

На правах рукописи

КОРОСОВ АНТОН АНДРЕЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕДУРЫ
КОМПЛЕКСНОГО ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ
ВНУТРИВОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В МОРЯХ И
КРУПНЫХ ОЗЕРАХ

Специальность: 25.00.28 – океанология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург 2007

Работа выполнена в Международном центре по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
проф. Поздняков Дмитрий Викторович

Официальные оппоненты: доктор технических наук
Бузников А.А.;

кандидат физико-математических наук
Сычев В.И.

Ведущая организация: Институт водных проблем Севера
Российской Академии Наук

Защита состоится 22 мая 2007 в 12:00 на заседании диссертационного совета
Д 212.197.02 при Российском Государственном Гидрометеорологическом
Университете по адресу:

195196, Россия, Санкт-Петербург, Малоохтинский проспект 98.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского
Государственного Гидрометеорологического Университета

Автореферат разослан 20 апреля 2007

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор географических наук,

проф. Воробьев В.Н.

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Исследование Мирового Океана и внутренних водоемов средствами дистанционного зондирования (ДЗ) приобретает в последние десятилетия все большее значение. Спутниковые данные используются для исследования всего спектра внутриводных процессов: от локальных экологических процессов (антропогенного загрязнения, эвтрофирования, развития токсических водорослей и др.) до проявлений глобального изменения климата в гидросфере. Круг дистанционно определяемых параметров океана расширяется, увеличивается качество спутниковых данных, что обеспечивает информацию о свойствах водной среды с существенно большим временным и пространственным разрешением и охватом.

Существует ряд проблем, ограничивающих возможности эффективного применения данных ДЗ в океанологических исследованиях. Одна из проблем зондирования водной поверхности в *видимом* диапазоне заключается в отсутствии универсальных алгоритмов восстановления искомым параметров по спутниковым данным. Стандартные алгоритмы, разработанные ведущими космическими агентствами, предназначены только для исследования открытого океана и позволяют восстанавливать лишь один параметр – концентрацию хлорофилла фитопланктона. Состав прибрежных и внутренних вод является более сложным, поэтому информация только о хлорофилле оказывается недостаточной для характеристики состояния таких водоемов и происходящих в них процессов. Кроме того, оптические свойства растворенных и взвешенных в воде веществ специфичны для конкретных прибрежных и внутренних водоемов. Существует необходимость разработки алгоритмов, которые одновременно восстанавливают концентрации нескольких основных цветообразующих веществ, представленных в водном столбе, и пригодны для обработки спутниковых данных по водоемам с различными оптическими свойствами.

Вторая проблема зондирования в видимом и инфракрасном (ИК) диапазонах связана с влиянием облачности и неточной коррекцией влияния атмосферы, которые уменьшают объем спутниковой информации и снижают качество космических данных. Общая практика состоит либо в использовании единичных безоблачных снимков для получения мгновенной картины распределения того или иного параметра, либо в расчете усредненного изображения по серии последовательных (и, возможно, нерегулярных) снимков водной поверхности частично экранированной облаками. Для адекватного изучения *динамики* внутриводных процессов необходимы алгоритмы обработки серий космических снимков для получения непрерывных временных рядов спутниковых данных, что требует разработки новых методических

подходов и программных продуктов.

Наконец, при изучении интересующего явления зачастую используются данные лишь одного типа спутникового датчика (например, оптического спектрометра для изучения качества природных вод). Учитывая тесную взаимосвязь внутриводных процессов, при дистанционном зондировании природных вод целесообразно привлекать дополнительную информацию (в частности, данные о температуре поверхности воды по данным ИК-съемки), что существенно расширяет аналитические возможности метода ДЗ и позволяет избегать ошибок в интерпретации данных.

Цель исследования: Разработать методику комплексного анализа данных дистанционного зондирования в видимом и ИК диапазонах и применить ее для изучения внутриводных процессов в Белом море и Ладожском озере.

При этом решались следующие **задачи:**

1. Разработать оперативный алгоритм одновременного восстановления концентраций хлорофилла фитопланктона, минеральной взвеси и растворенного органического вещества (алгоритм восстановления параметров качества воды) по космическим снимкам в видимом диапазоне и оценить его точность.

2. Решить проблему уменьшения объема спутниковых данных, обусловленную экранированием облаками водной поверхности, путем реконструкции полей распределений искомым параметров высокого временного и пространственного разрешения с помощью процедуры временной интерполяции.

3. Разработать методику комплексного анализа спутниковых данных видимого и ИК диапазона, данных численного моделирования и контактных данных, которая основана на алгоритме восстановления параметров качества воды и процедуре временной интерполяции.

4. С помощью разработанной методики комплексного ДЗ изучить сезонную и межгодовую динамику внутриводных процессов в:

А) Ладожском озере как представителе пресноводного водоема со сложной структурой гидрооптических свойств, находящемся в переходном экологическом состоянии;

Б) Белом море как представителе Арктических морей, отличающемся спецификой термогидродинамических процессов и находящемся в зоне отчетливой климатической нестационарности.

Научная новизна. Автором впервые разработана процедура сопряжения нейронной сети и процедуры многомерной оптимизации, которая реализована в едином алгоритме одновременного восстановления концентраций трех основных цветообразующих компонент по данным дистанционного зондирования в видимом диапазоне.

Проблема снижения объема спутниковых данных за счет экранирования

облачным покровом впервые решена с использованием процедуры временной интерполяции.

С помощью разработанных алгоритмов создана база данных ранее недоступной спутниковой информации высокого временного и пространственного разрешения о современном состоянии экосистем Белого моря и Ладожского озера.

По спутниковым данным впервые получена детальная картина прохождения термического бара в Ладожском озере, рассчитан суммарный тепловой поток на границе вода-воздух и изучено влияние термического режима на гидробиохимические процессы.

Впервые получены сезонные карты распределений параметров качества воды и температуры водной поверхности в Белом море и визуализирована их зависимость от стока рек и циркуляции. Впервые дана количественная оценка изменения параметров качества воды в Белом море за семилетний период.

Теоретическая и практическая значимость. Усовершенствование метода многомерной оптимизации Левенберга – Марквардта за счет сопряжения с методом нейронных сетей привело к созданию алгоритма решения обратных задач с широкой областью применения, не ограниченной приложениями дистанционного зондирования. Его использование позволит с большей точностью и гораздо быстрее восстанавливать концентрации цветообразующих компонент, а также решать и другие обратные задачи, в которых фактор скорости получения результатов имеет приоритетное значение при заданных требованиях к точности.

Создание базы данных спутниковой информации открывает возможность как углубленного исследования морских и озерных процессов, их взаимосвязи и зависимости от внешних факторов, так и долговременного мониторинга экологического состояния указанных водных объектов.

На основе разработанных алгоритмов создан пакет программ для оперативного мониторинга зон активного развития фитопланктона в Северном море в рамках программы Европейского космического агентства «Морские и прибрежные экологические информационные системы» (ESA “Marine & Coastal Environmental Information Services”).

Разработанные алгоритмы могут в дальнейшем применяться для выявления зон повышенной биологической продуктивности для промысловых целей, а также для мониторинга экологического состояния водоемов и качества вод для целей водоснабжения.

Апробация работы. Результаты работы обсуждались на следующих конференциях: EURISY Summer School for Ph.D. students on Oceanography, Vigo, Spain, 24–29 June 2003; International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toulouse, France, 21–25 July 2003; II International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters”, St.-Petersburg, Russia, 8–12

September 2003; The 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Hawaii, Honolulu, 10–14 November 2003; International symposium "Atmospheric radiation" (MSAR – 2004), St.-Petersburg, Russia, 22–25 June 2004; Workshop on Sustainable Use, Management and Development of Lake Ladoga Basin, University of Joensuu, Joensuu, Finland, 10–13 July 2004; IX international conference «The study, sustainable use and conservation of natural resources of the White Sea», KRC, Petrozavodsk, Russia, 11–14 October 2004; Собрание «Русского географического общества», Санкт-Петербург, 15 апреля 2005 г.; The 8th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments, Halifax, Nova Scotia, 17–19 May 2005; 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment, St-Petersburg, Russia, 20–24 June 2005; "Helmholtz EOS Summer school", Helgoland, Germany, 24–28 July 2006; «Водные ресурсы Европейского Севера: итоги и перспективы исследований», юбилейная конференция посвященная 15-летию ИВПС, 19 сентября 2006; "Arctic frontiers" Tromso, Norway, 21–26 January 2007; GEO workshop on "Remote Sensing of Inland and Marine Coastal Waters", Switzerland, 27–29 march 2007.

Публикации. По теме работы опубликовано 25 печатных работ, из которых 7 – статьи в ведущих рецензируемых журналах по данной тематике, 1 – учебное пособие.

