

Организация исследований по оценке экологического состояния морских акваторий средствами дистанционного зондирования

А.И. Алексанин¹, В.А. Качур¹, Т.Ю. Орлова², А.Н. Павлов¹, П.А. Салюк³

¹Институт автоматике и процессов управления ДВО РАН,
690041, Владивосток, Радио 5, e-mail:aleks@satellite.dvo.ru , тел.:(4232)310468

²Институт биологии моря имени А.В. Жирмунского ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Пальчевского 17, тел.: (4232) 310905, e-mail: torlova@imb.dvo.ru

³Тихоокеанский океанологический институт имени Ильичева ДВО РАН
690041, Владивосток, ул.Балтийская, 43, тел. (4232) 31-14-00, e-mail:
pavel.salyuk@gmail.com

Сложность задачи по оценки экологического состояния моря, и, в первую очередь, идентификации и мониторингу вредоносного цветения водорослей привели к необходимости объединения ресурсов и согласования планов проведения исследовательских работ в трех институтах ДВО РАН (Институте биологии моря, Институте автоматике и процессов управления и Тихоокеанском океанологическом институте) на базе оборудования трех центров коллективного пользования (Спутникового мониторинга, Лазерных методов исследования вещества и Мониторинга вредоносного цветения водорослей и биотоксичности акваторий). Существующие возможности позволили организовать комплексные морские экспедиции и лабораторные исследования для решения поставленной проблемы. Приводятся описания применяемых методик и результаты предварительных исследований.

Ключевые слова: вредоносное цветение водорослей, лидарное зондирование атмосферы, спутниковый мониторинг, флюориметрические измерения, видовой состав фитопланктона.

Введение

Контроль экологического состояния морских акваторий является одной из важных задач по обеспечению защиты окружающей среды. Те или иные примеси, попавшие в воду, меняют спектральные характеристики воды, что позволяет контролировать такие события различными приборами. В частности, измерения спектрорадиометрами характеристик излучения воды (в первую очередь коэффициентов поглощения и рассеяния) позволяют контролировать основные примеси, присутствующие в морской воде.

Оценка состояния фитопланктона моря спутниковыми дистанционными методами относится к одной из актуальных задач экологического контроля. Такие явления как массовое цветение микроводорослей (красные приливы) и цветение вредоносных водорослей (водорослей, выделяющих токсины, опасные для рыб, морских животных и человека) ежегодно наносят ущерб прибрежной хозяйственной зоне Дальневосточного региона, исчисляющийся сотнями миллионов долларов (по оценкам японских экспертов). Последняя проблема является одной из наиболее сложных и подразумевает комплексное решение нескольких задач:

- дистанционное зондирование атмосферы для оценки вертикального распределения коэффициентов ослабления и рассеяния солнечного излучения и решения задачи атмосферной коррекции;
- подспутниковые измерения излучения на поверхности моря для расчета коэффициентов отражения и верификация спутниковых соответствующих оценок;
- измерение биооптических характеристик в приповерхностном слое на основе флюориметрических методик;

- выращивание вредоносных водорослей и измерение их спектральных характеристик в лабораторных условиях;
- разработка автоматических средств спутникового мониторинга морских акваторий и распознавание вредоносного цветения по спектральным характеристикам.

Сложность задачи по оценке экологического состояния моря, и, в первую очередь, идентификации и мониторингу вредоносного цветения водорослей (ВЦВ) привели к необходимости объединения ресурсов и согласования планов проведения исследовательских работ в трех институтах ДВО РАН (Институте биологии моря, Институте автоматизации и процессов управления и Тихоокеанском океанологическом институте) на базе оборудования трех центров коллективного пользования (ЦКП Регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН, ЦКП Лазерных методов исследования конденсированных сред, биологических объектов и мониторинга окружающей среды и ЦКП Мониторинга вредоносного цветения водорослей и биотоксичности акваторий).

