

Концентрация хлорофилла-а и био-оптические характеристики в заливе Петра Великого (Японское море) во время зимне-весеннего цветения фитопланктона

Е.А. Штрайхерт, С.П. Захарков, Т.Н. Гордейчук, Ю.В. Шамбарова

*Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН
Владивосток 690041, Россия
E-mail: straj@poi.dvo.ru*

Преобладание поглощения света детритом и жёлтым веществом над его поглощением пигментами фитопланктона приводит к завышению спутниковых значений концентрации хлорофилла-а. Изменчивость содержания детрита и жёлтого вещества в воде от начала к концу цветения фитопланктона в приповерхностном слое вод или при выносе с материковым стоком может приводить к изменчивости расхождения между спутниковыми и реальными значениями концентрации хлорофилла-а. Поэтому наблюдаемые по спутниковым данным увеличение или максимум концентрации хлорофилла-а могут в реальности не существовать. В работе исследуется временная изменчивость концентрации хлорофилла-а по спутниковым данным и влияние на эту изменчивость изменения содержания в воде детрита и жёлтого вещества в двух районах залива Петра Великого и прилегающей к нему части, отличающихся значениями температуры зимне-весеннего цветения фитопланктона. По спутниковым данным, осредненным за 8-дневный период, выполнено сравнение временной изменчивости концентрации хлорофилла-а с изменчивостью других спутниковых продуктов цвета океана, характеризующих жизнедеятельность фитопланктона (флуоресценцией хлорофилла-а и поглощением света детритом и жёлтым веществом), в зоне шельфа и зоне Приморского течения с января по май 2003–2007 гг. По суточным спутниковым данным проанализированы взаимосвязи между концентрацией хлорофилла-а и упомянутыми выше характеристиками цвета океана при наблюдаемых пиках концентрации хлорофилла-а. Показано влияние поглощения света детритом и жёлтым веществом на изменчивость погрешности спутниковых значений концентрации хлорофилла-а. Проведено сравнение между спутниковыми и судовыми значениями концентрации хлорофилла-а для зоны шельфа при двух следующих друг за другом временных периодах цветения фитопланктона, отличающихся увеличением поглощения света детритом и жёлтым веществом. Сравнение показало увеличение расхождения между этими данными. В результате по спутниковым данным концентрация хлорофилла-а от первого ко второму из этих периодов возросла, а по судовым данным уменьшилась. Также рассматривается пример увеличения спутникового значения концентрации хлорофилла-а при возрастании поглощения света детритом и жёлтым веществом, вызванного стоком органического вещества с побережья в результате выпадения атмосферных осадков.

Ключевые слова: SeaWiFS, MODIS-Aqua, концентрация и флуоресценция хлорофилла-а, поглощение света детритом и жёлтым веществом, цветение фитопланктона.

Введение

Залив Петра Великого (ЗПВ) находится в северо-западной части Японского моря (рис. 1). Как и в большинстве прибрежных районов, спутниковые значения концентрации хлорофилла-а (Кхл) здесь большей частью завышены. Погрешности в сторону завышения спутниковых значений Кхл в ЗПВ достигают 200% и более (Штрайхерт и др., 2006). Спутниковое значение Кхл определяется из анализа восходящего излучения моря в синезелёной области спектра. Значительное влияние на излучение моря в этой области оказывает детрит и растворённое органическое вещество, относящееся к разделу гумусовых кислот (РОВ, “жёлтое вещество”). Поэтому причиной завышения спутниковых значений Кхл может быть преобладание поглощения света детритом и РОВ по сравнению с его поглощением пигментами фитопланктона (Burenkov et al., 1999; Буренков и др., 2000; Фефилов,

2003). РОВ выносится с побережья материковым стоком и образуется в океане фотосинтезирующими растениями (Шифрин, 1983). Вследствие этого его содержание в воде может меняться во времени, что ведёт к неравнозначному влиянию РОВ на погрешность спутниковых значений Кхл во временном ряду. Это может привести к дополнительному пику спутникового значения Кхл, и, возможно, к его максимуму.