Личный вклад автора. Автор работы самостоятельно выполнил все этапы исследования: постановку задачи, планирование научных исследований, обработку данных и теоретическое обобщение полученных результатов. Автор обеспечивал компьютерную обработку использовавшихся спутниковых данных и разработку компьютерных программ, реализующих алгоритм восстановления параметров качества воды и анализа временных рядов космических снимков. Автор лично принимал участие в практической реализации и внедрении разработанного алгоритма восстановления параметров качества вод Северного моря. Все основные результаты, которые представлены в диссертации, получены непосредственно автором.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, 4 глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 195 страниц; содержит 53 иллюстрации, 11 таблиц. Список литературы включает 145 библиографических ссылок, из них 120 работ из зарубежных изданий.

Автор выражает глубокую признательность и искреннюю благодарность научному руководителю д. ф.-м. н., проф. Д.В. Позднякову за помощь в проведении исследований, обсуждении и анализе результатов. Диссертант благодарит к.г.н. проф. В.В. Ионова зав. каф. «Океанология» на фак. Географии и геоэкологии СПбГУ, где автор проходил обучение в аспирантуре. Автор благодарен директору научного фонда «Нансен-Центр» к. ф.-м. н. Л.П. Бобылеву, директору Центра по окружающей среде и дистанционному зондированию им. Нансена проф. О.М. Йоханнессону, г-ну Л.Х. Петтерссону

(NERSC, Берген, Норвегия), проф. Х. Грасслу (ZMAW, Гамбург, Германия), а также доктору Р. Дорфферу (GKSS, Гамбург, Германия). Автор отмечает поддержку фонда INTAS в рамках гранта “INTAS YS 04-83-3533”. Автор благодарен Коросову А.В. и Калинкиной Н.М. за моральную поддержку и помощь при работе над текстом диссертации.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* обоснована актуальность темы и проанализирована изученность вопроса, 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* рассматривается постановка прямой задачи дистанционного зондирования водной поверхности в видимом и ИК диапазонах спектра.

Решение прямой задачи ДЗ в *видимом* диапазоне используется при решении обратной задачи, то есть в алгоритме восстановления параметра качества воды по спутниковым данным. В нашем случае решение прямой задачи сводится к нахождению спектральной зависимости коэффициента отражения для дистанционного зондирования в водной среде $R_{rsw}(I, -0)$ от концентраций компонентов водной среды и их оптических свойств. Использование коэффициента $R_{rsw}(I, -0)$ обусловлено тем, что он связан с определяемой по дистанционным данным яркостью водной поверхности $L_w(I, +0, q_v, j_v, I)$:

$$R_{rsw}(-0, I, q_0, j) = T_{surf} L_w(+0, q_v, j_v, I) / E_d(+0, I), \quad (1)$$

где T_{surf} – фактор ослабления солнечного света при прохождении через раздел вода – воздух, $E_d(+0, I)$ – освещенность водной поверхности, q_0 – солнечный зенитный угол, j – угол визирования водной поверхности спутниковым датчиком.

Оптические свойства естественных водоемов определяются наличием в водной среде растворенных и взвешенных веществ, живых организмов, пузырьков газов и микротурбулентных неоднородностей. К основным цветообразующим компонентам (ЦОК) относят воду как таковую, хлорофилл фитопланктона (*хл*), минеральную взвесь (*мв*) и растворенное органическое вещество (*ров*). Первичные гидрооптические характеристики (коэффициенты поглощения a , обратного рассеяния b_b и др.), являются свертками оптических свойств ЦОК и обладают свойствами аддитивности. Если ввести удельные, т.е. отнесенные к единице концентрации C_i , первичные гидрооптические характеристики (ПГХ) – a_i^* , b_b^* , то

$$a = \sum_i^I C_i a_i^*; b_b = \sum_i^I C_i b_b^*; i = 1, 2, \dots, I, \quad (2)$$

где i – индекс ЦОК.

Совокупность спектральных значений коэффициентов a^* и b_b^* для основных цветообразующих компонент характерных для некоторого водоема составляет гидрооптическую модель этого водоема.

Коэффициент отражения для дистанционного зондирования в водной среде $R_{rsw}(-0, I, q_0, j)$ является вторичной гидрооптической характеристикой, которая характеризует не только оптические свойства водной среды, но и свойства поля яркости света, распространяющегося в водной среде. Коэффициент $R_{rsw}(I, -0)$ определяется на горизонте сразу под поверхностью воды. Исследования методом Монте-Карло показали, что зависимость $R_{rsw}(I, -0)$ от солнечного зенитного угла (q_0) и угла визирования водной поверхности спутниковым датчиком (j) проявляется слабо, а зависимость этого коэффициента от ПГХ для широкого диапазона условий освещения и визирования гладкой водной поверхности, может быть параметризована следующим образом:

$$R_{rsw}(-0, I) = -0.00036 + 0.110(b_b(I)/a(I)) - 0.0447(b_b(I)/a(I))^2. \quad (3)$$

Таким образом, при наличии гидрооптической модели (т.е. спектральных сечений коэффициентов a и b_b для каждого компонента водной среды) появляется возможность рассчитать спектральные значения R_{rsw} для любого набора концентраций ЦОК.

В *разделе 1.2* рассматривается постановка прямой задачи дистанционного зондирования водной поверхности в ИК диапазоне, которая сводится к установлению зависимости интенсивности электромагнитного излучения от температуры поверхности воды и ее излучательной способности.

В *главе 2* рассматриваются характеристики современных спутниковых датчиков видимого и ИК диапазонов, данные которых использовались в работе.

В *разделе 2.1.* описываются современные пути решения обратной задачи дистанционного зондирования в видимом диапазоне. Показано, что стандартные алгоритмы обработки спутниковых данных ведущих космических агентств (NASA, ESA) неприменимы при исследовании прибрежных вод и внутренних водоемов в силу их оптической сложности, что вынуждает разрабатывать в этих целях более сложные алгоритмы.

В *разделе 2.2.* обобщены методы расчета температуры поверхности воды и рассмотрены факторы, уменьшающие точность расчетов. На основе данных подспутниковых измерений показано, что значения температуры поверхности (T_{II}) вод Белого моря, рассчитанные по спутниковым данным с помощью стандартных алгоритмов, отличаются от данных синхронных контактных наблюдений в среднем на 5%, что позволяет использовать стандартные алгоритмы NOAA при обработке данных дистанционного зондирования в ИК диапазоне для исследования акваторий Белого моря и Ладожского озера.

В *главе 3* описаны созданные нами алгоритмы обработки спутниковых данных.

В *разделе 3.1.* дается описание метода многомерной оптимизации Левенберга–Марквардта (ЛМ) и метода нейронных сетей (НС), которые использованы в оперативном алгоритме восстановления параметров качества

воды.

В рамках метода ЛМ мы оперируем следующими величинами: $R_{rsw}(\lambda, C, a, b_b)$ – значение коэффициента отражения для дистанционного зондирования непосредственно под поверхностью воды на длине волны I_j , рассчитанного по формулам параметризации (2–3) для заданных значений вектора концентраций $C = (C_{xл}, C_{мв}, C_{пов})$ 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 I_j .

Оптимальный вектор концентрации C достигается при поиске абсолютного минимума функции невязки $f(C)$:

$$f(C) = \sum_j g_j^2(C), \quad (4)$$

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

$$g_j = [S_j - R_{rsw}(\lambda_j, C, a, b_b)]. \quad (5)$$

При поиске оптимального вектора концентрации C используется следующая итерационная формула:

$$C_{k+1} = C_k + I_k (F_k^t F_k + \mu_k D_k)^{-1} F_k R_{rsw}(C_k), \quad (6)$$

где k – номер шага итерации, $F_k = \sqrt{|R_{rsw}|} |C_k|$ – 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 процедуры оптимизации.

С целью уменьшения вероятности получения неадекватного результата, метод многомерной оптимизации отыскивает минимум функции невязки для нескольких стартовых векторов концентраций C_0 , что существенно увеличивает время расчетов. В качестве окончательного решения задачи принимается тот вектор концентраций C , который дает наименьшее из полученных минимальных значений функции невязки.

Нейронная сеть представляет собой совокупность нейронов, аксонов и сигналов. Сигнал в нашем случае – это число, которое передается от одного нейрона к другому, а нейрон – сигмоидная функция, трансформирующая входной сигнал в выходной. Связь между двумя нейронами, представляющая аксон, численно задается как вес сигнала. На начальном этапе НС тренируется для настройки весов входных сигналов каждого нейрона.

В разработанном нами алгоритме количество нейронов во входном слое было выбрано равным числу спектральных каналов спутникового датчика; в первом внутреннем слое было 18 нейронов, во втором внутреннем слое – 6 нейронов; выходной слой содержал 3 нейрона по числу искомым ЦОК. Для настройки сети, которая восстанавливает вектор концентраций, был создан тренировочный массив данных, состоящий из 2000 векторов концентраций ЦОК C и соответствующих им спектров R_{rsw} , рассчитанных по формулам (2–3)

и с применением гидрооптических моделей, разработанных для ряда мезотрофных водоемов.

