

Перспективы определения видового состава фитопланктона по данным радиометра MODIS

А.И. Алексанин¹, Т.Ю. Орлова², Е.В. Фомин¹, О.Г. Шевченко²

¹ Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Радио, 5, e-mail: aleks@satellite.dvo.ru

² Институт биологии моря им. А.В. Жирмунского ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Пальчевского, 17, e-mail: torlova@imb.dvo.ru

Проведенные спутниковые и подспутниковые наблюдения Амурского залива в Японском море в августе 2006 года позволили оценить возможность определения видового состава и концентрации биомассы микроводоросли заданного вида в приповерхностном слое. Основной объем биомассы фитопланктона составляли два вида диатомовых водорослей - *Coscinodiscus oculus-iridis* и *Ditylum brightwellii*. Использовались 17 параметров и спектральных характеристик излучения, рассчитываемых программой SeaDAS по данным радиометра MODIS/AQUA. Из них 11 оказались чувствительными к соотношению концентраций упомянутых водорослей. На основе последних были построены признаки для расчета концентрации водоросли в воде и проведены соответствующие эксперименты.

Работа поддержана грантами РФФИ № 06-01-96915, № 06-04-48649 и грантами ДВО РАН.

Введение

Одной из ключевых задач целевой комплексной программы ДВО РАН "Биологическая безопасность Дальневосточных морей Российской Федерации", а также программы ООН UNEP (United Nations Environment Programme) является мониторинг вредоносного «цветения» микроводорослей (фитопланктона). Среди биотических компонентов прибрежных экосистем фитопланктон – один из наиболее чувствительных элементов, реагирующих на изменения природной среды. Климатические изменения и загрязнение прибрежных вод приводят к тому, что явление «красных приливов» (феномен массового развития микроводорослей) приобретает характер эпидемий, в том числе и в дальневосточных морях РФ. Вредоносное цветение водорослей (ВЦВ) представляет опасность для жизни и здоровья людей, снижает продуктивность марикультурных хозяйств, наносит ущерб туризму и рекреационным системам, снижает биоразнообразие и разрушает морские экосистемы. Из 40-50 видов микроводорослей, вызывающих «цветение» воды в прибрежных водах дальневосточных морей, около 20 видов могут продуцировать токсины, представляющие опасность для теплокровных животных и человека. Спутниковый мониторинг моря – один из наиболее эффективных инструментов контроля ВЦВ. Такие индикаторы цветения водорослей, рассчитываемые по спутниковой информации, как концентрация хлорофилла *a*, мутность, флуоресценция, коэффициенты отражения в разных спектральных диапазонах не являются надежными идентификаторами ВЦВ, так как не всякое «цветение» является вредоносным. Поэтому ключевой задачей такого мониторинга является определение видов доминирующих водорослей в заданном регионе моря и концентраций их биомассы.

Можно выделить два подхода к решению задачи. Первый базируется на интерпретации вышеупомянутых индикаторов с привлечением знаний о региональных особенностях «цветения» микроводорослей. Второй – на алгоритмах распознавания типов водорослей по спутниковой информации. Последний подход более перспективен, но и более сложен. Спектральные характеристики конкретных видов и их групп могут существенно различаться, что позволяет проводить идентификацию видов по их спектрам при проведении *in situ* измерений [1-3]. Использование этого подхода при интерпретации данных спутниковых изображений сталкивается с рядом трудностей, обусловленных низкой точностью исходных данных, ограниченностью набора используемых спектральных диапазонов и нерешенностью проблемы атмосферной коррекции с нужной точностью. Поэтому основной целью данной работы была апробация выбранного подхода на ак-

ватории Амурского залива Японского моря, характеризующейся сложной экологической обстановкой.

Используемые данные и методики их обработки

Спутниковые измерения. В работе использовались данные радиометра MODIS спутника AQUA, получаемые в Центре коллективного пользования регионального спутникового мониторинга окружающей среды ДВО РАН [4-5]. Для обработки данных использовался пакет программ SeaDAS версии 5.1, который позволяет рассчитывать различные параметры моря: концентрацию хлорофилла *a* различными алгоритмами, мутность приповерхностного слоя, температуру поверхности, нормализованное восходящее излучение и др. Для организации массовой обработки данных был создан комплекс программ в среде WINDOWS, позволяющий осуществлять автоматически по факту появления спутниковой информации удаленный запуск пакета SeaDAS, функционирующего под ОС LINUX.