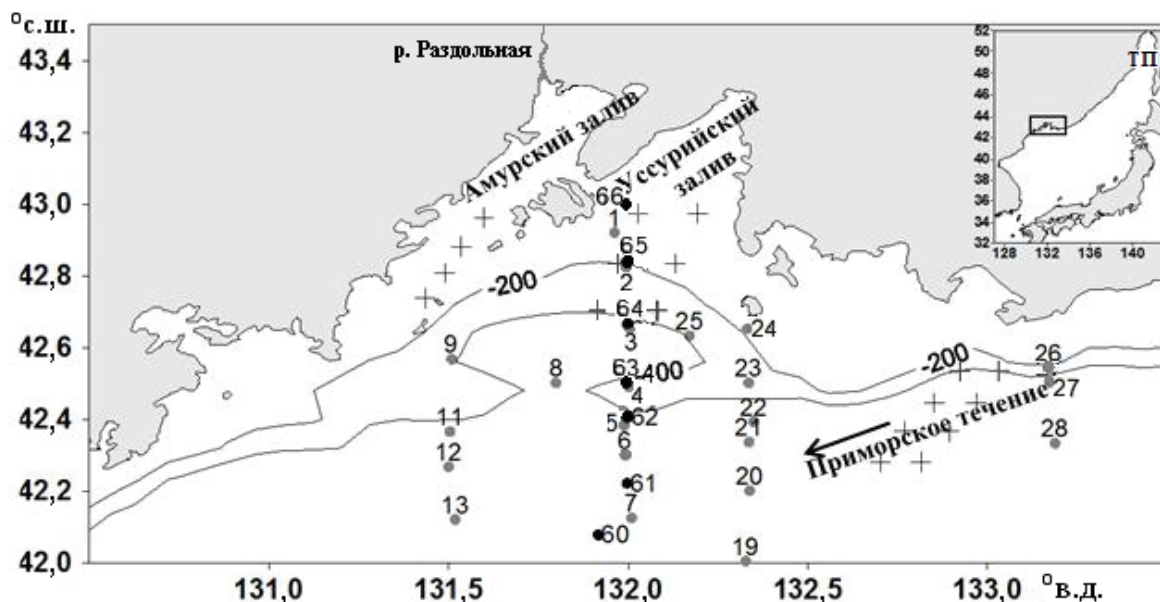


Рис. 1. Местоположение залива Петра Великого в Японском море (на врезке справа). Крестиками отмечены точки, в которых был проанализирован по спутниковым данным временной ход Кхл, a_{443_GSM} , a_{443_QAA} , FLH в трёх районах изучения. Чёрными и серыми кружочками показаны станции соответственно на 8-й и 9-й неделе 2003 г., для которых было произведено сравнение между спутниковыми и судовыми значениями Кхл. Также указаны изолинии глубин 200 и 400 м

Зимне-весеннее цветение фитопланктона после обогащения верхнего слоя моря биогенными элементами в результате поступления их с глубинных слоёв при зимней конвекции вод начинается при увеличении фотосинтетически активной радиации и уменьшении глубины перемешанного слоя (Сёмина, 1974). Перемещаясь вслед за сезонным слоем скачка плотности водной массы при исчерпании биогенных элементов в вышележащем слое, фитопланктон на поверхности оставляет продукты своей жизнедеятельности - детрит и РОВ. При изучении нами временного хода Кхл для зимне-весеннего периода как отклика на изменчивость гидрометеорологической ситуации, следующего из модели цветения Свердрупа (Sverdrup, 1953), для шельфовой зоны (ЗШ) мы наблюдали два пика. Максимум Кхл в одни годы приходился на первый пик, в другие – на второй. По времени появления второй пик следовал за первым через один 8-дневный период (далее условно “неделя”), либо сразу на следующей неделе. В зоне Приморского течения (ЗПТ) наблюдался один пик Кхл. Отмеченные выше зоны были выбраны согласно анализу среднемесячных и осреднённых за 8-дневный период распределений Кхл со сканера SeaWiFS и спектрорадиометра MODIS-Aqua

с сайтов <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> и <http://cearac.nowrap.org>. В ЗШ цветение наблюдалось в конце января - середине марта, в ЗПТ – в начале апреля - середине мая. Температура поверхности моря (ТПМ) с MODIS-Aqua в ЗШ при цветении в рассмотренные годы составляла (-1)-1°C, а в ЗПТ 2–6°C. Определяющими в понимании сезонного цветения фитопланктона являются глубина перемешанного слоя (ГПС) и величина фотосинтетически активной радиации (ФАР), приходящей к поверхности моря. Они определяют наличие биогенных элементов и света - двух основных факторов, необходимых для развития фитопланктона. ГПС зависит от многих факторов, основные из которых – изменение температуры и солёности, ветровое перемешивание (Lim et al., 2012). От названных условий зависит изменчивость Кхл. Проанализировав указанные условия, мы пришли к выводу, что цветение в ЗШ начиналось, главным образом, вследствие ослабления ветрового перемешивания и распреснения верхнего слоя материковым стоком, а в ЗПТ – ослабления ветрового перемешивания, прогрева верхнего слоя и меньшего, чем в ЗШ распреснения верхнего слоя в результате таяния льда в Татарском проливе (ТП). Разница во времени и температуре цветения в этих зонах определяется различными градиентами солёности между поверхностным и подповерхностными слоями (Штрайхерт и др., 2012). Влияние упомянутых факторов на сезонное цветение фитопланктона в Японском море было рассмотрено в работах (Kim et al., 2000, 2007; Zakharkov et al., 2000; Yamada et al., 2004; Jo et al., 2005).

Мы предположили, что второй пик в полученном временном ряде обусловлен увеличением погрешности спутникового значения Кхл вследствие увеличения в воде содержания детрита и РОВ. Поэтому целью настоящей работы является проверка нашего предположения на основе исследования изменения во временном ряду спутниковых значений Кхл, поглощения света детритом и РОВ и флуоресценции хлорофилла-а (Фхл) в выделенных нами зонах ЗПВ и прилегающей его части.