В *разделе 3.1.3.* зависимость точности и скорости работы алгоритмов ЛМ и НС от наличия шума во входных данных, от величины искомых концентраций, от выбора функции невязки и от архитектуры сети исследуется в ходе численных экспериментов. Был создан массив из 360000 векторов концентраций x_l , m_v и p_{ov} , которые были равномерно распределены случайным образом в следующих диапазонах: $C_{x_l} = 0-50$ мкг/л, $C_{m_v} = 0-20$ мг/л и $C_{p_{ov}} = 0-20$ мгС/л. С помощью соотношения (2) и параметризации (3) по векторам концентраций ЦОК были рассчитаны спектральные значения коэффициента отражения для дистанционного зондирования под поверхностью воды R_{rsw} для 6 длин волн: 412, 443, 490, 510, 590, 670 нм (положение каналов SeaWiFS). Для расчета значений $R_{rsw}(\lambda)$ была использована гидрооптическая модель Ладожского оз., которое является типичным представителем мезо-олиготрофного внутреннего водоема со сложными гидрооптическими свойствами. Имитация измеренного коэффициента отражения для дистанционного зондирования S производилась путем добавления шума к значениям R_{rsw} по следующей формуле:

$$S = (1 + \nu \rho) R_{rsw}, \quad (7)$$

где ρ – случайное число в диапазоне $-1:1$, ν – уровень добавляемого шума. В наших экспериментах в модельные данные добавлялся шум на уровнях 0, 5, 10 и 15%, что соответствует среднему уровню шумов обусловленных неточной атмосферной коррекцией данных дистанционного зондирования видимого диапазона.

Спектральные значения S подавались на вход процедуры многомерной оптимизации или нейронных сетей для восстановления вектора концентраций C . Разница между модельными (C_m) и восстановленными (C_e) концентрациями использовалась для расчета абсолютной (e_a) и относительной (e_o) точности алгоритма:

$$e_a = C_m - C_e, \quad (8)$$

$$e_o = \frac{C_m - C_e}{C_m + C_e}. \quad (9)$$

При обработке модельных данных с нулевым шумом ошибка восстановления концентраций ЦОК алгоритмом ЛМ зависит только от ошибки компьютерных вычислений и составляет 0.1%. При таких же условиях точность нейронных сетей меньше: для значений C_{x_l} , C_{m_v} и $C_{p_{ov}}$ в диапазонах от 0 до 5 мкг/л, мг/л и мгС/л соответственно, ошибка восстановления составляет $50 \pm 30\%$, а для более широкого диапазона C_{x_l} , C_{m_v} и $C_{p_{ov}}$ (от 5 до 25 соответствующих единиц) – $14 \pm 3\%$. При добавлении 15-процентного шума точность алгоритма ЛМ и, особенно, алгоритма НС падает. Многомерная оптимизация при этом работает с 15% ошибкой, а нейронные сети для

широкого диапазона концентраций дают ошибку $40\pm 15\%$. При добавлении шума, интенсивность которого растет с уменьшением I , ошибка восстановления увеличивается в 2–3 раза.

Наша реализация алгоритма НС, предназначенная для оценки концентраций ЦОК в широком диапазоне ($0 < C_{chl} < 50$ мкг/л, $0 < C_{mv} < 30$ мг/л, $0 < C_{rov} < 30$ мг/л), дает наибольшую относительную погрешность при восстановлении малых значений C_{chl} в диапазоне 0–5 мкг/л. Была создана «специализированная» узкодиапазонная сеть, которая обучалась для диапазона C_{chl} 0–5 мкг/л, при этом два другие вещества варьируют в широких пределах. Точность такой сети в 3–5 раз выше, чем широкодиапазонной.

Оценка скорости работы разработанных нами алгоритмов ЛМ и НС в ряде численных экспериментов показала, что алгоритму ЛМ для достижения значения $f(C) = 10^{-8}$ ср⁻², при котором обеспечивается точность восстановления на уровне 5%, необходимо менее 100 итераций и достаточно 400 стартовых векторов C_0 . Время обработки одного вектора S при этом составляет 0.07 ± 0.04 сек (процессор Intel Pentium 2.7 ГГц). Скорость работы нейронной сети практически не зависит от ее архитектуры или «специализации» и составляет десятитысячные доли секунды на один спектр S .

3.1.4. Комбинированный алгоритм. С целью объединения более высокой точности и устойчивости алгоритма ЛМ ко входному шуму с высокой скоростью работы алгоритма НС был создан комбинированный био-оптический алгоритм одновременного восстановления концентраций хлорофилла, минеральной взвеси и растворенной органики. В комбинированном алгоритме на первом этапе применяется нейронная сеть, которая с высокой скоростью позволяет получить приблизительную оценку вектора концентраций $C_{НС} = \{C_{chl}, C_{mv}, C_{rov}\}$ с точностью 30%, что позволяет сузить диапазон дальнейшего поиска до $\pm 0.3 C_{НС}$. На втором этапе итеративный поиск искомого вектора концентраций с большей точностью производится процедурой Левенберга–Марквардта в суженном диапазоне. Как показывают наши численные эксперименты, в комбинации с НС алгоритму ЛМ для достижения искомой точности восстановления необходимо только 15 стартовых значений C_0 , что увеличивает скорость восстановления в 25 раз.

Дополнительной инновацией является снабжение комбинированного алгоритма двумя блоками оценки качества входных спутниковых данных, в основу которых положены результаты численного решения прямой задачи ДЗ, рассмотренной в разделе 1.1. Функция первого блока состоит в выявлении аномалий спектрального распределения R_{rsw} , вызванных неточной атмосферной коррекцией. Описываемый блок алгоритма анализирует спектральный ход кривой первой производной $R_{rsw}(\lambda)$ и помечает спектры R_{rsw} с провалом в синей области и отрицательные значения R_{rsw} в голубой области как не отвечающие

оптическим свойствам вод типа 2 и, следовательно, непригодные к использованию.

Функция второго блока алгоритма состоит в поиске пикселей, для которых используемая гидрооптическая модель является явно неприменимой. Такая ситуация может возникнуть, если в зондируемом столбе воды содержатся ЦОК, спектральные сечения поглощения и рассеяния которых не описываются используемой моделью. Если после оптимизации значение функции невязки $f(C)$ превышает 10^{-5} ср^{-2} , такие пиксели не используются.

Использование этих двух блоков приводит к уменьшению общего объема доступной спутниковой информации на 10–20%, тем не менее, качество получаемых данных в среднем оказывается существенно выше.

3.1.5. Проверка работоспособности алгоритма по данным *in situ* измерений. Точность восстановления $C_{хл}$, $C_{мв}$ и $C_{ров}$ при помощи разработанного нами комбинированного алгоритма была проверена при сравнении концентраций ЦОК, измеренных в ходе экспедиций в Белом море (Онежский залив), Финском заливе (восточная часть), оз. Мичиган (восточная прибрежная зона) и оз. Эри. и рассчитанных по синхронным спутниковым данным с датчиков SeaWiFS (Sea Viewing Wide Field Sensor) или MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer).

Непосредственно измеренные и восстановленные по спутниковым данным концентрации ЦОК для указанных акваторий в целом хорошо согласуются (рис. 1). Корреляция между измеренными и восстановленными значениями ЦОК составляет $R = 0.84$ для $хл$, 0.63 для $мв$ и 0.74 для $ров$. Средняя относительная ошибка $C_{хл} < 2$ мкг/л составляет $50 \pm 30\%$, а для бóльших значений $C_{хл} - 20 \pm 17\%$. Абсолютная ошибка при восстановлении малых значений $C_{хл}$ в среднем не превышает 1.5 мкг/л, а при восстановлении больших концентраций достигает 4 мкг/л. При восстановлении значений $C_{мв}$ в диапазоне 0.5–10 мг/л и $C_{ров}$ – от 10 до 40 мгС/л средняя относительная ошибка составляет $30 \pm 20\%$, а абсолютная – 0.1 мг/л для $мв$ и 1.8 мгС/л для $ров$. При расчете меньших концентраций средняя относительная ошибка достигает $50 \pm 25\%$, а значения абсолютной ошибки составляют 1.5 мг/л для $мв$ и 8 мгС/л для $ров$.

Некоторые сравниваемые пары концентраций резко выделяются тем, что измеренное значение значительно отличается от рассчитанного, при этом ошибка восстановления может достигать до 100% (рис. 1). Существует несколько причин таких отклонений. Во-первых, пространственное разрешение контактных и дистанционных методов различаются на порядки. Во-вторых, для использованных данных время отбора пробы не совпадает абсолютно точно со временем пролета спутника, следовательно, гидрооптическая ситуация за время отставания измерения могла измениться. В-третьих, неизбежны погрешности, связанные с процедурой отбора проб и последующим лабораторным определением концентраций веществ, которые могут достигать 30%. В-четвертых, низкая точность атмосферной коррекции спутниковых данных при зондировании внутренних водоемов и прибрежных морских зон. В-

пятых, отсутствие гидрооптических моделей, разработанных для конкретных зондируемых акваторий.