Технология расчета биопараметров в пакете SeaDAS базируется на оценке нормализованного восходящего из воды излучения (nLw) в различных спектральных диапазонах видимой части спектра. Расчет восходящего излучения основан на коррекции полученного радиометром излучения на основе различных атмосферных поправок. К основным факторам, влияющим на конечную величину nLw , относятся: скорость приводного ветра, Релеевское рассеяние атмосферы, аэрозольное рассеяние и влияние озона. Для учета этих факторов используются в настоящее время поля атмосферы, рассчитываемые в центре прогноза погоды NCEP (США). Грубость атмосферной коррекции часто является основным источником ошибок, приводящих к завышению концентрации хлорофилла *a* иногда во много раз и появлению отрицательных значений nLw . Особенно сильное влияние оказывает поле относительной влажности, на основе которого осуществляется выбор модели аэрозольного рассеяния. В настоящее время в пакете SeaDAS реализованы 12 моделей рассеяния и 3 алгоритма автоматического выбора модели для конкретного пикселя изображения. Проведенные нами эксперименты показали, что наименьшее количество заведомо неприемлемых результатов при определении хлорофилла *a* для прибрежных вод получается при использовании выбора модели аэрозоля на основе моделей MUMM (Management Unit of the North Sea Mathematical Models, Belgium). Применение данной методики привело к тому, что упомянутые артефакты фактически исчезли.

Методы сбора и количественной обработки измерений фитопланктона. Видовой состав и плотность фитопланктона в Амурском заливе были определены по данным рейса, выполненного 30 августа 2006 г. (рис. 1). В залив поступает значительное количество взвеси и растворенных органических веществ, благодаря илистой реке Раздольной и городским стокам (очистные сооружения во Владивостоке отсутствуют). В силу муссонного климата ветер в августе дует с суши, перенося значительное количество пыли. Перечисленные особенности являются одними из основных причин плохой точности биооптических алгоритмов обработки спутниковой информации.

Из 14 проб, взятых с поверхностного горизонта, в 13 пробах наблюдали схожий видовой состав. Доля диатомовых водорослей *Coscinodiscus oculus-iridis* и *Ditylum brightwellii* составляла 70–95% от биомассы всего фитопланктона, а с учетом доли *Rhizosolenia setigera* и *Skeletonema costatum* суммарная биомасса превышала 90% от общей биомассы микроводорослей. Биомасса фитопланктона варьировала в пределах 0,3–3,5 г/м³. Такая "хорошая" структура данных позволяет поставить задачу оценки спектральных характеристик каждого доминирующего вида в этой выборке. Сбор количественных проб фитопланктона производили с помощью 2-х литрового батометра Молчанова с горизонта 0,5 м. Материал отбирали в светлое время суток, в интервале 10.00–18.00. Один литр пробы концентрировали методами осаждения [6] или обратной фильтрации через нуклеопоровые фильтры с диаметром пор 2 мкм [7]. Материал фиксировали раствором Утермея с последующей дофиксацией 4% формалином.