Фхл представляет собой энергию электромагнитного излучения, испускаемую молекулами хлорофилла-а. Поэтому она может охарактеризовать Кхл. Хлорофилл-а флуоресцирует в красной области спектра. Влиянием поглощения света детритом и РОВ на формирование восходящего излучения в области 680 нм можно пренебречь. Поэтому для спутникового определения Кхл в оптически сложных водах, в которых меняется соотношение между Кхл и РОВ, рекомендуется использование эмпирических алгоритмов, основанных на измерении Фхл (Salyuk et al., 2010; Салюк и др., 2013). Из-за увеличения погрешности спутникового измерения Фхл при низких Кхл этот подход применим для акваторий с относительно высокой Кхл.

Время появления максимума Кхл важно при оценке развития последующих звеньев трофической цепи для оценки промысловой ситуации. Пространственно-временная струк-

тура реального распределения Кхл является продуктом взаимодействия физических, биологических, химических процессов, идущих в водной среде. Содержание хлорофилла-а в воде и её изменчивость могут служить показателем особенностей, идущих в водоёме процессов. Погрешности спутниковых значений Кхл могут исказить эту информацию.

Материалы и методы

Для сравнения временного хода характеристик фитопланктона в работе использовались осреднённые за 8-дневный период 9-километровые данные с сайта <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>: Кхл, коэффициенты поглощения света детритом и РОВ на длине волны 443 нм, полученные по алгоритму Гарвера-Зиегеля-Мариторены и квазианалитическому алгоритму, со сканера цвета SeaWiFS, высота линии Фхл на длине волны 678 нм (FLH), нормализованная на приходящее к поверхности моря излучение, со спектрорадиометра MODIS-Aqua. Обозначения для продуктов поглощения света детритом и РОВ соответственно $a_{dg}(443)_{GSM}$ и $a_{dg}(443)_{QAA}$ (IOCCG Reports, 2006). Значения Кхл являлись оценками алгоритма OC4V4 (O'Reilly et al., 2000). FLH определяется как разность между максимальным уровнем сигнала яркости моря и основания, определяемого линейной интерполяцией сигналов рассеяния света на соседних к 678 нм длинах волн. Фхл зависит от Кхл, приходящего к поверхности моря солнечного излучения, удельного коэффициента поглощения клетками фитопланктона, квантового выхода флуоресценции (Behrenfeld et al., 2009). Вследствие технических различий датчиков SeaWiFS и MODIS-Aqua данные FLH есть в наличии только с MODIS-Aqua. MODIS-Aqua запущен на орбиту летом 2002 г. Поэтому временные ряды спутниковых продуктов цвета океана мы рассмотрели, начиная с 2003 г. Данные были проанализированы за 5 лет, то есть до 2007 г. Временной ход значений упомянутых выше продуктов цвета океана рассматривался с января по май, что составляло девятнадцать 8-дневных недель. Обработывались полученные данные с использованием программного обеспечения SeaDAS 6.3. Осреднённые за 8-дневный период значения указанных характеристик были получены по отдельным точкам, выбранным для каждой зоны (соответственно четыре и шесть точек в областях, прилегающих к Амурскому (ЗАЗ) и Уссурийскому заливам (ЗУЗ), восемь в ЗПТ). ЗАЗ и ЗУЗ относятся к ЗШ. Полученные для временного ряда значения приводились к 1. Для сравнения со спутниковыми значениями Кхл использовались судовые данные, полученные в рейсе НИС "Академик М.А. Лаврентьев", время проведения которого (с 26.02 по 09.03.2003) практически совпало с цветением в ЗШ. При сравнении спутниковых с судовыми значениями Кхл использовались суточные 4 км и 1 км спутниковые данные с MODIS-Aqua алгоритма OC3M (O'Reilly et al., 2000). Расхождение между спутниковыми и судовыми значениями Кхл по времени измерения со-

ставляло 1, 2 суток на станциях 19–28, для остальных станций меньше суток. Спутниковое значение $K_{хл}$ рассчитывается по данным восходящего излучения моря, которое формируется в приповерхностной толще вод. Для учёта неравнозначности спутниковых и судовых значений $K_{хл}$ по глубине измерения рассчитывалось скорректированное судовое значение с учётом вертикального профиля $K_{хл}$ и коэффициента ослабления света (Gordon et al., 1983). Коэффициент ослабления света оценивался по глубине видимости диска Секки (Шифрин, 1983). При расчёте скорректированного судового значения $K_{хл}$ мы считали, что восходящее излучение моря формируется в верхнем слое воды, ограниченном 20–25 % глубины эвфотической зоны (Gordon et al., 1975). Также сравнивались суточные 1 км распределения $K_{хл}$, FLH при их максимумах во временном ходе и $a_{dg}(443)_{QAA}$.