Учитывая результаты численных экспериментов и проверок по судовым данным, мы даем следующие оценки точности нашего алгоритма при обработке реальных космических снимков:

- при восстановлении концентраций хлорофилла, минеральной взвеси и растворенной органики в диапазонах 0–3 мкг/л, 0–1 мг/л и 0–5 мгС/л, ошибка не превышает 100%;
- при восстановлении ЦОК в диапазонах 3–30 мкг/л, 1–20 мг/л и 5–40 мгС/л, ошибка не превышает 50%.

Приведенные оценки являются результатом усреднения по данным двух спутников и ряда водоемов отличающихся по своим гидрооптическим свойствам. Таким образом, разработанный нами алгоритм пригоден для обработки данных с разных спутников «цвета океана» по разным водным объектам, при условии наличия адекватной гидрооптической модели.

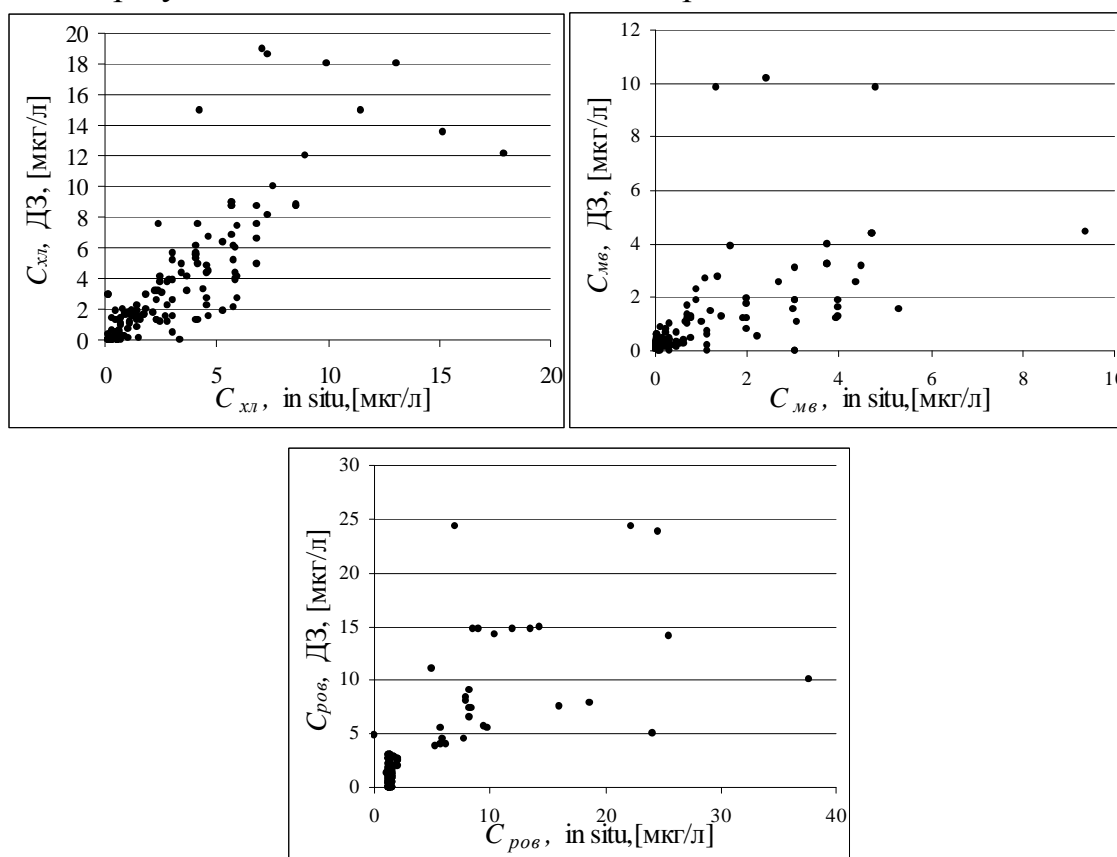


Рис. 1. Сравнение концентраций *chl*, *mv* и *rov*, измеренных *in situ* и восстановленных по соответствующим значениям $R_{rsw}(\lambda)$ по данным ДЗ ряда акваторий, перечисленных в тексте

Для обработки космических снимков комбинированный алгоритм был реализован на языке C++ в виде программы *boreali* (**B**io-**O**ptical **R**etrieval **A**Lgorithm), которая читает исходные спутниковые снимки в формате HDF, проводит геометрическую коррекцию снимков, восстанавливает концентрации ЦОК в каждом пригодном пикселе снимка и сохраняет результаты восстановления в бинарных файлах.

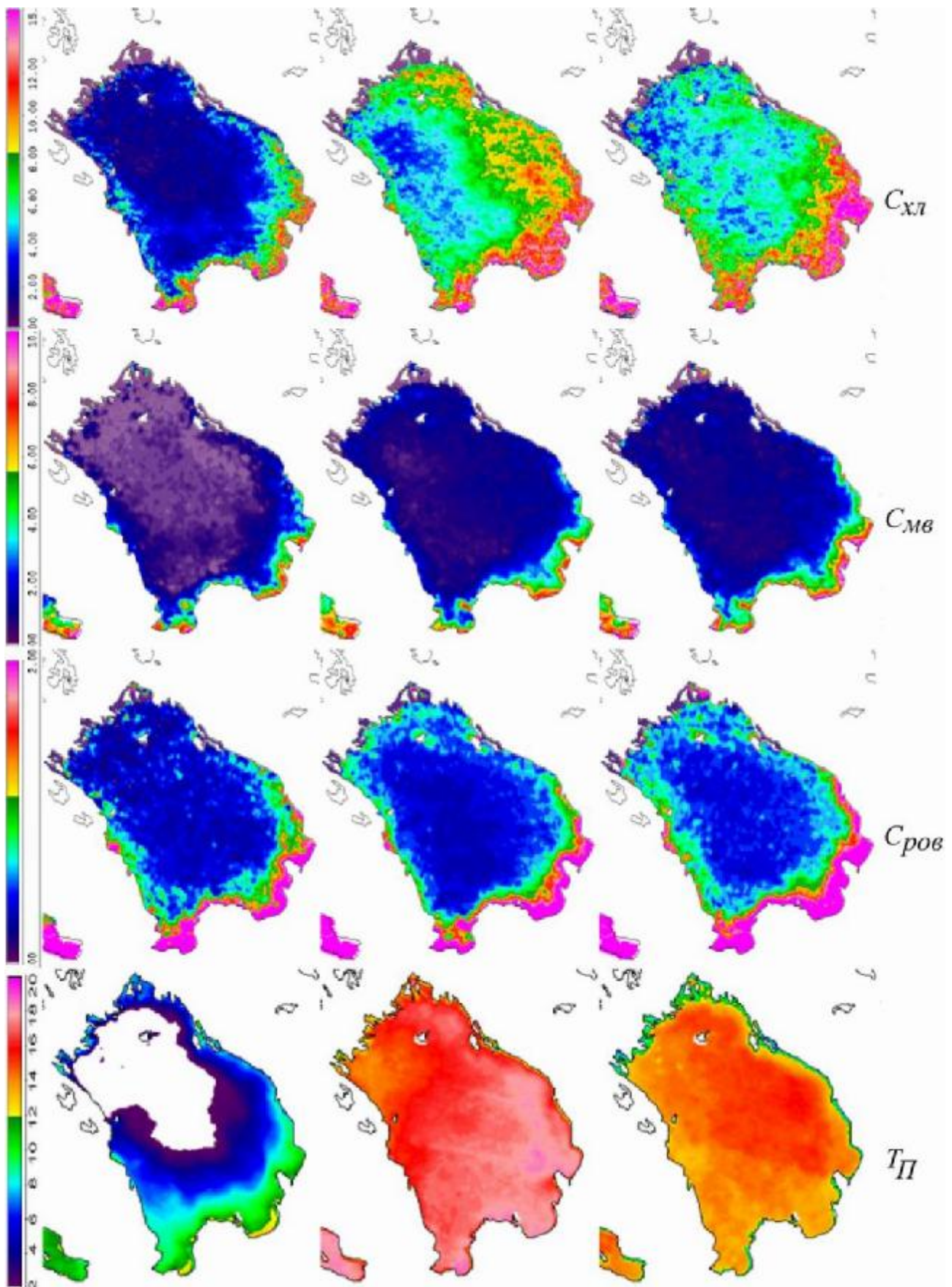


Рис. 2, (цветная вставка). Пространственные распределения C_{xl} (мкг/л), C_{rov} (мгС/л), C_{mv} (мг/л) и $T_{П}$ (z , °С) полученные процедурой интерполяции на несколько дат: 25 июня, 10 августа и 10 сентября.