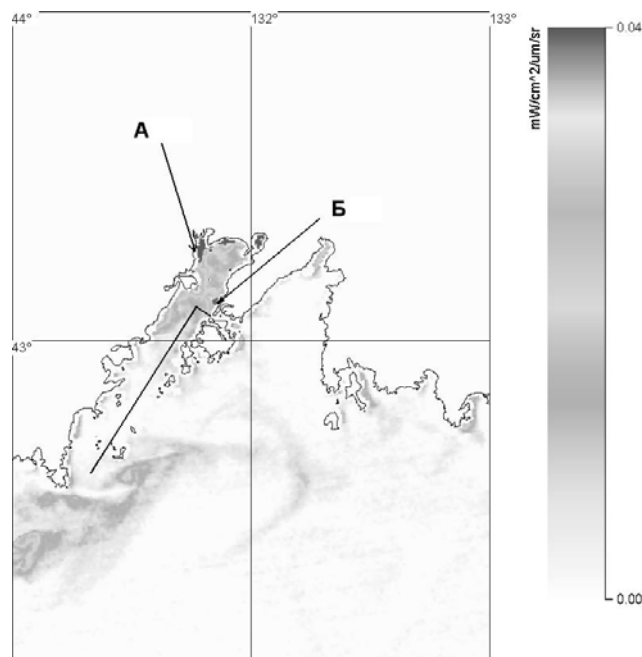


Рис. 1. Карта высоты линии флюоресценции (flh) в заливе Петра Великого и маршрут экспедиции за 30.08.2006 г. А – устье реки Раздольной, Б – основные городские стоки

Плотность ультра- и наннопланктона подсчитывали в камере типа Ножотта объемом 0,05 мл, численность микропланктона – в камере Наумана объемом 1 млм с учетом репрезентативности выборки просчитанного числа клеток в пробе. Для обеспечения 20% точности подсчета, объем минимальной выборки определялся необходимостью тотального просчета не менее 3 тыс. клеток для всего фитопланктона [8]. Биомассу оценивали объемным методом, приравнивая форму клетки водоросли к наиболее близкому по форме геометрическому телу. Полагая удельный вес водорослей равным единице, средний объем клеток каждого вида перемножали на его численность и получали биомассу популяции. Суммированием последних выводили биомассу всего фитопланктона в пробе. При определении объемов клеток использовали данные собственных промеров и литературные сведения [8-12].

Доминирующими считали виды, плотность которых составляла не менее 20% от общей плотности остальных видов в сообществе [10]. «Цветение» диатомовых водорослей рассматривали как их массовое развитие, при котором численность клеток вида превышала 10^6 кл./л [13].

Методика определения видового состава фитопланктона по спутниковой информации

Целью работы было получение ответов на следующие вопросы:

- на сколько устойчив расчет спектральных характеристик излучения единицы биомассы конкретного вида микроводоросли по спутниковой информации в зависимости от биомассы и доли конкретной микроводоросли в пробе;
- одинаково ли чувствительны разные спектральные диапазоны к биомассе конкретной микроводоросли?

При решении задачи предполагалось, что величина нормализованного восходящего излучения в каждом спектральном диапазоне складывается из излучения чистой воды и излучения/поглощения биомассы микроводорослей. В общем случае вклад в излучение дают 3 компоненты - биомасса микроводоросли, растворенная органика и взвесь терригенного характера. Последней компонентой решено было пренебречь, так как время проведения рейса не сопровождалось обильными выбросами рек, обычно сопутствующими проливным дождям. Измерения были проведены вдали от побережья, а имеющиеся выносы рек легко отслеживались, в частности, по

коэффициенту мутности K490, и они не затрагивали районы судовых измерений. Так как основная масса измерений была вдали от г. Владивосток, то можно предположить, что растворенное органическое вещество является в основном продуктом жизнедеятельности фитопланктона. И, как показано было в работе [14], наблюдается высокая корреляция хлорофилла-а и растворенного органического вещества для конкретного сообщества микроводорослей. Предполагая, что конкретный вид фитопланктона и вырабатываемая им органика составляют комплекс с едиными спектральными характеристиками при различных концентрациях биомассы микроводоросли, можно попытаться разделить излучение в пикселе в соответствии с концентрациями доминирующих водорослей и найти характерные спектральные характеристики каждой микроводоросли. Получение таких характеристик даст возможность решать задачу оценки вероятности нахождения заданного вида микроводоросли в конкретной точке моря и оценивать его биомассу. При этом предполагается, что плотность фитопланктона равномерно распределена по вертикали, либо это распределение одинаковое для разных станций. Последнее предположение в первом приближении можно считать состоятельным, так как ключевые измерения были проведены в довольно мутных из-за высокого содержания фитопланктона водах (коэффициент прозрачности, согласно K490, был 3-6 метров).

На основе этих рассуждений и оценок была оставлена задача расчета спектральных характеристик микроводорослей в следующей форме. Для каждого судового 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 воды в канале k (определялось по участку моря с низким коэффициентом диффузного ослабления K490); C_i - концентрация микроводоросли i ; $R_{i,k}$ - спектральный параметр единицы биомассы микроводоросли i в канале k .