Временная изменчивость $K_{хл}$, $\Phi_{хл}$, поглощения света детритом и РОВ

Максимум зимне-весеннего цветения фитопланктона, вызванного уменьшением глубины перемешанного слоя вод ЗШ, согласно значениям FLH в 2003–2007 гг. приходился на 4–9 неделю от начала года, по значениям $K_{хл}$ – на 4–10 неделю, а вод ЗПТ – на 13–17 неделю как по данным FLH, так и по данным $K_{хл}$. На *рис. 2* показан временной ход рассматриваемых био-оптических характеристик. Для создания более полной картины идущих процессов приводятся гидрометеорологические характеристики, рассмотренные в нашей предыдущей работе (Штрайхерт и др., 2012). Во временном ходе $K_{хл}$, FLH, $a_{dg}(443)_{GSM}$ и $a_{dg}(443)_{QAA}$ во время зимне-весеннего цветения нами были отмечены следующие закономерности. Для ЗШ было характерно наличие двух пиков $K_{хл}$. Максимум $K_{хл}$ в одни годы приходился на первый пик, в другие – на второй. Второй пик $K_{хл}$ следовал за первым, как правило, через один 8-дневный период. Он сопровождался максимумом поглощения света детритом и РОВ. В некоторых случаях второй пик $K_{хл}$ наблюдался на следующей неделе, например для ЗАЗ в 2004 г. (*рис. 2*). Деструкционные процессы органического вещества в морских и континентальных водоёмах происходят благодаря сообществам бактериопланктона. На распределение микроорганизмов влияют физические, химические, гидрологические, антропогенные и биологические факторы среды (Павлова, Макаревич, 2011). Отмечена обратная зависимость численности бактериопланктона от уровня солёности гипергалинных вод (Селиванова, 2007). Поэтому, возможно, колебание солёности в сторону распреснения воды в ЗАЗ, привело к большей скорости разложения органического вещества и возрастанию поглощения света РОВ и детритом и, как следствие, повышенной наблюдаемой $K_{хл}$ на следующей после первого пика $K_{хл}$ неделе. Пик FLH, как правило, совпадал с первым пиком $K_{хл}$, либо наблюдался

после него уже при уменьшении Кхл как, например, для ЗАЗ в 2007 г. (рис. 2). На втором пике Кхл отмечалось уменьшение FLH. При сравнении распределений био-оптических характеристик, взятых за отдельные дни (23.02 на 7-й неделе и 12.03.2004 на 9-й неделе) соответствующие пикам Кхл (рис. 3) можно видеть уменьшение FLH при увеличении Кхл и поглощении света детритом и РОВ. Этот эффект также отражён во взаимосвязях между FLH и Кхл (рис. 4а) и Кхл (спутниковой) и $a_{dg}(443)_{QAA}$ (рис. 4б), построенным по шести точкам из десяти выбранных первоначально для ЗШ. Четыре точки, расположенные ближе к берегу, при построении этих взаимосвязей были убраны, так как спутниковое значение Кхл в них от 23.02 к 12.03.2004 уменьшалось. Построенные взаимосвязи статистически значимы на 95%-уровне значимости. Незначима только взаимосвязь между спутниковым значением Кхл и $a_{dg}(443)_{QAA}$ за 23.02. При построении взаимосвязей по всем десяти точкам коэффициенты корреляций увеличивались, картина по значимости полученных взаимосвязей оставалась прежней. Согласно построенному графику на 23.02 FLH была выше, чем на 12.03 (рис. 4а). На 23.02 поглощение света детритом и РОВ находится практически на одном постоянном уровне, тогда как на 12.03 высоким значениям Кхл соответствует высокое поглощение РОВ (рис. 4б). Уменьшение FLH на 12.03 свидетельствует об уменьшении реальной Кхл, а максимумы поглощения света детритом и РОВ и значения Кхл указывают на погрешность измерения Кхл. В ЗПТ практически во всех случаях наблюдалось совпадение пиков Кхл, FLH, поглощения света детритом и РОВ. Появление во временном ходе спутникового значения Кхл в ЗШ двух пиков в отличие от ЗПТ обусловлено, вероятно, различием процессов разложения продуктов жизнедеятельности фитопланктона, образующихся при цветении водорослей, при разных значениях температуры воды. В более холодной воде этот процесс идёт медленнее. Зима в 2007 г. по сравнению с другими годами была более тёплой. В ЗУЗ ТПМ была выше, чем в ЗАЗ. Здесь наблюдается один пик Кхл. Через три недели наблюдается ещё один пик Кхл, но без увеличения FLH. Его появление связано с интенсивным материковым стоком во время оттепели и выпадения атмосферных осадков, что подробнее будет рассмотрено далее.

В ЗШ после исчерпания фитопланктоном биогенных элементов в приповерхностном слое, обогащение ими этого слоя возможно, главным образом, с материковым стоком. Для ЗШ после завершения цветения фитопланктона в поверхностном слое прослеживаются нерегулярные периоды увеличения Кхл, обусловленные, по-видимому, изменениями материкового стока. Также в ЗАЗ прослеживается влияние весеннего паводка на реке Раздольной. На спутниковых изображениях Кхл в Амурском заливе в это время наблюдаются высокие Кхл. По суточным распределениям Кхл мы отметили, что пики Кхл в 2004 г на 12-й неделе (29.03-05.04.2004) и в 2007 г. на 15-й неделе (23-30.04.2007) связаны с паводком на реке Раздольной.