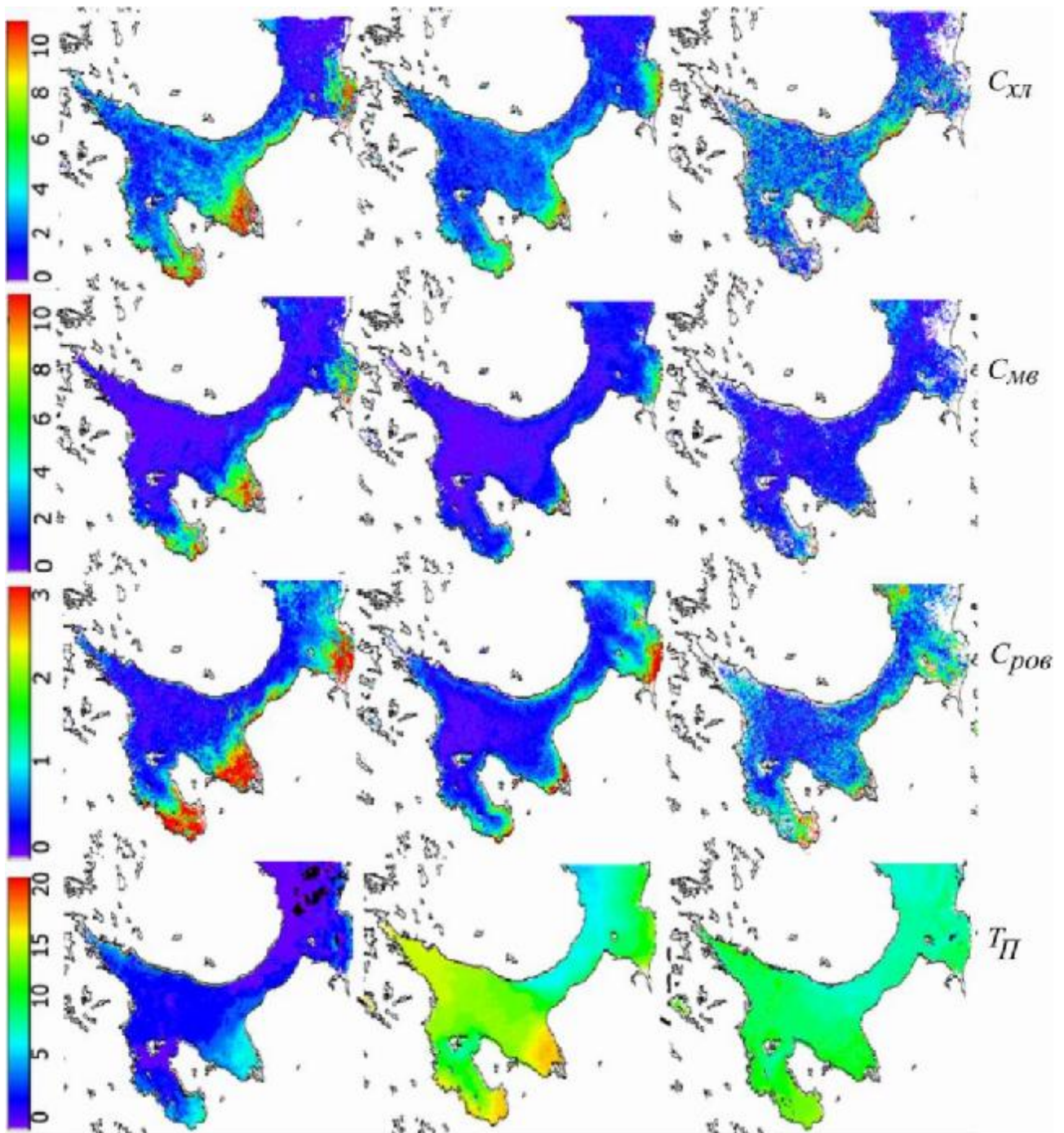


Рис. 5, (цветная вставка). Усредненные за период (1998–2004 гг.) среднемесячные распределения C_{chl} (мкг/л), C_{rov} (мгС/л), C_{mv} (мг/л) и T_{II} (г, °С) по акватории Белого моря за три месяца вегетационного периода: май, июль, сентябрь, полученные по спутниковым данным.

Раздел 3.2. посвящен методам обработки серий космических снимков для решения проблемы снижения качества и объема спутниковых данных за счет экранирования водной поверхности облаками. Предложено два способа решения этой проблемы.

В рамках первого способа для получения непрерывных распределений концентраций ЦОК и T_{II} по акватории изучаемого водного объекта в каждом пикселе находились их среднемесячные значения, при этом использовались все космические снимки, полученные в этот месяц над исследуемым объектом.

Для получения дистанционных данных высокого разрешения по пространству (от 0.1 до 10 км) и по времени (от 1 до 20 дней) впервые была применена процедура временной интерполяции. В ее рамках акватория водного объекта равномерно разбивается на ячейки размером 1x1 км. В каждой ячейке i поведение исследуемой переменной $y_i(t)$ описывается функцией вида:

$$y_i(t) = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j t^j \quad (10)$$

где t – время, a_0, a_j – коэффициенты полинома и n – степень полинома. Коэффициенты уравнения (10) рассчитываются по данным со всех космических снимков SeaWiFS (данные 1998–2004 гг.) или MODIS (данные 2002–2004 гг.), сделанных над объектами нашего исследования за весь период мониторинга. При расчете коэффициентов a_j в некоторой ячейке i используются данные только тех пикселей, которые находятся на расстоянии меньше 2 км от ее центра.

Установленная таким образом функция позволяет рассчитать значение переменной $y_i(t)$ в ячейке i любой момент времени, в нашем случае – с 1 мая по 31 сентября. Совокупность функций во всех ячейках позволяет строить ежедневные поля распределения $y(t)$ по всей акватории изучаемого водного объекта. Процедура интерполяции была полностью автоматизирована и реализована в виде программы на языке C++.

Для изучения межгодовых изменений экосистем Белого моря и Ладожского озера акватории водных объектов разделялась на несколько участков по их характерным свойствам (батиметрия, водные массы, гидрологический режим и др.) согласно классической схеме районирования этих водоемов. Для каждого из таких участков с использованием всех доступных спутниковых данных с помощью разработанного нами алгоритма был рассчитан тренд изменения интересующих нас параметров (например, концентрации ЦОК или T_{II}). По уравнению тренда рассчитывались значения концентраций в первый и в последний годы наблюдений и определялась относительная разность между этими показателями. Такой подход к оценке многолетних изменений применим только в том случае, если уравнение регрессии найденного тренда оказывается статистически значимым, то есть

межгодовая изменчивость оказывается мала по сравнению с многолетним изменением, что было подтверждено для исследованных нами объектов.

В *разделе 3.3.* рассмотрены источники дополнительных метеорологических и спутниковых данных по Белому морю и Ладожскому озеру находящиеся в свободном доступе в сети Интернет.

В *разделе 3.4.* предложена общая схема методики комплексного анализа данных дистанционного зондирования, которая обеспечивает комбинированный анализ спутниковых данных видимого и ИК диапазона, данных численного моделирования и контактных данных, что расширяет аналитические возможности спутниковых методов и приводит к адекватной интерпретации данных космического наблюдения.

В *главе 4* исследуются биотические и абиотические процессы в Ладожском озере и Белом море с использованием разработанной процедуры комплексного дистанционного зондирования.

В *разделе 4.1.* дается общая характеристика Ладожского озера: расположение, рельеф дна, гидрологический и термический режим, термический бар, химический состав вод и сезонная сукцессия фитопланктона.

Далее в этом разделе представлены результаты анализа спутниковых данных по Ладожскому озеру. С помощью созданных нами алгоритмов было обработано более 2500 космических снимков озера, сделанных в весенне-летне-осенний период с 1998 по 2004 годы датчиками SeaWiFS, MODIS и AVHRR. По спутниковым данным рассчитаны поля T_{II} и концентраций *хл*, *мв*, *ров* на каждые пять суток вегетационного периода (рис. 2, цветная вставка).

По термическим картам полученным по спутниковым данным определена последовательность положений линий фронта термобара (рис. 3). Ранней весной он находится у южной границы озера. При прогревании положение фронта определяется батиметрией озера, скорость продвижения, рассчитанная нами по спутниковым данным, составляет 1 км/сутки. К середине лета, когда фронт термобара перемещается в центральную, более глубоководную часть, скорость его прохождения увеличивается до 1.5–5 км/сутки, при этом зависимость расположения линий термобара от батиметрии снижается.

По термическим картам полученным по спутниковым данным с использованием модели прогрева озера (Zilitinkevich, 1993) нами рассчитаны значения суммарного теплового потока на границе раздела вода-воздух, который обеспечивает наблюдаемое прогревание водоема (рис. 4). Оценка суммарного теплового потока показала, что он составляет 250 ± 70 Вт/м², из которых примерно две трети приходится на поток солнечной радиации, а одна треть – на горизонтальный тепловой поток из теплоактивной в теплоинертную область.