Спутниковые оценки биопараметров моря

Одним из наиболее проблемных заливов Дальнего востока России с точки зрения экологической обстановки является залив Петра Великого. Для его автоматического регулярного мониторинга в режиме реального времени в Спутниковом центре ДВО РАН созданы средства автоматического приема, обработки и поставки различных параметров воды заинтересованным службам и потребителям со свободным доступом к данным (<ftp://ftp.satellite.dvo.ru/pub/modis>). Средства базируются на обработке информации радиометров MODIS пакетом программ SeaDAS, что позволяет получать около двухсот параметров среды (воды и атмосферы над ней) таких как: коэффициенты диффузного ослабления, концентрация хлорофилла-а, коэффициенты поглощения и рассеивания в 17 спектральных каналах, спектральные характеристики фитопланктона и растворенного органического вещества (РОВ), флюоресценция фитопланктона, эффективность фотосинтеза, температура поверхности воды, параметры атмосферы и др.

Спутниковая информация позволяет находить наиболее интересные объекты исследований для оперативной наводения на них судовой экспедиции. Для этого используются карты температуры поверхности воды, концентрации хлорофилла-а (chl), высоты линии флюоресценции (flh), мутности (коэффициент диффузного ослабления K_{490}), эффективности фотосинтеза, параметров «однородности видового состава» водорослей, параметра характерного размера водорослей (рис.1). В качестве параметра оценки эффективности фотосинтеза используется емкость фотосинтеза $F=flh/chl$ (величина, обратно пропорциональная эффективности фотосинтеза), позволяющее находить места, где концентрация фитопланктона будет нарастать. В качестве параметров «однородности видового состава» используется отношение коэффициента рассеяния назад $b_{br}(\lambda)$ фитопланктоном к соответствующему коэффициенту поглощения $a_{ph}(\lambda)$ для выбранного спектрального канала с длиной волны λ . Отношение позволяет находить места резкой смены спектральных характеристик фитопланктона, обусловленные сменой видового состава, или значительными изменениями концентраций примесей различного характера. В качестве параметра характерного размера используется величина роста коэффициента рассеяния назад от роста частоты спектрального канала. Величина роста обратно пропорциональна харак-

терному размеру частиц в воде. Совместный анализ получаемых параметров при тщательном контроле проведенной атмосферной коррекции позволяет целенаправленно искать интересные объекты и осуществлять проверку используемых биооптических алгоритмов.

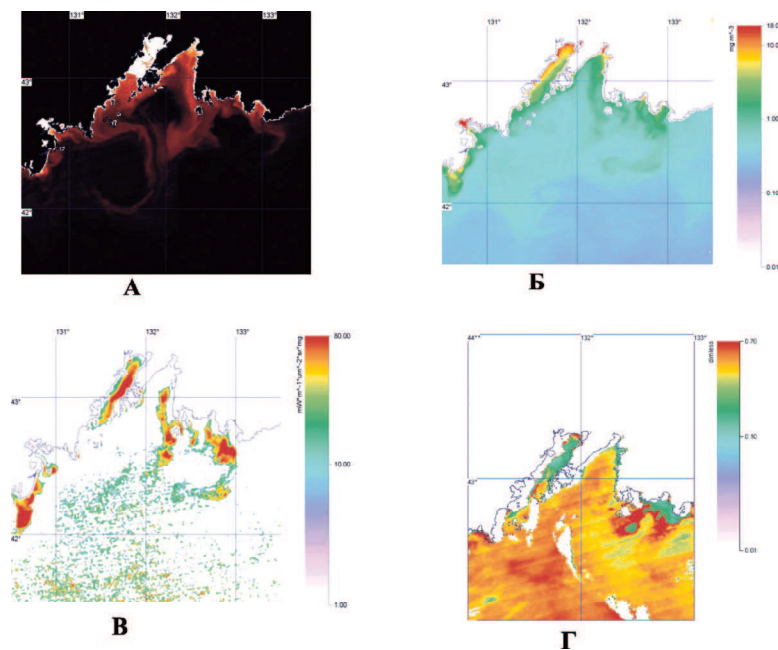


Рис. 1. Карты биопараметров залива Петра Великого за 24.08.2009. А – коэффициент диффузного ослабления K_{490} . Б – концентрация хлорофилла-а (алгоритм ОС3). В – емкость фотосинтеза F . Г – параметр «однородности» видового состава для $\lambda=0.412$ мкм (алгоритм Кардера [1])