В качестве характеристик микроводорослей использовались нормализованные восходящие излучения в 13-ти спектральных каналах радиометра MODIS с длинами волн от 412nm до 2130nm и 4 биооптических параметра - концентрации хлорофилла-а, рассчитанные алгоритмами OC2 и OC3, мутность (K490) и высота линии флюоресценции (flh). Последний параметр характеризует естественную флюоресценцию фитопланктона и показывает правдоподобные значения только при концентрациях биомассы более $1\text{г}/\text{м}^3$. При проведении расчетов предполагалось, что остатку биомассы, не приходящемуся на доминирующие виды, соответствует некоторая "универсальная" микроводоросль с едиными спектральными характеристиками для всей акватории.

Переопределенная система уравнений (1) для всех проб решалась методом наименьших квадратов с сингулярным разложением матрицы C , оценкой ранга и собственных чисел прямоугольной матрицы. Данные излучения брались за 30 и 31 августа, так как за 30 августа часть изображения была закрыта слабой облачностью. Сравнение изображений за 30 и 31 августа показала схожесть атмосферных условий наблюдения и близость характеристик излучения чистой воды, что оценивалась по участку открытого моря с низким содержанием хлорофилла. Слабость течений обеспечивала перемещение воды в пределах километра за сутки (соответствует величине пространственного разрешения исходных спутниковых данных). В окрестности каждой станции 3×3 км оценивались средние величины и дисперсии использовавшихся оптических параметров. Средние значения в окрестности пиксел, пришедшихся на судовые измерения, сравнивались со значениями в этих пикселях. Расхождения были не существенные, так как измерения не попали в области резких фронтов. Поэтому в расчетах использовались средние значения, как наиболее устойчивые величины.

Результаты экспериментов

Было проведено 3 эксперимента, в которых искалось решение для трех, четырех и пяти видов микроводорослей. Задача была не вырождена только для трех видов микроводорослей:

Coscinodiscus oculus-iridis, *Ditylum brightwellii* и "универсальная". Это объясняется низким процентом биомассы *Rhizosolenia setigera* и *Skeletonema costatum* в большинстве проб. В то же время рассчитываемые характеристики двух доминирующих видов микроводорослей слабо менялись в экспериментах. Поскольку система (1) переопределена, то точного решения не бывает, а точность решения определяется рассогласованиями левой и правой частей уравнений (1). Точность расчетов оценивалась по модулю отношения невязок уравнений к их значениям $R_k - W_k$. Эта ошибка характеризует долю изменчивости излучения, которая не соответствует выбранной модели (1). Средняя доля Q рассчитывалась как по каждому параметру, так и по каждой пробе. Рассогласования по 11 параметрам были малы, что говорит о том, что именно эти параметры чувствительны к виду и плотности конкретной микроводоросли. Величины Q в 5 спектральных диапазонах в красной области оказались близки к 1, что говорит об отсутствии закономерностей в излучении этих каналов от вида и плотности микроводоросли. Поэтому эти спектральные каналы были выброшены при проведении окончательных расчетов. Был выброшен также канал nLw678, так как этот канал характеризует в первую очередь флуоресценцию фитопланктона, которая уже учитывается в параметре flh. Уравнения, где использовался параметр flh и суммарная биомасса была менее 1000 мг/м^3 , исключались в силу слабой чувствительности этого параметра к низким концентрациям фитопланктона.

Распределение ошибки Q по каждому судовому измерению приведены на рис. 2. Анализ ошибки показал, что остаточная ошибка только в двух пробах была близка, или превышала 1. Наиболее вероятное объяснение - несоответствие точечной пробы со средними концентрациями микроводорослей на площади в несколько квадратных километров. В целом, проведенный анализ говорит о хорошем соответствии данных и модели излучения (1).

