регрессии

$$x_{MODIS} = I + S \cdot x_{SeaWiFS}; \text{ коэффициент корреляции } (r = \frac{\sum (\bar{x}_{SeaWiFS} - X_{SeaWiFS})(\bar{x}_{MODIS} - X_{MODIS})}{\sqrt{\sum (\bar{x}_{SeaWiFS} - X_{SeaWiFS})^2 \sum (\bar{x}_{MODIS} - X_{MODIS})^2}});$$

средняя абсолютная ошибка (в %) ($CAO = \frac{\sum (x_{SeaWiFS} - x_{MODIS}) / x_{SeaWiFS} \times 100}{n}$), и

среднеквадратическая ошибка логарифмированных значений ($CKO = \exp \sqrt{\frac{\sum (\ln x_{SeaWiFS} - \ln x_{MODIS})^2}{n}}$), где *x* – концентрация ХЛ или ОВ.

Было проанализировано, как процедура слияния влияет на долю свободной от облаков области, доступной для последующего анализа.

Таблица 2. Сравнение результатов определения концентрации ХЛ и ОВ

НС- алгоритмом по данным SeaWiFS и MODIS в БЗ и юго-восточной части пролива Ла-Манш для 2003 г.; *n* = число пар пикселей собранных за период времени.

| ХЛ | | | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|---------------|-------------------|-----------------|
| Месяц | S | I | R | CAO, % | CKO, мкг/л | n |
| Январь | 0,59 | 0,26 | 0,82 | 7,66 | 1,63 | 760775 |
| Февраль | 0,55 | 0,37 | 0,75 | 14,50 | 1,54 | 677390 |
| Март | 0,68 | 0,37 | 0,79 | 26,19 | 1,53 | 1329593 |
| Апрель | 0,51 | 0,57 | 0,69 | 24,11 | 1,58 | 1414780 |
| Май | 0,75 | 0,35 | 0,79 | 45,83 | 1,68 | 975603 |
| Июнь | 0,93 | 0,21 | 0,81 | 42,88 | 1,70 | 1185436 |
| Июль | 0,85 | 0,25 | 0,82 | 86,38 | 1,98 | 1847563 |
| Август | 0,63 | 0,27 | 0,81 | 70,00 | 1,88 | 1603839 |
| Сентябрь | 0,76 | 0,21 | 0,85 | 47,60 | 1,70 | 2377051 |
| Октябрь | 0,49 | 0,29 | 0,70 | 5,14 | 1,72 | 709337 |
| Ноябрь | 0,43 | 0,25 | 0,67 | -18,24 | 2,13 | 592768 |
| Декабрь | 0,60 | 0,14 | 0,81 | -9,15 | 1,82 | 346962 |
| Весь год | 0,67 | 0,30 | 0,77 | 40,14 | 1,75 | 13821097 |
| ОВ | | | | | | |
| Месяц | S | I | R | CAO, % | CKO, мг/л | n |
| Январь | 0,90 | 0,49 | 0,73 | 7,26 | 2,00 | 748020 |
| Февраль | 0,87 | 0,74 | 0,79 | 22,87 | 1,75 | 671890 |
| Март | 0,94 | 0,73 | 0,78 | 29,42 | 1,70 | 1326726 |

| | | | | | | |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------|-----------------|
| Апрель | 0,66 | 0,92 | 0,62 | 24,75 | 1,76 | 1414341 |
| Май | 0,44 | 0,86 | 0,45 | -2,66 | 2,05 | 975468 |
| Июнь | 0,46 | 1,00 | 0,45 | 6,54 | 2,02 | 1185161 |
| Июль | 0,60 | 0,19 | 0,56 | -20,83 | 1,94 | 1847148 |
| Август | 0,62 | 0,11 | 0,55 | -26,86 | 1,98 | 1603795 |
| Сентябрь | 0,91 | 0,04 | 0,68 | -6,83 | 1,69 | 2376925 |
| Октябрь | 0,84 | 0,08 | 0,70 | -11,68 | 1,80 | 709214 |
| Ноябрь | 0,99 | 0,14 | 0,81 | -1,27 | 1,85 | 591365 |
| Декабрь | 1,00 | 0,18 | 0,82 | 4,58 | 1,86 | 346011 |
| Весь год | 0,94 | 0,09 | 0,71 | -0,38 | 1,86 | 13796064 |

В разделе 4.3 описано временное сопряжение данных разных датчиков цвета океана и выявление на этой основе межгодовой и многодекадной изменчивости ПКВ (см. рис. 6).