Дистанционное зондирование атмосферы

Основной проблемой алгоритмов атмосферной коррекции приходящего на спутниковый радиометр излучения является неточность модели поглощения и рассеяния излучения атмосферным аэрозолем. Наиболее эффективным средством восстановления параметров аэрозоля является дистанционное зондирование атмосферы стационарными и/или мобильными лидарами. При сложных атмосферных условиях эффективно сочетание спутниковых и мобильных лидаров.

Взаимодополняющие методики солнечной фотометрии и лазерного зондирования атмосферы позволяют не только оценить содержание аэрозольного вещества в атмосферном столбе, но и определить его вертикальное распределение (рис.2а) и оценить коэффициенты ослабления излучения аэрозолем. Последующий анализ данных лидарного зондирования позволяет выявить интервалы высот переноса аэрозоля в атмосфере, а также определить его оптические и микрофизические свойства. На рисунке 2б приведен пример восстановления коэффициента экстинкции для 3-х длин волн зондирования (355, 532 и 1064 нм) за 30 апреля 2009 г. Многочастотное лидарное зондирование аэрозольных слоев дает возможность также оценить функцию распределения аэрозольных частиц по размерам (рис.2в) и определить коэффициент англстрема, который задает спектральную зависимость коэффициента экстинкции в видимом спектральном диапазоне. Лидарные измерения обеспечивают получение ключевых параметров распределения аэрозоля в атмосфере, достаточных для проведения аккуратной атмосферной коррекции сигнала, приходящего на спутниковый радиометр. Использование спутниковых расчетов оптической толщи-

ны аэрозоля и аэрозольный коэффициент ангстрема для оценки однородности атмосферных характеристик позволяет уверенно распространять аэрозольную модель атмосферы, рассчитанную лидарными средствами, на значительные области в окрестности измерений.

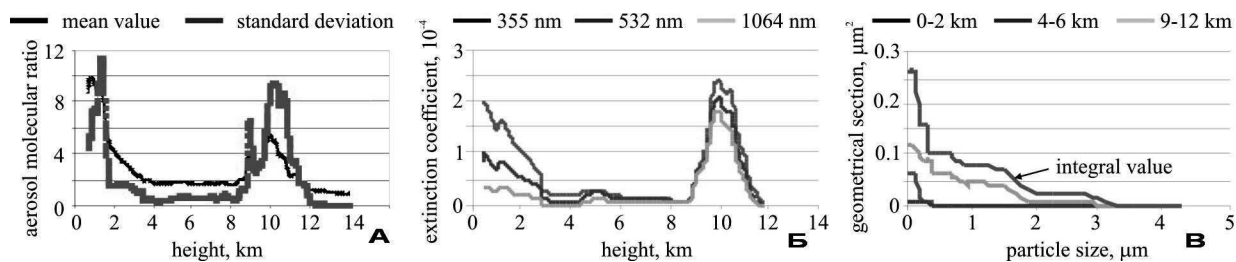


Рис. 2. Лидарные оценки параметров атмосферного аэрозоля: А – аэрозоль-молекулярное отношение для длины волны 532 нм; Б – коэффициента ослабления лазерного излучения для трех длин волн; В – функция распределения частиц по размеру для различных слоев атмосферы