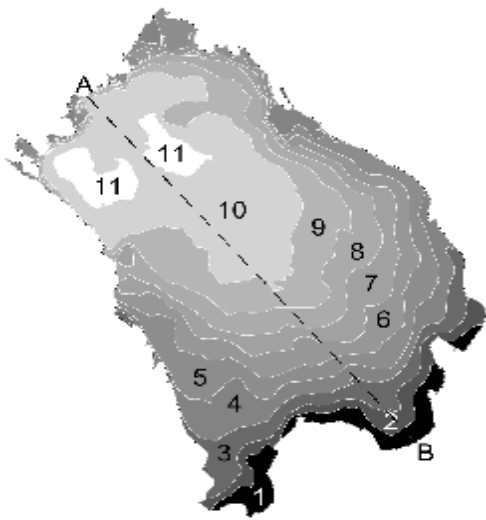


Рис. 3. Временная последовательность положения термобара на акватории Ладожского озера. Цифрам соответствуют следующие временные интервалы: 1 – 1 мая, 2 – 5 мая, 3 – 10 мая, 4 – 15 мая, 5 – 20 мая, 6 – 25 мая, 7 – 1 июня, 8 – 5 июня, 9 – 10 июня, 10 – 15 июня, 11 – 20 июня.

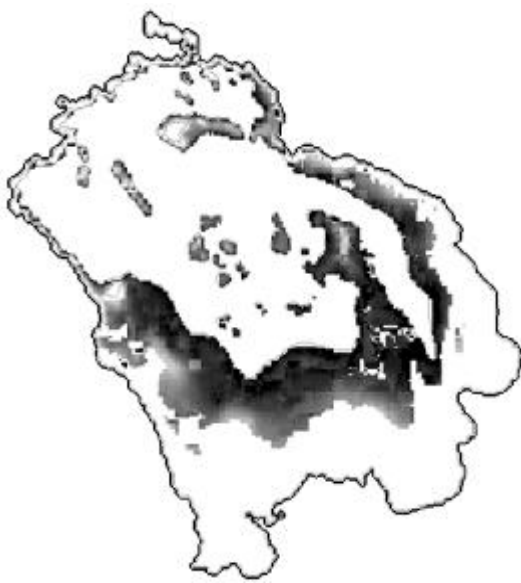


Рис. 4. Суммарный тепловой поток ($\text{Вт}/\text{м}^2$) на границе вода–воздух, рассчитанный по данным ИК зондирования, полученным весной 1998 г. Черной линией обозначены береговая черта Ладожского озера и изобата 50 м. Белым цветом обозначены ячейки акватории Ладожского озера с глубиной больше 50 м, экранированные облачностью или в которых погрешность расчета скорости нагревания превышала 10%.

Полученные нами спутниковые данные указывают на то, что межгодовые отличия термического режим озера вызваны прежде всего вариациями в режиме облачного покрова, что отчетливо выявляется при сравнении динамики нагревания водоема и облачности при анализе данных за 2001 г. и данных, осредненных за период 1998–2004 гг. Июнь 2001 г. был более облачным, чем в любой другой год этого периода. В результате, нагревание вод на южном мелководье до температур 18–20 °С происходит на две недели позже. Однако июль 2001 г. оказался наиболее безоблачным месяцем за весь период наблюдений. В результате, воды в центральной части озера нагрелись в среднем больше на 1–2 °С и оставались теплыми дольше на две недели, чем в среднем за семилетний период.

Совместный анализ спутниковых данных видимого и ИК диапазона позволил выявить основные черты пространственно-временного распределения фитопланктона. Максимальные концентрации хл (15–20 мкг/л) наблюдаются в южной прибрежной части озера в течение всего вегетационного периода (рис. 2, цветная вставка). Развитие микроводорослей в центральной части озера

весной ограничено фронтом термобара. По мере его продвижения на север к середине июня в центральной части озера C_{chl} увеличиваются до 5–6 мкг/л. При дальнейшем прогревании к середине июля в восточно-центральной части озера возникает зона интенсивного развития фитопланктона до уровня $C_{chl} = 15$ мкг/л. Постепенно эта зона смещается на север вдоль восточного берега, где этот пик развития заканчивается в середине сентября.

Поля концентраций mv и rov , восстановленные по данным видимого диапазона (рис. 2, цветная вставка), иллюстрируют зависимость этих показателей от гидрологического режима. Весной, в период половодья, в эстуариях впадающих рек C_{mv} достигает 5 мг/л, а C_{rov} 10 мгС/л. В более глубоководной части озера их значения составляют всего 0.5 мг/л и 2 мгС/л. В середине лета концентрации в эстуариях рек C_{mv} уменьшается до 2 мг/л, а C_{rov} – до 5 мгС/л.

Исследования Ладожского озера дистанционными методами показывают, что созданная база данных спутниковой информации высокого разрешения о современном состоянии экосистемы водоема, эффективна как при углубленном исследовании озерных процессов, для долговременного мониторинга экологического состояния указанных водных объектов, так и для верификации термогидродинамических и экологических моделей.

В **разделе 4.2.** дается характеристика Белого моря: описывается его расположение, рельеф дна, гидрологический и термический режим, течения и фронты, климат, химический состав вод.

Далее в этом разделе представлены результаты анализа спутниковых данных по Белому морю. С помощью разработанных алгоритмов было обработано более 2500 космических снимков сделанных в весенне-летне-осенний период с 1998 по 2004 годы датчиками SeaWiFS, MODIS и AVHRR. По спутниковым данным рассчитаны поля T_{II} и концентраций chl , mv , rov на каждые пять суток вегетационного периода, а также среднемесячные распределения этих параметров (рис. 5, цветная вставка).

Для комплексной интерпретации дистанционных данных и установления причинно-следственной связи между гидродинамическими и биотическими процессами и их проявлениями на поверхности мы использовали данные расчетов по численной трехмерной модели (разработка И.А. Неелова и О.П. Савчука, 2005). Модель имитирует термогидродинамические и биохимические морские процессы, использует исторические данные по речному стоку, приливным течениям, обмену водными массами с Баренцевым морем и атмосферным условиям. Гидробиологический блок описывает жизненный цикл основных групп фитопланктона и зоопланктона, их трофическую связь. Используемые результаты численного моделирования представлены в виде карт течений, температуры и солености, биогенных веществ, биомассы фитопланктона на разных горизонтах в Белом море.

Была проведена проверка согласованности модельных и спутниковых полей T_{II} , а также полей C_{chl} и биомассы фитопланктона. Это было предпринято, во-первых, для оценки возможности совместного использования дистанционных и модельных данных, а, во-вторых, для калибровки и валидации экологической модели в рамках перспективной задачи ассимиляции спутниковых данных. Качественное сравнение полей T_{II} и полей C_{chl} и биомассы фитопланктона, восстановленных по спутниковым и модельным данным на 15 июня, показало высокую степень пространственной согласованности как гидрофизических, так и гидробиологических показателей. Количественное сравнение показало высокую степень корреляции временных рядов C_{chl} и биомассы фитопланктона ($R = 0.8-0.95$) и временных рядов модельной и спутниковой T_{II} ($R = 0.78-0.99$).

Эффективность комплексного анализа спутниковых и модельных данных можно проиллюстрировать на примере изучения биотических и абиотических процессов, протекающих в море в мае. В этом месяце максимального уровня достигает первичная продукция, что можно определить по спутниковым данным (концентрации chl достигают 10 ± 2 мкг/л, рис. 5, цветная вставка), что и предсказывается моделью (в верхних слоях воды биомасса фитопланктона достигает максимального значения 50 мгN/м^3 , рис. 6). Это обусловлено как достаточно высоким уровнем солнечной радиации, так и весенним половодьем. Спутниковые данные показывают, что максимальный за год речной сток выносит с относительно теплыми речными водами ($T_{II} = 6 \pm 1$ °C, рис. 5, цветная вставка) в больших количествах взвешенные минеральные вещества ($C_{mv} = 8 \pm 1$ мг/л, рис. 5, цветная вставка) и растворенные органические вещества ($C_{pov} = 2.7 \pm 0.3$ мгC/л, рис. 5, цветная вставка).

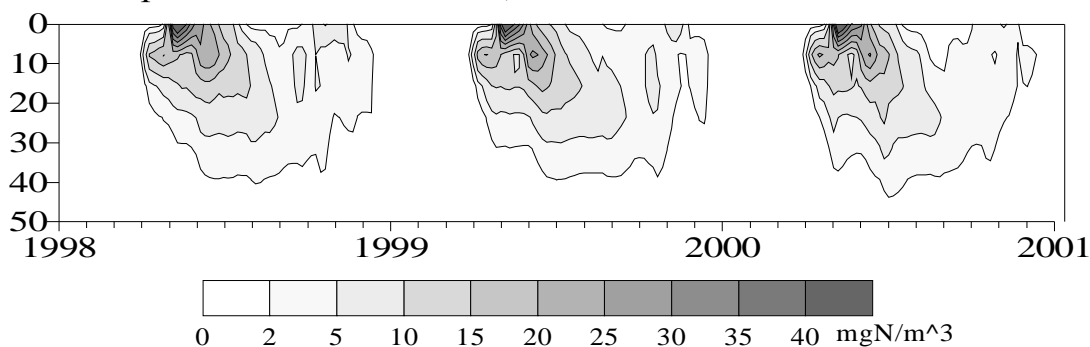


Рис. 6. Изоплеты средних распределений биомассы фитопланктона по глубине в Двинском заливе. Величина биомассы фитопланктона рассчитана по гидродинамической модели с биохимическим блоком. По оси X отложены годы, по оси Y – глубина (в метрах).