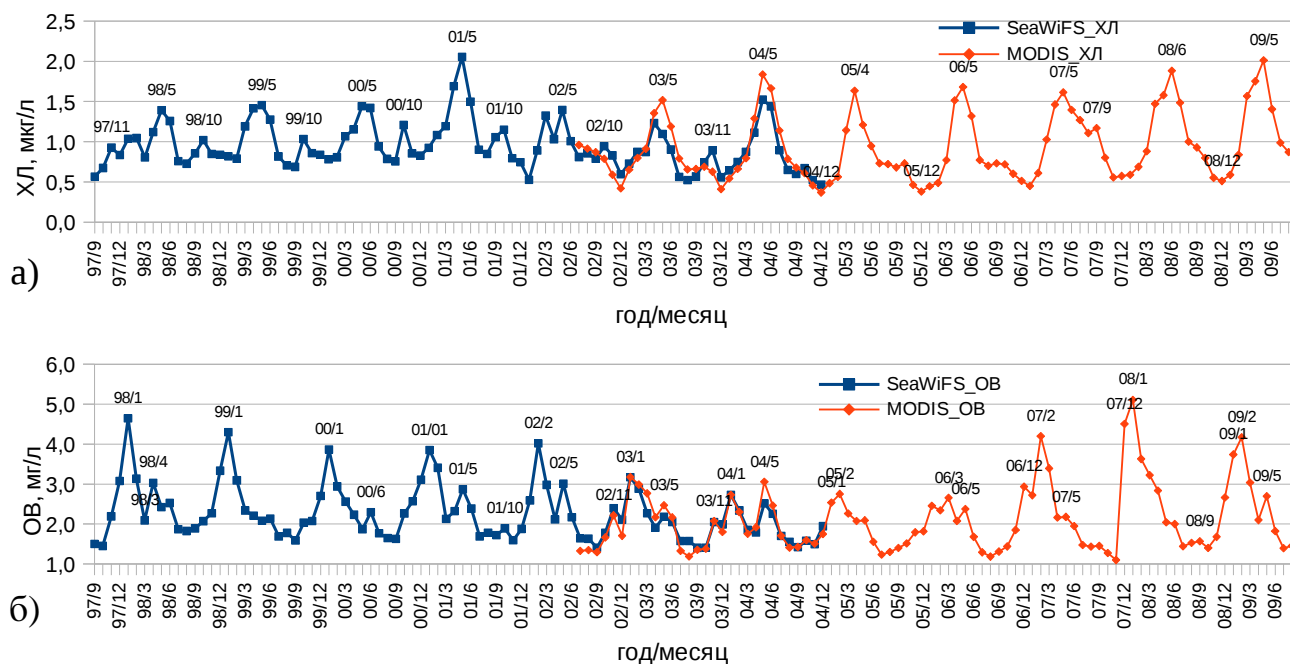


Рисунок 6. Два частично перекрывающихся временных ряда среднемесячных концентраций ХЛ в мкг/л (а) и ОВ в мг/л (б), восстановленных с помощью НС-алгоритма по данным SeaWiFS (1997-2004 гг) и MODIS (2002-2009 гг), осреднённым по всей шельфовой зоне БЗ.

С применением биооптического алгоритма оценки площади цветения кокколитофоров, отдельно была оценена площадь цветений в северной и центральной частях БЗ (пример для центральной части см. на рис. 7).

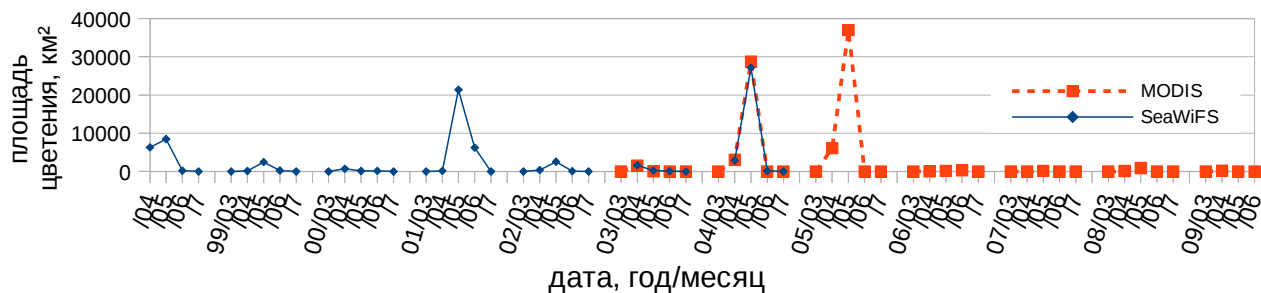


Рисунок 7. Момент возникновения и площадь цветения *E. huxleyi* в центральной части БЗ. Данные SeaWiFS и MODIS.