Контроль оптических характеристик восходящего излучения

Прямые измерения спектральных характеристик полевым гиперспектрорадиометром непосредственно над и под поверхностью воды позволяют контролировать корректность как алгоритмов атмосферной коррекции, так и алгоритмов расчета различных характеристик фитопланктона. Разработка алгоритмов расчета характеристик фитопланктона на основе измерений спектрорадиометра имеет самостоятельную ценность, так как позволяет создать мобильное средство диагностики качества воды и, в частности, для распознавания вредоносных водорослей с мобильных платформ. Измерения дают возможность проводить расчеты ключевых параметров, на основе которых работает большинство биооптических алгоритмов – коэффициентов отражения моря в различных спектральных диапазонах:

$$Rrs(\lambda) = \frac{Lw(\lambda)}{Es(\lambda)},$$

где $Lw(\lambda)$ – спектр яркости восходящего излучения моря, $Es(\lambda)$ – спектр освещенности морской поверхностью. Их нормализация (приведение к единым условиям наблюдения) позволяет проводить сравнение со спутниковыми оценками (рис.3).

Измерения биопараметров в приповерхностном слое моря

Для верификации различных биооптических алгоритмов необходимы детальные измерения характеристик фитопланктона в приповерхностном слое моря. Помимо традиционных измерений концентраций основных компонент примесей (фитопланктона, растворенного органического вещества и неорганической взвеси), необходим пигментный анализ фитопланктона, анализ видового состава и быстрое и эффективное измерение распределения компонент примесей в пространстве. Для получения характеристик пространственного распределения биопараметров воды проводятся флюориметрические измерения

проточным флюориметром и зондом. Последний (рис.4а) позволяет измерять температуру, соленость, давление, концентрацию растворенного органического вещества, концентрацию хлорофилла-а и величину фотосинтетически-активной радиации в морской воде. Измерения зонда дают возможность строить весовую функцию для осреднения биопараметров в слое в соответствии с неоднородностью их вертикального распределения с целью сравнения спутниковых и *in situ* измерений, а также строить горизонтальные разрезы измеряемых величин (рис.4б,в).

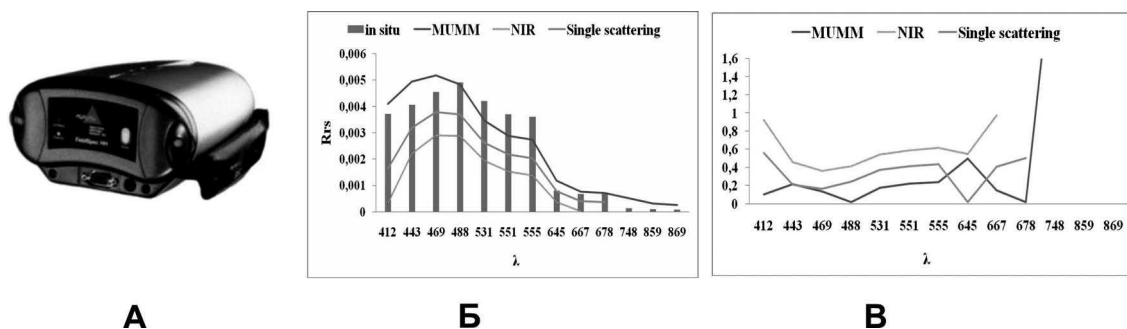


Рис. 3. Полевой спектрорадиометр ASD (А); прямые измерения коэффициентов отражения в 13 спектральных каналах для одного пикселя изображения MODIS (голубые колонки) и их спутниковые оценки для трех различных моделей атмосферной коррекции, применяющихся в пакете SeaDAS (Б); относительная погрешность (отношение) соответствующих спутниковых оценок при сравнении с *in situ* измерениями