Как предсказывает гидродинамическая модель, сток рек приводит к образованию на внешней границе заливов термогалинных фронтов с градиентами солёности до 0.6 ‰/км (рис. 7) и T_{II} до 0.3 °C/км (рис. 8).

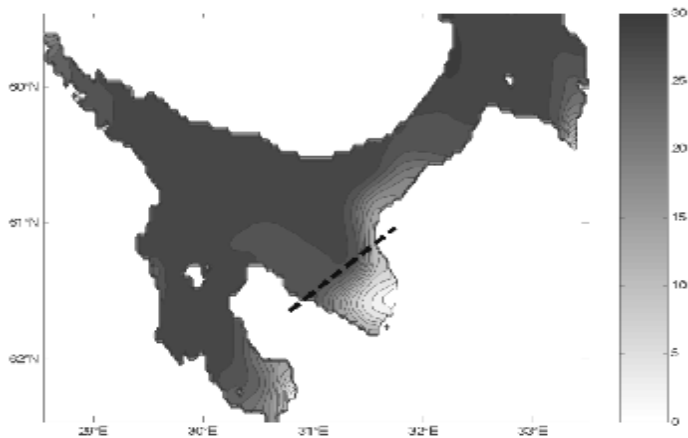


Рис. 7. Распределение S (‰) вод в поверхностном слое Белого моря в мае, рассчитанное по гидродинамической модели. Здесь и далее на рис. 7–9 по осям X и Y отложены градусы западной долготы и северной широты, а пунктирной линией указано положение фронта, выделяемого по спутниковым данным видимого и ИК диапазонов.

Фронты выступают в роли так называемых «маргинальных фильтров» (А.П. Лисицын, 1994) и ограничивают распространение минеральных и взвешенных веществ из залива в Бассейн. Это позволяет идентифицировать точное фактическое расположение фронта по спутниковым данным по высоким градиентам C_{mv} ($0.25 \text{ мг/л км}^{-1}$) и C_{rov} ($0.12 \text{ мгС/л км}^{-1}$). Зона резкого снижения концентраций mv и rov совпадают с областью высоких градиентов T_{II} (0.3 °C/км), определенных по спутниковым данным.

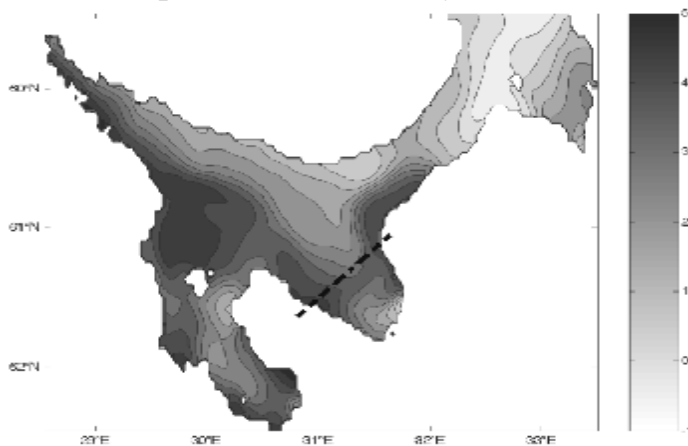


Рис. 8. Распределение T_{II} ($^{\circ}\text{C}$) вод Белого моря в мае, рассчитанное с помощью модели.

Сток Северной Двины формирует интенсивное стоковое течение Тихонова со скоростями до $40\text{--}50 \text{ см/с}$ (рис. 9), которое выносит речные воды в Горло образуя вдоль южного берега область пониженной солености (рис. 7) и повышенных концентраций mv , rov и xl (рис. 5, цветная вставка).

Точное совпадение расположения фронтальных зон определенных по спутниковым и модельным данным говорит об эффективности комплексного подхода: в то время как по данным ДЗ мы судим о фактическом расположении фронта, модель в деталях выявляет внутриводные процессы, которые привели к его появлению.

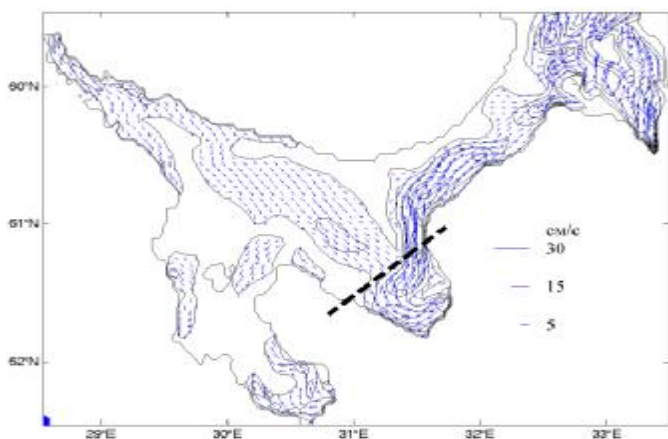


Рис. 9. Поверхностные течения в Белом море в мае, рассчитанные по гидродинамической модели.

В разделе 4.2.3. межгодовые изменения концентраций ЦОК в разных районах моря были исследованы в связи с проблемой глобального потепления, которое отчетливо проявляется в этом регионе: за последние 7 лет среднегодовая температура воздуха увеличилась на 2.1 °С, это привело к увеличению T_{II} и уменьшению площади льдов, к увеличению осадков, особенно в зимне-весенний период, на 8%.

С помощью разработанного метода анализа многолетних спутниковых данных нами впервые выявлено, что в заливах за семилетний период (1998–2004 гг.) наблюдается увеличение концентраций *mv* и *rov* на 10–18 %, что связано со средним увеличением весеннего стока рек, обусловленного увеличением уровня осадков. В свою очередь, это привело к уменьшению прозрачности воды, увеличению ее мутности. Связанные с этим изменения трофических взаимодействий и ухудшение условий фотосинтеза в заливах крупных рек повлекло за собой и уменьшение концентраций *xl* на 7–20%. Межгодовые отличия проявляются в меньшей степени в Бассейне или Горле из-за меньшего влияния речного стока.

Основные результаты и выводы

1. Разработан оперативный алгоритм одновременного восстановления концентраций хлорофилла фитопланктона, минеральной взвеси и растворенного органического вещества по космическим снимкам в видимом диапазоне для сложных в гидрооптическом отношении природных вод. Относительная погрешность восстановления концентраций цвето-образующих компонент в продуктивных мезотрофных водоемах, оцененная в численных экспериментах и на реальных данных, составляет 50%, что гораздо выше точности стандартных алгоритмов при обработке спутниковых данных по Белому морю и Ладожскому озеру.

2. Разработан способ объективной оценки качества входных данных по уровню шума и аномалиям, обусловленным неточной атмосферной коррекцией и неполной адекватностью используемой гидрооптической модели. Это позволяет отсеивать данные с шумом, превышающим уровень 15%, хотя и

сокращает общий объем полезной спутниковой информации на 10–20%.

3. Разработан алгоритм обработки многолетних рядов спутниковых данных с целью реконструкции серий космических снимков высокого временного разрешения. Его применение при обработке многолетних серий космических снимков Ладожского озера и Белого моря показало высокую эффективность при решении проблемы снижения объема спутниковой информации, связанной с экранирующим влиянием облачного покрова. Адекватность реконструированных снимков подтверждена с помощью статистических методов.

4. Разработана методика комплексного дистанционного зондирования, объединяющая в себе алгоритм восстановления параметров качества воды и алгоритм обработки временных рядов космических снимков. Ее применение обеспечивает комбинированный анализ спутниковых данных видимого и инфракрасного диапазона, данных численного моделирования и контактных данных.

Исследование Ладожского озера и Белого моря показало эффективность разработанной методики как перспективного способа детального изучения внутриводных процессов, который обеспечивает наиболее объективную оценку параметров процессов протекающих в морях и крупных озерах. Именно такой подход комплексного анализа спутниковых данных ИК и видимого диапазона, модельных и контактных данных позволяет проследить динамику поверхностных проявлений внутриводных процессов и устанавливать механизмы их возникновения, развития и взаимодействия.

5. С помощью процедуры комплексного ДЗ было количественно исследовано весеннее прогревание Ладожского озера: оценена скорость продвижения термобара, рассчитаны компоненты теплового баланса озера, и зависимость межгодовой динамики термического режима от метеорологических условий. Использование комплексного подхода выявило с недоступной ранее детализацией, влияние термогидродинамических процессов (прежде всего термобара) на динамику биогеохимических процессов.