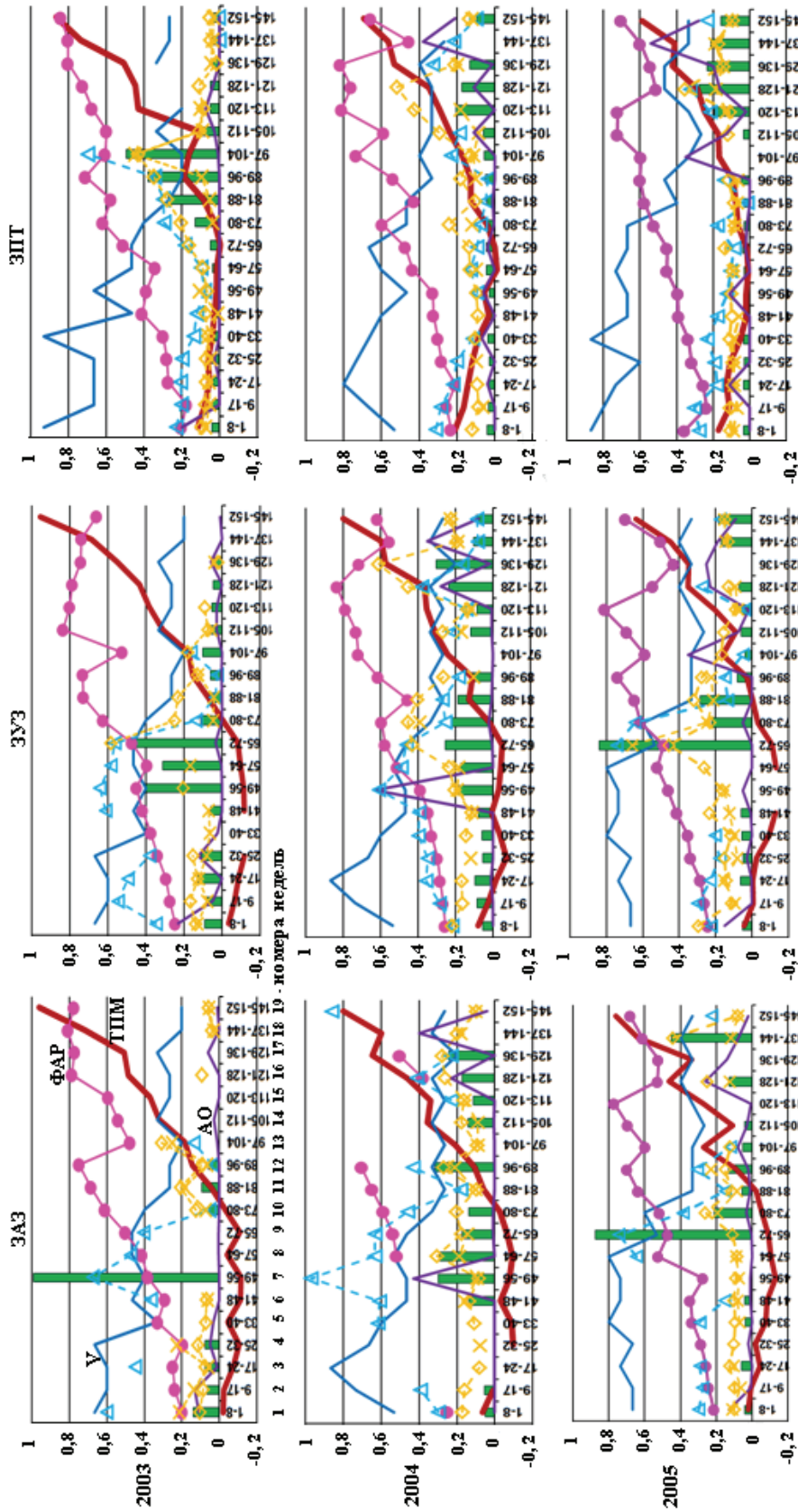


Рис. 2. Временная изменчивость по спутниковым данным Kchl (столбцы), FLH, $a_{ig}(443)$ GSM, $a_{ig}(443)$ QAA (прерывистые линии соответственно голубого цвета с треугольником и жёлтые линии с крестиком, ромбиком) и гидрометеорологических характеристик ТПМ (температура поверхности моря, красная линия), V (скорость ветра, синяя линия), ФАР (фотосинтетически активная радиация, розовая линия), АО (атмосферные осадки, фиолетовая линия), влияющих на зимне-весеннее цветение фитопланктона, с января по май (по оси абсцисс указаны 8-дневные периоды с начала года). Слева направо представлены характеристики в ZAZ, ZUZ, ZPT, в ЗПТ в 2003-2007гг. (сверху вниз). По оси ординат даются значения характеристик в относительных единицах, полученные нормированием на 1. Соответственно коэффициенты перерасчёта для представленных характеристик - 10 мг/м^3 , $0,03 \text{ мВт/(см}^2 \times \text{мкм} \times \text{ср)}$, $0,05 \text{ м}^{-1}$; для гидрометеорологических характеристик - 13°C , 15 м/сек , $60 \text{ Эйнтштейн/(м}^2 \times \text{день)}$, 10 мм/день