В главе 5 описано синергетическое совмещение данных о характеристиках природных вод с различных спутниковых датчиков для анализа выявленной изменчивости ПКВ.

В разделе 5.1 А) проанализирована внутригодовая изменчивость ПКВ в прибрежной зоне БЗ с использованием совмещённых данных SeaWiFS-MODIS по среднемесячным концентрациям ХЛ и ОВ в шельфовой зоне за период 1997-2009 гг. Б) С помощью алгоритма идентификации цветения вредоносной водоросли *L. chlorophorum* (рис. 8), проанализирована пространственно-временная динамика этих цветений и возможные факторы, влияющие на развитие этих цветений.

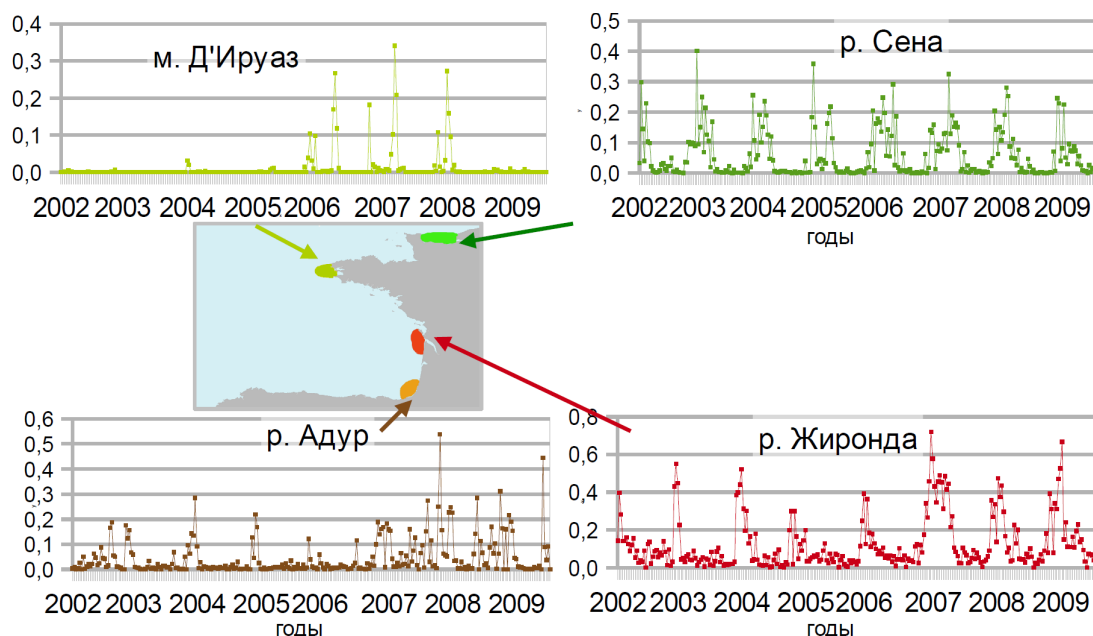


Рисунок 8. Хронология цветения *L. chlorophorum* в различных прибрежных акваториях БЗ и в районе пролива Дерут, моря Д'Ируаз и эстуария реки Сена. На вертикальной оси - относительная площадь области, занятой цветением.

В разделе 5.2 с применением соответствующих разработанных алгоритмов (глава 3) рассмотрена временная изменчивость цветений *E. huxleyi*. Основываясь на том, что известно об экологии *E. huxleyi* (Balch, 1991; Holligan *et al.*, 1993), для исследования межгодовой изменчивости в пелагиальной зоне БЗ было рассмотрено влияние облачности, ТПО, силы приводного ветра, поверхностных течений и поступления клеток кокколитофоров из других районов Мирового океана на возникновение цветений в центральной части БЗ, а также сделаны выводы о влиянии наиболее значимых факторов.