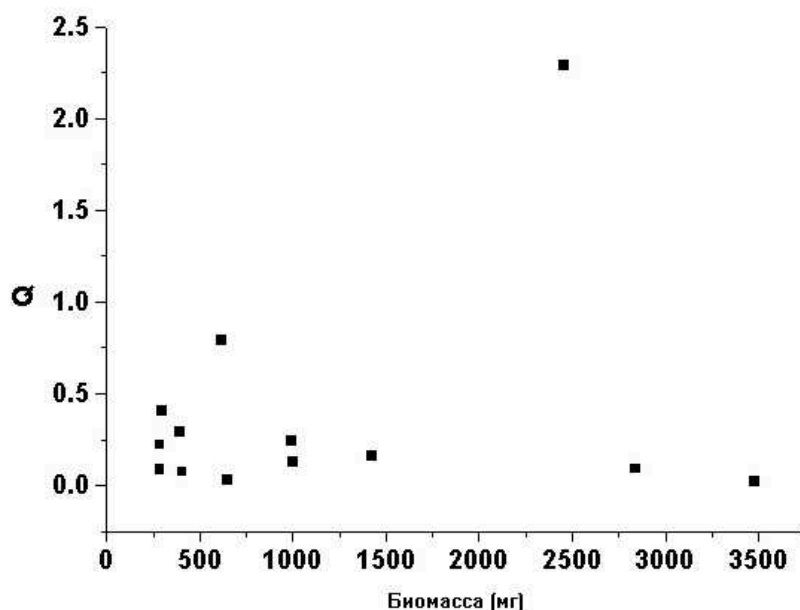


Рис. 2. Зависимость ошибки решения от величины биомассы в пробах

Окончательные результаты приведены на рисунке 3 в форме графиков, которые можно назвать "паспортами" микроводорослей. Из рисунка 3 и таблицы 1 следует, что клетки *Coscinodiscus oculus-iridis* и *Ditylum brightwellii* существенно отличаются по концентрации хлорофилла-а, мутности, флуоресценции и поглощению в фиолетово-голубом и зеленом диапазонах спектра на единицу биомассы. Данные виды имеют существенные различия в строении и поведении. Клетка *Coscinodiscus oculus-iridis* похожа на круглую низкую коробку, диаметром 100–220 мкм, высотой

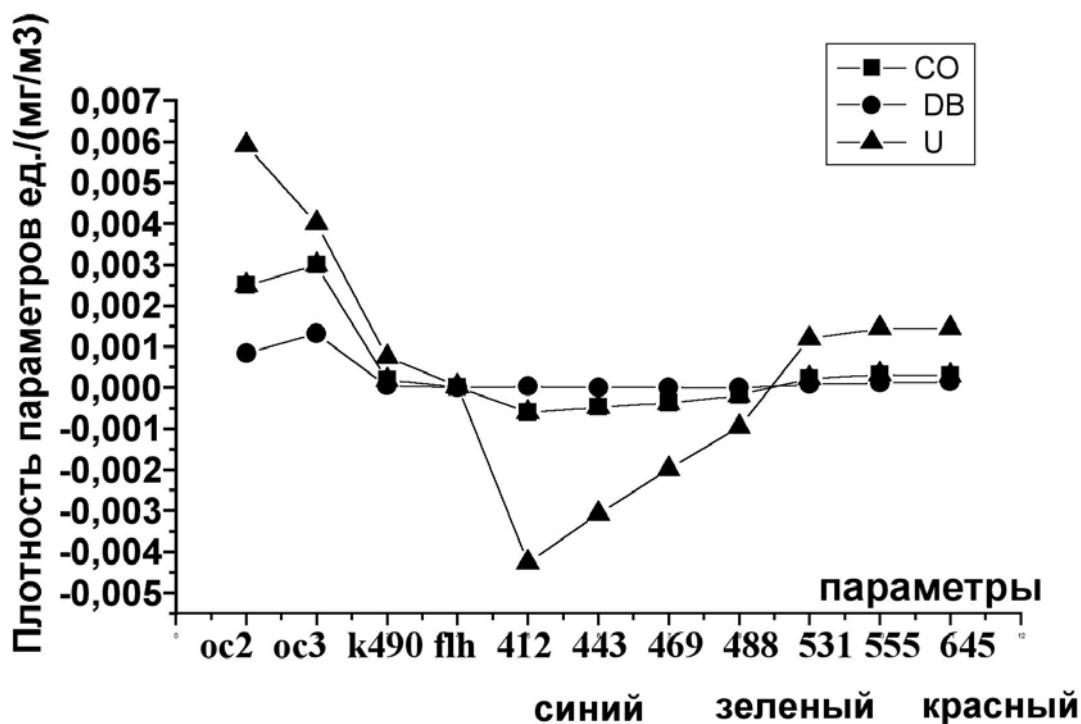


Рис. 3. Характеристики микроводорослей, приходящиеся на единицу биомассы: CO - *Coccosira oculis-iridis*; DB - *Ditylum brightwellii*; U - "универсальная" водоросль