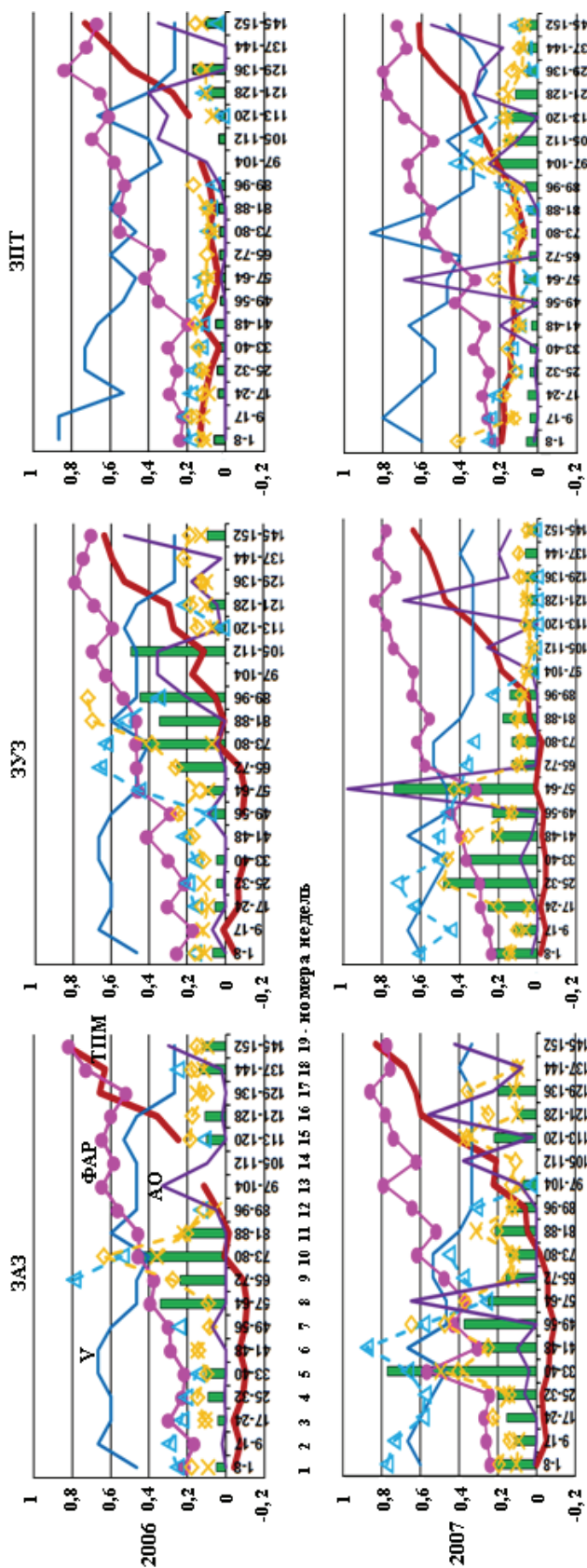


Рис. 2. Временная изменчивость по спутниковым данным Кхл (столбцы), FLH , a_{443} (443) GSM , a_{443} (443) QAA (прерывистые линии соответственно голубого цвета с треугольником и жёлтые линии с крестиком, ромбиком) и гидрометеорологических характеристик ТПМ (температура поверхности моря, красная линия), V (скорость ветра, синяя линия), ФАР (фотосинтетически активная радиация, розовая линия), АО (атмосферные осадки, фиолетовая линия), влияющих на зимне-весеннее цветение фитопланктона, с января по май (по оси абсцисс указаны 8-дневные периоды с начала года). Слева направо представлены значения характеристик в ЗАЗ, ЗУЗ, в ЗПТ в 2003-2007гг. (сверху вниз). По оси ординат даются значения характеристик в относительных единицах, полученные нормированием на 1. Соответственно коэффициенты перерасчёта для представленных характеристик - $10 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $0,03 \text{ мВт}/(\text{см}^2 \times \text{мкм} \times \text{ср})$, $0,05 \text{ м}^{-1}$; для гидрометеорологических характеристик - 13°C , $15 \text{ м}/\text{сек}$, $60 \text{ Эйнтштейн}/(\text{м}^2 \times \text{день})$, $10 \text{ мм}/\text{день}$