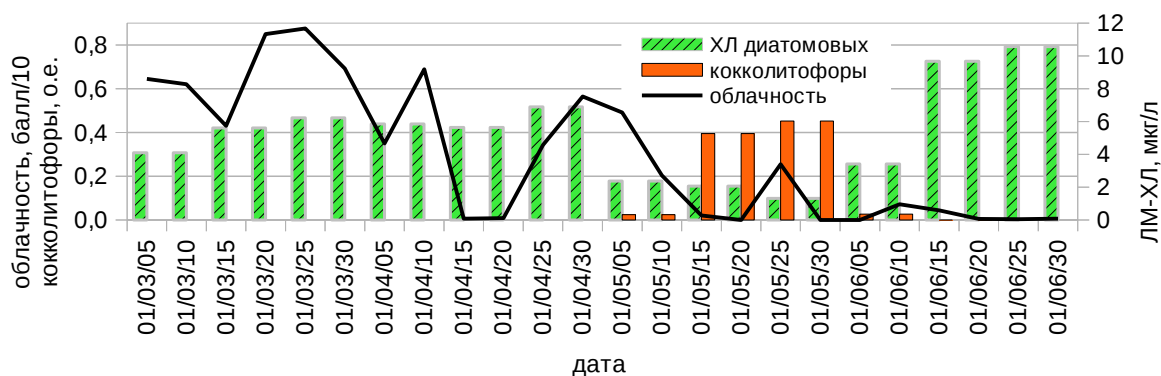


Рисунок 9. Центральная часть БЗ, 2001 год: временной ряд значений облачности (черная линия), относительной площади цветения *E. huxleyi* (столбики с заливкой) и концентрации ХЛ диатомовых водорослей (столбики со штриховкой).

Основные результаты и выводы

1. Разработан наиболее точный на данный момент оперативный алгоритм восстановления концентраций ХЛ фитопланктона и минеральной взвеси по космическим данным в видимом диапазоне электромагнитного спектра для сложных в гидрооптическом отношении вод БЗ.

2. Произведено объединение данных датчиков SeaWiFS и MODIS для составления и изучения временного ряда данных ХЛ и ОБ большой продолжительности (13 лет).

3. Разработаны оперативные высокоточные алгоритмы идентификации вредоносных цветений водорослей *L. chlorophorum* и *E. huxleyi*.

4. На основе объединения данных датчиков CZCS, AVHRR, SeaWiFS и MODIS воссоздан и изучен временной ряд данных по цветению *E. huxleyi* общей продолжительностью 30 лет.

5. Благодаря разработанным методикам извлечения из спутниковых данных информации о внутриводных процессах установлены и интерпретированы закономерности а) пространственно-временной динамики развития фитопланктона, в том числе, вредоносной водоросли *L. chlorophorum* в шельфовой зоне БЗ и б) временной динамики цветения кокколитофора *E. huxleyi* в пелагиальной зоне БЗ.

Исследование БЗ с использованием разработанных алгоритмов показало эффективность их эффективность как перспективного инструмента детального изучения внутриводных процессов, который обеспечивает объективную оценку параметров процессов протекающих в природных водах. Разработанные методики объединения данных с различных датчиков цвета вод позволили с одной стороны, получить ряды данных превосходящие по продолжительности время жизни одного датчика и расширить возможности анализа, а с другой, показали необходимость учёта особенностей различных датчиков даже при значительной схожести их характеристик. Такой подход комплексного анализа данных видимого диапазона с помощью набора алгоритмов восстановления различных параметров качества вод и спутниковых данных из других диапазонов электро-магнитного спектра, позволил выявить особенности особенностей временных вариаций развития фитопланктонного сообщества: это периоды с высокими (1998 – 2001) и низкими концентрациями ХЛ и ОВ в 2002 – 2006 гг.) и случаи возникновения прибрежных апвеллингов в шельфовых водах БЗ, выявить различия в цветении микроводорослей *L. chlorophorum* и *E. huxleyi* в отдельных районах БЗ и временной сделать обоснованные предположения и факторах влияющих на частоту и момент возникновения этих цветений.

Существенно, что разработанные алгоритмы и методики являются неспецифичными для конкретного региона и могут быть применены для многих районов Мирового океана.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

- 1) Morozov E. Space-borne study of seasonal, multi-year, and decadal phytoplankton dynamics in the Bay of Biscay / E. Morozov, D. Pozdnyakov, T. Smyth, V. Sychev, H. Grassl // International Journal of Remote Sensing. – 2013. – Vol. 34:4. – P. 1297–1331.