48–85 мкм, заполненную хлоропластами; в воде клетка ориентированна горизонтально (рис. 4А). Клетка *Ditylum brightwellii* по форме напоминает цилиндр, диаметр 10–25 мкм, высота 200–300 мкм, содержит небольшое количество хлоропластов; клетка ориентированна в воде вертикально (рис. 4Б). Уже только по расположению хлоропластов можно ожидать, что спутниковые оценки концентрации хлорофилла-а могут оказаться завышенными (к сожалению измерения концентрации хлорофилла-а не проводились). Существенно меньший диаметр клеток *Ditylum brightwellii* с одной стороны должен способствовать увеличению рассеяния назад (особенно в фиолетовой области), а форма и ориентация микроводоросли наоборот уменьшать это рассеяние. Поэтому морфология клеток фитопланктона может оказывать существенное влияние на результаты оценок, получаемых биооптическими алгоритмами по спутниковой информации.

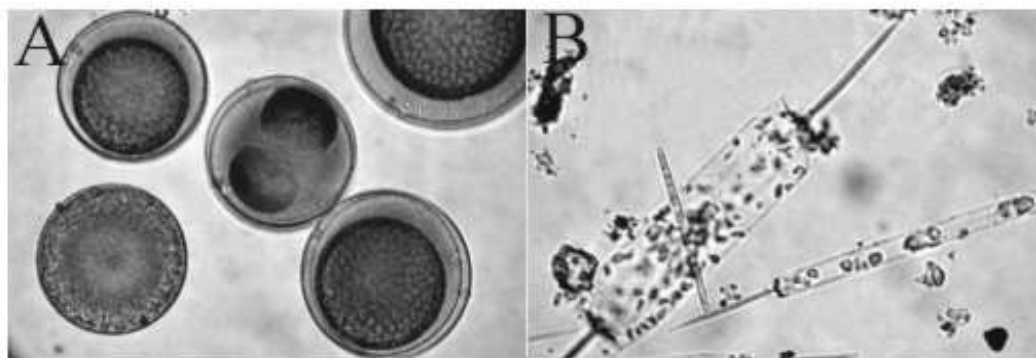


Рис. 4. Фотографии микроводорослей под световым микроскопом: А – *Coccosira oculis-iridis*, В – *Ditylum brightwellii*

Таблица 1. Сравнение параметров излучения единичной биомассы микроводорослей

Параметры	chl-OC2	Chl-OC3	K490	flh	nLw-412	nLw-443	nLw-469	nLw-488	nLw-531	nLw-551	nLw-555
Отношение параметров CO/DB	3.0	2.3	4.3	2.9	17.4	63.3	397.	40	3.0	1.95	2.0
Ошибки Q	0.07	0.03	0.21	0.55	0.24	0.22	0.18	0.36	0.02	0.10	0.08

Параметры универсальной микроводоросли должны описывать осредненные параметры излучения остатка биомассы в пробах. Но их нельзя рассматривать как осредненные параметры, так как эксперименты показали, что параметры микроводоросли, чья биомасса не превышает 20% в пробе, восстанавливаются неустойчиво. Однако наблюдаемая закономерность изменчивости nLw в сине-фиолетовой области и ее существенное отличие от характеристик двух базовых видов позволяет предположить наличие погрешности в измерениях излучения. Наиболее вероятно, что последние могут быть обусловлены как систематическими ошибками атмосферной коррекции, так и присутствием в заливе растворенной органики антропогенного характера. В целом можно считать, что получены характеристики излучения двух упомянутых видов диатомей, которые могут быть использованы для идентификации районов, где эти микроводоросли составляют основной объем биомассы, т.е. при решении обратной задачи - оценки биомассы каждого вида микроводорослей по спутниковым данным.