6. С помощью процедуры комплексного ДЗ наглядно проиллюстрировано, что изменения некоторых гидрохимических, гидробиологических и гидрофизических характеристик вод Белого моря зависят от стока рек и гидродинамики моря. Анализ многолетних спутниковых данных показал, что экосистема шельфовых арктических морей с большим речным стоком быстро реагирует на глобальное потепление за счет снижения прозрачности вод и ухудшения светового климата в водной среде.

7. С помощью разработанных алгоритмов создана база данных ранее недоступной спутниковой информации высокого временного и пространственного разрешения о современном состоянии экосистем Белого моря и Ладожского озера. Наши исследования показывают, что созданная база

эффективна как при углубленном исследовании озерных и морских процессов, так и для долговременного мониторинга экологического состояния указанных водных объектов. В тоже время эта база данных представляет исключительный интерес для калибровки и валидации термогидродинамических и экологических моделей в рамках перспективной задачи ассимиляции спутниковых данных.

Список работ по теме диссертации (жирным шрифтом выделены работы опубликованные в научных журналах из обязательного перечня ВАК):

1. Коросов А.А., Оценка изменчивости земного покрова по данным дистанционного зондирования // Сохранение биоразнообразия Фенноскандии. Материалы международной конференции. – Петрозаводск: Изд-во Карельского НЦ РАН, 2000. – С. 49–50.
2. Коросов А.А. Географические инструменты и методы интерпретации спутниковых данных // Водная среда Карелии: исследования, использование и охрана. Петрозаводск: Изд-во Карельского НЦ РАН, 2003. – С. 121–125.
3. Durand D., Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., Folkestad A., Pettersson L., An Advanced Case-II water algorithm for a simultaneous retrieval of water quality and bottom depth in optically shallow aquatic environments: numerical experiments and applications // Proceeding of the II International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters”. – St.-Petersburg, 2003. – P. 89.
4. Pozdnyakov D. V., Korosov A. A., and Pettersson L. H., Advanced bio-optical algorithm for case II waters: underpinning methodology, facility assessment, validation and realization exemplifications // Proceeding of the 30th International Symposium on Remote Sensing of Environment. – Honolulu, Hawaii, 2003 . – CDROM.
5. Pozdnyakov D., Korosov A., Shuchman R., Edson R., Development of a tool for the assessment of water quality from visible satellite imagery taken over turbid inland waters (with Lake Michigan as an example) // Proceeding of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Toulouse, France, 2003. – Pp. 25–25.
6. Korosov A.A., Filatov N.N., Mazurov A.A., Pozdnyakov D.V. Joint research of spatial distribution of water surface temperature and water quality parameters in Lake Ladoga on the basis of multi-year satellite data in the visible and IR // International symposium “Atmospheric radiation” (MSAR – 2004). – St.Petersburg, 2004. – P. 105.
7. Korosov A.A., Pozdnyakov D.V., Pettersson L., New enhanced bio-optical algorithm for satellite systems of World Ocean research // International symposium “Atmospheric radiation”. – St.Petersburg, 2004. – P. 106.
8. Korosov A.A., Pozdnyakov D.V., Remotely sensed spatial distributions of Lake Ladoga water quality: methodology and pilot results // Workshop on Sustainable Use, Management and Development of Lake Ladoga Basin /

Eds. Markku Viljanen and Larisa Shirenko. – Joensuu, Finland: University of Joensuu, 2004. – Pp. 26–30.

9. Korosov A.A., Pozdnyakov D.V., Evaluation of the current state and modification trends of the White Sea primary production from remote sensing data for the last five years: methods and pilot results // Proceeding of the IX international conference «The study, sustainable use and conservation of natural resources of the White Sea». – Petrozavodsk: PIN, 2004. – Pp. 11–14.
- 10. Поздняков Д.В., Коросов А.А., Петтерссон Л.Х., Ионов В.В., Новый операционный алгоритм восстановления параметров качества природных вод по данным спутникового зондирования // Исслед. Земли из космоса. – 2005. – № 4. – С. 17–29.**
11. Pozdnyakov D.V., Korosov A.A., Grassl H., Pettersson L., An advanced algorithm for operational retrieval of water quality from satellite data in the visible // Int. J. Rem. Sens. 2005. – Vol. 26, No. 12. – Pp. 2669–2688 [DOI: 10.1080/01431160500044697].
12. Korosov A.A., Pozdnyakov D.V., Filatov N.N., Neelov I.A., Savchuk A.B., Johannesen O.M., Petterson L.H., Realization of a dedicated synergistic study of the White Sea based on spaceborne, shipborne and ecological modeling means // Proceeding of the 8th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments. – Halifax, CA, 2005. – Pp. 17–19.
13. Pozdnyakov D.V., Shuchman R.A., Means J.C., Korosov A.A., Lake Michigan time series productivity measurements obtained from a new SeaWiFS and MODIS satellite retrieval algorithm means // Proceeding of the 8th International Conference on Remote Sensing for Marine and Coastal Environments. – Halifax, CA, 2005. – Pp. 20–25.
14. Filatov N.N., Johannessen O.M., Korosov A.A., Neelov I.A., Savchouk O.P., Pozdnyakov D.V., Kovalenko V.N., Pettersson L.H., Bobylev L.P., Realization Of A Dedicated Synergistic Study Of The White Sea Based On Spaceborne, Shipborne And Ecological Modeling Means // Proceeding of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. – St. Petersburg, 2005. – CDROM.
15. Folkestad A., Korosov A.A., Sørensen K., Pettersson L.H., Pozdnyakov D.V., An analytical Case 2 water algorithm for the North Sea // Proceeding of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. – St. Petersburg, 2005. – CDROM.
16. Schuchman R.A., Korosov A.A., Pozdnyakov D.V., Means J.C., Savage S., Hatt C., Meadows G.A., SeaWiFS and MODIS-observed Multi-year Seasonal and Spatial Dynamics in Biotic and Abiotic Processes in Lake Michigan as Obtained from a New Water Quality Retrieval Algorithm // Proceeding of the 31st International Symposium on Remote Sensing of Environment. – St. Petersburg, 2005. – CDROM.

17. Pozdnyakov D.V., Korosov A.A., Pettersson L.H., Johannessen O.M., MODIS evidences the river runoff impact on the Kara Sea trophy // *Int. J. Rem. Sens.* – 2005. – Vol. 26, No. 17. – Pp. 3641–3648 [DOI: 10.1080/01431160412331330266].
- 18. Pozdnyakov D.V., Shuchman R.A., Korosov A.A., Hatt C., Operational algorithm for the retrieval of water quality in the Great Lakes // *Rem. Sens. of Environment.* – 2005. – Vol. 97. – Pp. 352–370.**
19. Shuchman R.A., Korosov A.A., Hatt C., Pozdnyakov D.V., Means J., Meadows G., Alterations of the Lake Michigan System / Water Quality: Evidence Provided by the SeaWiFS Seven-Year Time Series of Observations // *J. of Great Lakes Research.* – 2006. – Vol. 32. – Pp. 258–279.
20. Pozdnyakov D.V., Korosov A.A., A new water quality retrieval algorithm for case II waters / *White Sea: Its Marine Environment and Ecosystem Dynamics Influenced by Global Change* / Eds. Filatov, N., Pozdnyakov, D., Johannessen, O.M., Pettersson, L.H., Bobylev, L. P. – Chichester, UK: Springer-Praxis, 2005. – Pp. 181 – 193.
21. Коросов А.В., Коросов А.А., Техника ведения ГИС: приложение в экологии. – Петрозаводск: ПетрГУ, 2006. – 185 с.
- 22. Коросов А.А., Поздняков Д.В., Филатов Н.Н., Мазуров А.А., Лупян Е.А., Грассл Х., Ионов В.В., Изучение сезонной и пространственной изменчивости некоторых экопараметров в Ладожском озере по спутниковым данным // *Исслед. Земли из космоса.* – 2005. – № 5. – С. 76–85.**
23. Коросов А.А., Поздняков Д.В., Филатов Н.Н., Мазуров А.А., Лупян Е.А., Разработка алгоритмов для изучения сезонной и пространственной изменчивости параметров качества вод Ладожского озера по данным дистанционных измерений // *Материалы юбилейной конференции «Водные ресурсы Европейского Севера: итоги и перспективы исследований».* – Петрозаводск, 2006. – С. 78–92.
24. Pozdnyakov D.V., Johannessen O.M., Pettersson L.H., Korosov A.A., Climate-driven dynamics of biochemical fluxes and food web interactions in the Arctic seas strongly influenced by river discharge: a satellite-based case study of the White and Kara Seas // *Proceeding of the “Arctic frontiers” conference.* – Tromso, Norway, 2007. – P. 25.
- 25. Pozdnyakov D.V., Johannessen O.M., Korosov A.A., Pettersson L.H., Grassl H., Miles M.W., Satellite evidence of ecosystem changes in the White Sea: A semi-enclosed arctic marginal shelf sea // *Geophys. Res. Lett.* – 2007. – Vol. 34, No. 8, P. L08117.**