- 2) Морозов Е.А. Автоматическое распознавание и оконтуривание областей цветения *Lepidodinium Chlorophorum* по данным сканирующей аппаратуры / Е.А. Морозов, О.В. Анискина, Д.В. Поздняков, Л.Х. Петтерссон, В.И. Сычёв, Х. Грассль // Исследование Земли из космоса. – 2011. – № 2. – С. 49-59.
- 3) Morozov E. A new area-specific bio-optical algorithm for the Bay of Biscay and assessment of its potential for SeaWiFS and MODIS/Aqua data merging / E. Morozov, A. Korosov, D. Pozdnyakov, L. Pettersson, V. Sychev // Int. J. of Remote Sensing. – 2010. – Vol. 31: 24. – P. 6541 – 6565.
- 4) Морозов Е.А. Наблюдения из космоса многолетней пространственной динамики биохимических переменных в Бискайском заливе / Е.А. Морозов, Д.В. Поздняков, В.И. Сычёв // Учёные записки Российского Государственного Гидрометеорологического Университета. – 2010. – № 14. – С. 147–161.
- 5) Коросов А.А. Идентификация и картирование ареалов цветения кокколитофоров в Бискайском заливе / Коросов А.А., Морозов Е.А., Поздняков Д.В., Петтерссон Л.Х., Грассль Х. // Исследование Земли из космоса. – 2009. – № 3. – С. 67–78.

Публикации в других научных изданиях:

- 6) Морозов Е. А. Исследование сезонной и межгодовой изменчивости био-геохимических процессов в Бискайском заливе по спутниковым данным / Е. А. Морозов, Д. В. Поздняков // 64-я конференция профессоров, преподавателей и научных работников, С-ПбГУ, Санкт-Петербург, Россия, 25 янв. – 5 февр. 2011.
- 7) Morozov E. MODIS reveals green dinoflagellate bloom in the English Channel and the Bay of Biscay: identification algorithm and spatio-temporal analyses of the phenomenon / E. Morozov, O. Aniskina, D. Pozdnyakov, L. Pettersson, // Oceans From Space : Proceedings of symposium, Venice, Italy, 26-30 Apr. 2010. – P. 175-176.
- 8) Pozdnyakov, D. Observations of multi-year spatial dynamics of biochemical variables in the Bay of Biscay from space / Pozdnyakov, D., Morozov, Eu., Pettersson, L., Sychev, V., // ESA Living Planet Symposium : Proceedings, Bergen, Norway, 28 June – 2 July 2010.

- 9) Морозов Е.А. Наблюдения по данным датчиков цвета океана многолетних и сезонных изменений некоторых показателей состояния экосистемы Бискайского залива / Е.А. Морозов, Д.В. Поздняков, А.А. Коросов, В.И. Сычёв // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : докл. Всероссийск. конф., Москва, Россия, 15 – 19 ноя. 2010. – С. 206-207.
- 10) Pozdnyakov D. Seasonal dynamics of the phenomenon of massive coccolithophore blooms across the Bay of Biscay as revealed from space / D. Pozdnyakov, A. Korosov, E. Morozov, L. Pettersson // ISRSE-33 : Proceedings, Italy, Stresa, 4 – 8 May 2009.
- 11) Морозов Е. О совместимости данных датчиков SeaWiFS, MODIS и MERIS по водам типа 2 на примере Бискайского залива / Е. Морозов, А. Коросов, Д. Поздняков, В. Сычёв // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : докл. Всероссийск. конф., Москва, Россия, 16 – 20 ноя. 2009.
- 12) Морозов Е. К вопросу о совместимости данных SeaWIFS, MODIS и MERIS о цвете океана на примере акватории Бискайского залива / Е. Морозов, А. Коросов, Д. Поздняков // Международный симпозиум по атмосферной радиации и динамике (МСАРД-2009) : тез. докл., С.-Петербург-Петергоф, Россия, 22 – 26 июня, 2009.
- 13) Морозов Е.А., Восстановление параметров качества воды в Бискайском заливе с использованием различных гидрооптических моделей / Морозов Е.А., Коросов А.А., Поздняков Д.В. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : докл. Всероссийск. конф., Москва, Россия, 10 – 14 ноя. 2008.
- 14) Коросов А.А. Применение нейронных сетей для обработки данных датчиков SeaWiFS и MODIS по Бискайскому заливу / А.А. Коросов, Е.А. Морозов, Д.В. Поздняков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : докл. Всероссийск. конф., Москва, Россия, 10 – 14 ноя. 2008.