Решение обратной задачи формально получается довольно просто. Решается та же система уравнений (1), где вместо неизвестных переменных $R_{i,k}$ будут концентрации C_i . Предварительные расчеты давали правдоподобные оценки биомассы каждого из двух видов микроводорослей в пикселях. Однако применение такого подхода в силу неустойчивости решения обратных задач требует проведения дополнительных исследований. Кроме того, богатое видовое разнообразие фитопланктона в Амурском заливе и отсутствие спектральных характеристик присутствующих в воде микроводорослей не позволяет оценить достоверность решения. Один из наиболее надежных способов решения задачи - получение спектральных характеристик интенсивно «цветущих» микроводорослей и классификация пикселей изображений в соответствии с этими характеристиками.

Литература

1. Babin M., Cullen J.J., Roesler C.S., Donaghay P.L., Doucetter G.J., Kahru M., Lewis M.R., Scholin C.A., Sieracki M.E., Sosik H.M. New approaches and technologies for observing harmful algal blooms // *Oceanography*, 2005. Vol. 18. No. 2. P. 210-227.
2. Roesler C.S., Etheridge S.M., Pitcher G.C. Application of an ocean color algal taxa detection model to red tides in the Southern Benguela // *Harmful Algae 2002*. Florida Fish and Wildlife Conservation Commission, Florida Institute of Oceanography, and Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO. Eds. Steidinger, K. A., Lansberg, J. H., Tomas, C.R., and Vargo, G. A. 2004. P. 303-305.
3. Shutler, J., P.I. Miller, S.B. Groom & J. Aiken. 2005. Automatic Near-Real Time Mapping of MERIS Data as Input to a Phytoplankton Classifier // *Proceedings of the MERIS (A)ATSR Workshop 2005 (CD-ROM)*, MERIS-(A)ATSR Workshop, 26-30 Sep 2005, Frascati, Italy., 6 pp.
4. Левин В.А., Алексанин А.И., Алексанина М.Г. Задачи и проблемы спутникового информационного обеспечения мониторинга океана и атмосферы на Дальнем Востоке // *Вестник ДВО РАН*, 2007. №4. С. 95-111.
5. Центры коллективного пользования Российской академии наук // М.: Наука, 2004. 192 с.
6. Utermöhl H. Zur Vervollkommnung der quantitativen Phytoplankton. Methodik. Internat. Verein. Limnol. Mitteilungen. 1958. Vol. 9. P. 1-38.
7. Суханова И.Н. Концентрирование фитопланктона в пробе // *Современные методы количественной оценки распределения морского планктона* // М.: Наука. 1983. С. 97-105.
8. Федоров В.Д. О методах изучения фитопланктона и его активности // М.: МГУ, 1979. 168 с.

9. Коновалова Г.В. Сезонная характеристика фитопланктона в Амурском заливе Японского моря // *Океанология*, 1972. Т. 12. № 1. С. 123–128.
10. Коновалова Г.В. Структура планктонного фитоценоза залива Восток Японского моря // *Биол. моря*. 1984. № 1. С. 13–23.
11. Орлова Т.Ю. Диатомовые водоросли планктона неритических вод Южного Приморья: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Владивосток: ИБМ ДВО АН СССР. 1990. 26 с.
12. Михайлова Н.Ф. Сезонные изменения видового состава и количественных показателей хе-тоцеросов в Севастопольской бухте // *Тр. Севаст. биол. станции*. 1959. Т. 12. С. 102–120.
13. Colijn F. Changes in plankton communities: when, where and why. *ISES Mar. Sci. Symp.* 1992. Vol. 195. P. 193–212.
14. Букин О.А., Пермяков М.С., Салюк П.А., Майор А.Ю., Буров Д.В., Хованец В.А., Голик С.С., Подопригора Е.Л. Особенности формирования спектров лазерной индуцированной флюоресценции воды в период цветения водорослей в различных районах Мирового океана // *Оптика атмосферы и океана*, 2004. Т. 17. №9. С. 742-749.