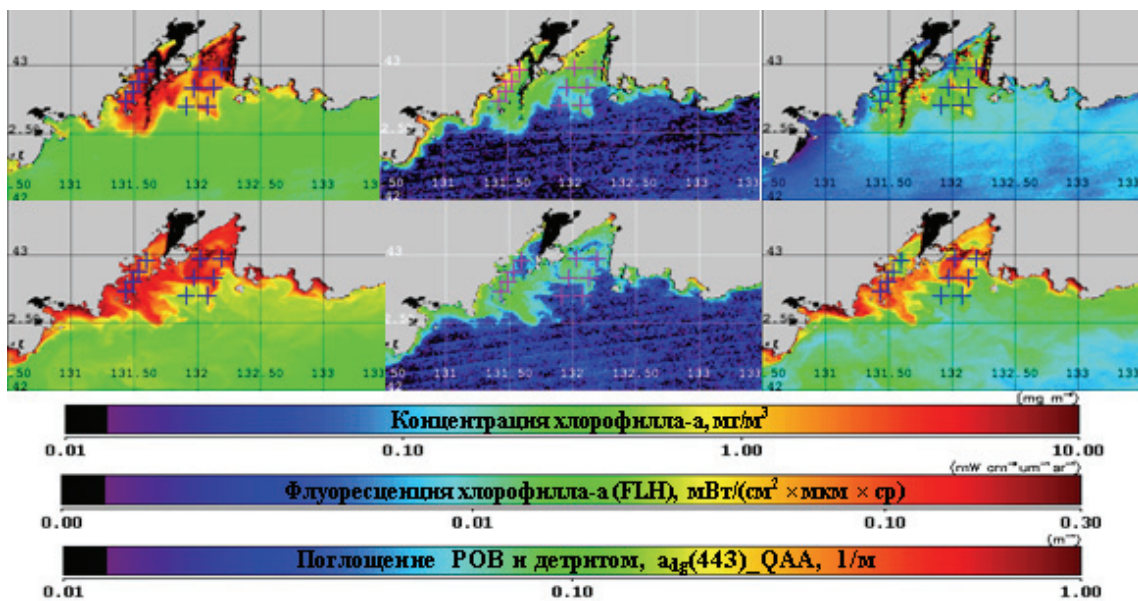


Рис. 3. Распределения K_{chl} , FLH , $a_{dg}(443)_{QAA}$ на 23.02 -54-й день (верхний ряд) и 12.03.2004 -72-й день (нижний ряд), выбранные по максимумам первых двух характеристик (крестиками показаны местоположения, в которых брались био-оптические характеристики)

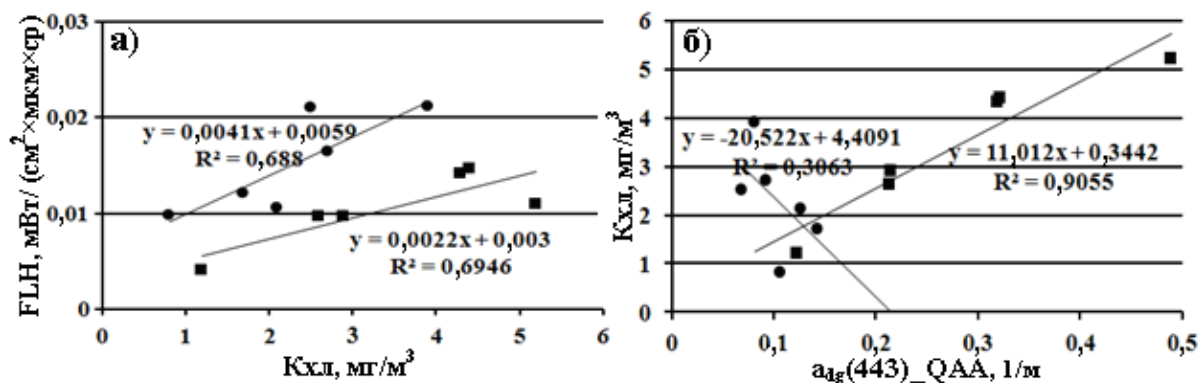


Рис. 4. Взаимосвязь между спутниковыми значениями а) FLH и K_{chl} ; б) K_{chl} и $a_{dg}(443)_{QAA}$, полученными по точкам в ЗШ на 23.02 (кружочки) и 12.03.2004 (квадратики)

Сравнение между спутниковыми и судовыми значениями K_{chl}

Сравнение между спутниковыми (1 км данные MODIS-Aqua) и скорректированными судовыми значениями K_{chl} (осреднёнными по верхнему слою воды) показало, что расхождение между ними от 8-й к 9-й неделе (период при котором наблюдался второй пик K_{chl}) увеличивается почти в 5 раз (рис. 5). Первые четыре станции, находящиеся в ЗШ, были выполнены на 8-й неделе. На 9-й неделе были выполнены станции, расположенные рядом с упомянутыми станциями. Только ст. 1 и 66 были разнесены. По судовым данным от 8-й (ст. 1, 2,3) к 9-й (ст. 66, 65, 64) неделе отмечалось уменьшение K_{chl} , тогда как по спутниковым данным K_{chl} увеличивалась, за исключением ст. 66 (рис. 2, 5). Спутниковая

Кхл на указанных станциях от 8-й к 9-й неделе увеличилась от 1,2 до 2,4 раза, в среднем в 1,7 раза. На ст. 66 спутниковая Кхл с 8-й по 9-ю недели уменьшалась с 3,8 до 3,1 мг/м³, тогда как скорректированное значение судовой Кхл составляло 0,75 мг/м³.