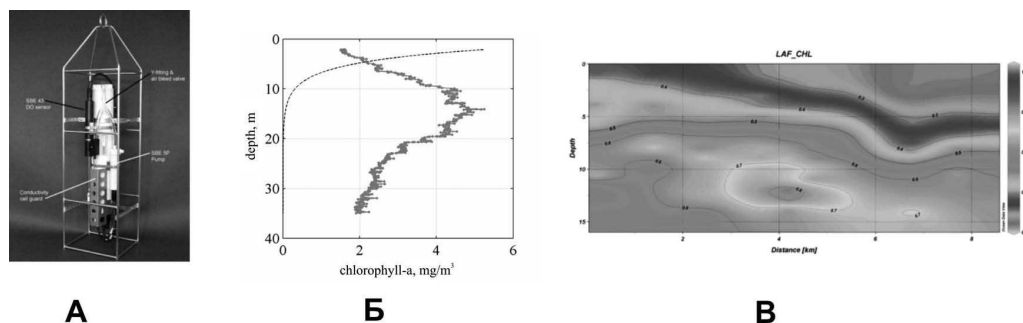


Рис. 4. А – погружаемый зонд SBE-19-plus. Б – профиль концентрации хлорофилла-а (зеленая линия) и весовая функция учета неоднородности его распределения (пунктирная линия). В – глубинный разрез концентрации хлорофилла-а (август, 2008г.)

Разработка регионального алгоритма расчета концентрации хлорофилла-а

Представленный комплекс средств и методик позволяет создавать эффективные региональные алгоритмы расчета биопараметров для прибрежных вод. Для залива Петра Великого, отдельные участки акватории которого относятся как к водам открытого моря (case I), так и прибрежным (case II), в том числе подверженным антропогенному влиянию города Владивостока, показана возможность создания регионального алгоритма расчета концентрации хлорофилла-а, единого для всей акватории [2]. Анализ работы различных алгоритмов пакета SeaDAS (рис.5) показал, что алгоритм Кардера для расчета концентрации хлорофилла-а, растворенной органики и коэффициентов поглощения и рассеяния фитопланктона [1] дают наиболее приемлемые результаты при сравнении данных прямых измерений концентрациями хлорофилла со спутниковыми измерениями. Значительная дисперсия рассогласований концентраций хлорофилла-а вблизи городского побережья

(красные точки) обусловленная, по-видимому, влиянием городских стоков, корректируется, если ввести зависимость концентрации хлорофилла-а от величины его флуоресценции (параметр flh). Предложен алгоритм для распознавания таких вод.

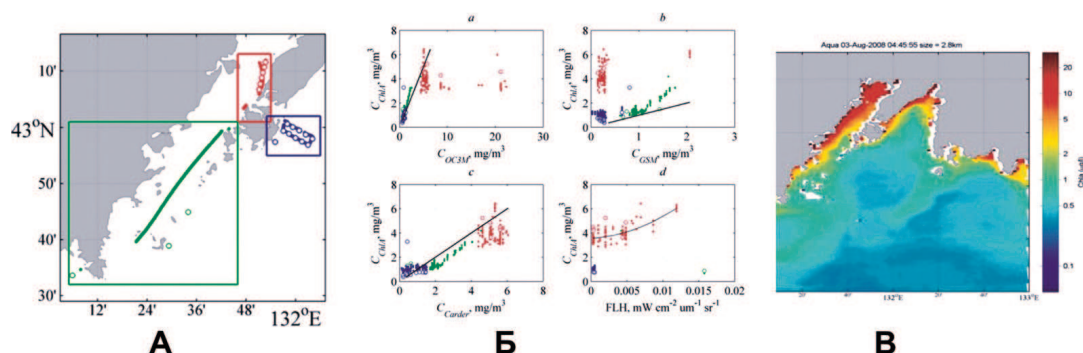


Рис. 5. Маршрут съемки 2008 года в заливе Петра Великого (А). Сравнение спутниковых и *in situ* измерений концентрации хлорофилла-а: а, в, с – алгоритмы ОСЗ, GSM и Кардера (пакет программ SeaDAS); d – использование флуоресценции (flh) для расчета регрессионной зависимости для вод case II (Б). Пересчитанная на основе полученных зависимостей спутниковая карта концентрации хлорофилла-а (В)

Оптические свойства видов фитопланктона

Разработка алгоритмов идентификации вредоносного цветения водорослей подразумевает наличие процедур идентификации их видов. Комплексные экспедиционные работы позволяют накапливать материал для создания алгоритмов распознавания видов водорослей. Однако, «пёстрость» видового состава в пробах, взятых в естественных условиях, не гарантирует быстрого получения спектральных характеристик конкретных видов, особенно вредоносных. Их выращивание в лабораторных условиях является необходимым элементом создания технологии распознавания вредоносного цветения водорослей дистанционными методами. Выращивание наиболее опасных видов вредоносных водорослей, встречающихся в морях Дальнего востока России, таких как *Pseudo-nitzschia pungens* и *Alexandrium tamarense*, позволяет определять ключевые спектральные характеристики вида и продуцируемого им растворенного органического вещества – коэффициенты ослабления, рассеяния назад и поглощения. Измерение этих характеристик на разных стадиях жизни водоросли (морфология клетки может значительно меняться в процессе жизненного цикла) позволяет накопить нужные данные для создания процедуры идентификации (рис. 6).

Построение процедуры идентификации видов цветущих водорослей

Для решения задачи идентификации вида цветущей водоросли можно использовать оптическую модель прохождения излучения в приповерхностном слое (алгоритм Кардера), согласно которой коэффициент отражения моря можно с хорошей точностью аппроксимировать следующей зависимостью:

$$Rrs(\lambda) = \frac{f * t^2}{Q(\lambda) * n^2} \frac{b_b(\lambda)}{a(\lambda) + b_b(\lambda)},$$

где λ – длина волны, $a(\lambda)$ – коэффициент поглощения морской воды в приповерхностном слое, $b_b(\lambda)$ – коэффициент рассеивания назад. Остальные параметры аппроксимируются известными зависимостями:

$$f / Q(\lambda) = 0.02085 + 0.00028796 \cdot \lambda + 0.000000289 \cdot \lambda^2,$$

$$t^2 / n^2 \approx 0.54.$$

Знание спектральных характеристик вредоносных водорослей позволяет рассчитать коэффициент отражения морской воды для любой длины волны при заданной концентрации водоросли и ее РОВ, что можно положить в основу алгоритма распознавания ВЦВ по спутниковой информации, или измерениям полевого спектрорадиометра. Не смотря на значительное разнообразие видов микроводорослей, задача упрощается из-за того, что при массовом цветении доминирует только несколько видов.

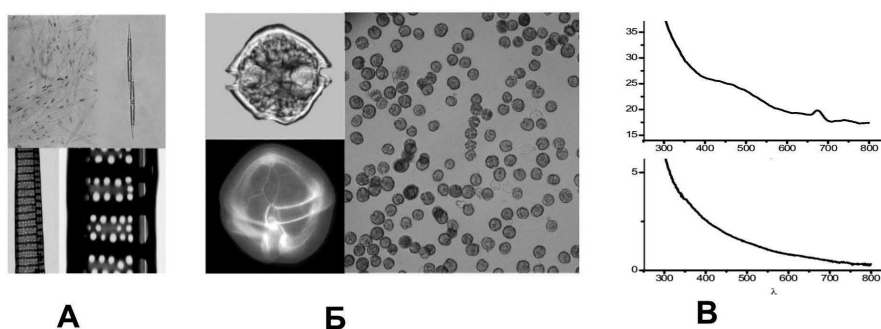


Рис. 6. Вредоносные виды водорослей: (А) *Pseudo-nitzschia pungens* (приведены фотографии клеток, сделанные с помощью светового и трансмиссионного электронного микроскопов) и (Б) *Alexandrium tamarense* (приведены фотографии клеток, сделанные с помощью светового и люминесцентного микроскопов), а также (В) пример спектральных характеристик – коэффициенты ослабления водоросли *Alexandrium tamarense* и ее РОВ

Распознавание видов фитопланктона по спутниковой информации

– Для апробации подхода был проведен натурный эксперимент [3]. Использовались измерения видового состава в заливе Петра Великого за 2006 год. Наблюдалось цветение водорослей, и в пробах по биомассе доминировали 2 диатомовых водоросли – *Coscinodiscus oculus-iridis* и *Ditylum brightwellii*. Их доля составляла 70–95% от биомассы всего фитопланктона. Была поставлена задача расчета спектральных характеристик микроводорослей в следующей форме. Для каждого спутникового измерения изменчивость излучения R канала k относительно излучения чистой воды можно записать в форме:

$$R_k - W_k = \sum C_i \cdot R_{i,k}, \quad (1)$$

где W_k – излучение чистой морской воды в канале k ; C_i – концентрация биомассы микроводоросли i ; $R_{i,k}$ – спектральный параметр единицы биомассы микроводоросли i совместно с ее РОВ в канале k . Концентрация водорослей бралась из проб видового состава, которые соответствовали пикселям спутникового изображения.

В качестве характеристик микроводорослей $R_{i,k}$ использовались нормализованные восходящие излучения в 13-ти спектральных каналах радиометра MODIS. При проведе-

нии расчетов предполагалось, что остатку биомассы, не приходящемуся на доминирующие виды, соответствует некоторая "универсальная" микроводоросль с едиными спектральными характеристиками для всей акватории. Решение задачи (1) показало устойчивость получения спектральных характеристик $R_{i,k}$ конкретной водоросли. Характеристики водорослей не менялись существенно при использовании в задаче (1) различных выборок из набора измерений и давали хорошую точность аппроксимации спутниковых измерений R_k по модели (1).

Работа поддержана грантами ДВО РАН (проекты № 09–I–П23–12; 09–I–П23–01; 09–I–П15–03; № 09–III–А–06–207; 09–III–А–06–213), ФЦП “Мировой океан” на 2008-2012 гг. № 01.420.1.2.0003 от 07 ноября 2008. и гос. контрактом № 02.518.11.7152.

Литература

1. Kendall L., Carder F., Chen R., Lee Z., Hawes S.K., Cannizzaro J.P., Case 2 Chlorophyll-a. *MODIS Algorithm Theoretical Basis Document*, 19, 2003, p. 1-67. [http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/DOCS/atbd_mod19.pdf]
2. Salyuk P, Bukin O., Alexanin A., Pavlov A., Mayor A., Shmirko K., Akmaykin D. Optical properties of waters of Peter the Great Bay compares with satellite ocean colour data // *International Journal of Remote Sensing*, 2010, in press.
3. Алексанин А.И., Орлова Т.Ю., Фомин Е.В., Шевченко О.Г. Перспективы определения видового состава фитопланктона по данным радиометра MODIS // Сборник статей «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов», выпуск 5, том II. – М.: ООО «Азбука-2000», 2008, с.22-29.

Research Arrangement for Ecological Assessment of the Sea Areas with Remote Sensing Techniques

Alexanin A.I.¹, Kachur V.A.¹, Orlova T.Yu.², Pavlov A.N.¹, Salyuk P.A.³

¹ *Institute for Automation and Control Processes, FEB RAS
690041, Vladivostok, Radio 5, e-mail:aleks@satellite.dvo.ru*

² *Institute of Marine Biology, FEB RAS
690041, , Vladivostok, Palchevsky 17, тел.: (4232) 310905, e-mail: torlova@imb.dvo.ru*

³ *Pacific Oceanological Institute, FEB RAS
690041, , Vladivostok, Baltic 43, тел. (4232) 31-14-00, e-mail: pavel.salyuk@gmail.com*

The task complexity on sea ecological assessment, and at first, on identification and monitoring of harmful algal bloom is led to the necessity of the facilities and activity integration of three research institutes of Far-Eastern Branch of Russian Academy of Sciences (Institute for Automation and Control Processes, Institute of Marine Biology, Pacific Oceanological Institute). Three center equipment was used (Satellite Center, Center of Lidar Methods for Substance Research, Center for Harmful Algal Bloom and Bio-toxicity Monitoring). The appeared opportunities allowed organizing the comprehensive in situ and laboratory researches for the task solution. The used method description and preliminary results are presented.

Keywords: harmful algal bloom, atmosphere sensing with lidars, satellite monitoring, fluorimeter measurements, phytoplankton specie composition.