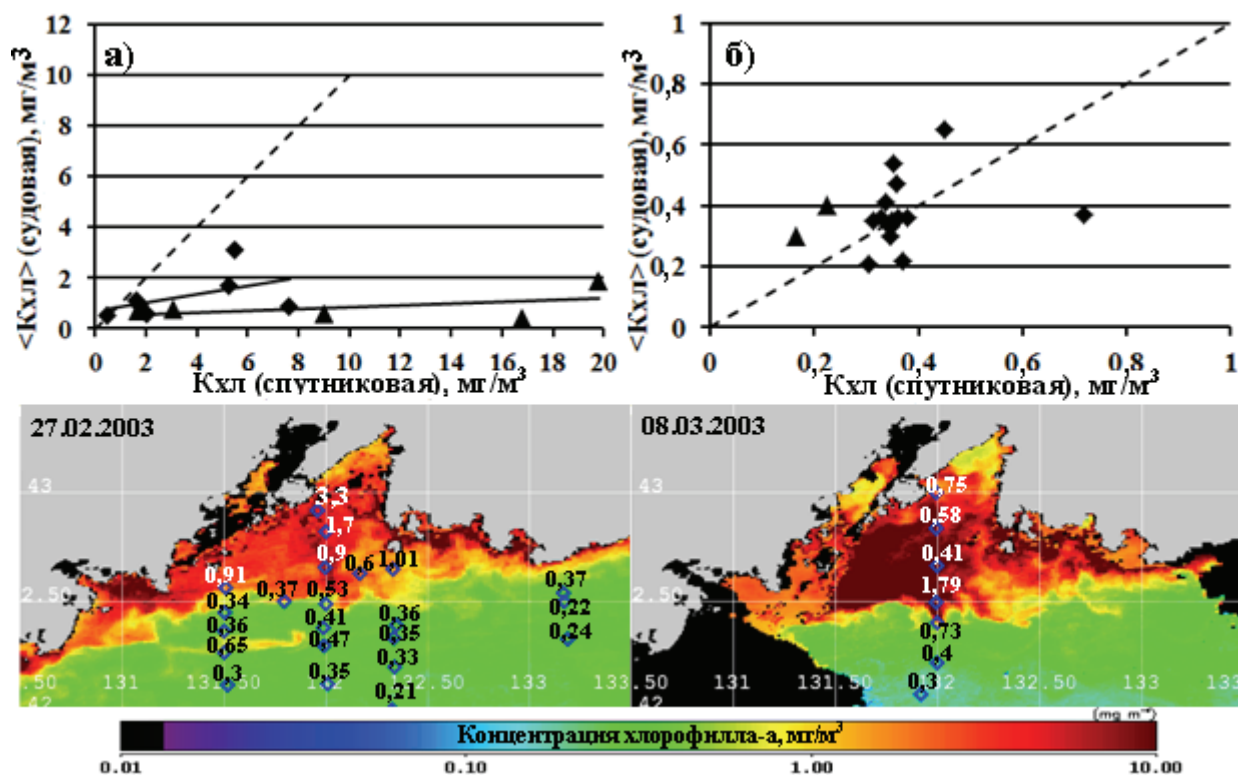


Рис. 5 Сравнение между спутниковыми (1 км) и судовыми значениями Кхл для станций, выполненных в период с 18.02 по 26.02 (8-я неделя, ромбики) и с 05.03 по 13.03.2003 (9-я неделя, треугольники) в ЗШ в районах ЗА3 и ЗУ3 и б) в мористой области. Прерывистая линия соответствует равнозначности сравниваемых значений. Внизу показаны местоположение судовых станций (номера станций указаны на рис. 1) и скорректированные значения судовой Кхл на спутниковых распределениях Кхл за 27.02 и 08.03.2003

Судовые значения Кхл в среднем уменьшались в 3 раза. Спутниковое 1 км значение Кхл на первых трёх станциях превышало скорректированное судовое значение соответственно в 1,7; 3,1; 8,5 раза, а на четвёртой наиболее мористой станции коэффициент пропорциональности между этими значениями Кхл был равен 0,94. На 9-й неделе для станций (ст. 66, 65, 64, 63 на рис. 1) практически совпадающих со станциями на 8-й неделе, коэффициент пропорциональности между спутниковым и скорректированным судовым значением Кхл возрос соответственно до 4,1; 15,7; 40,9; 10,4. Коэффициент пропорциональности между спутниковым 4 км значением с MODIS-Aqua и скорректированным судовым значением Кхл на указанных выше станциях был соответственно равен 1,6; 2,5; 9,3; 1,1- на 8-й неделе и 3; 9,4; 13,9; 2,9 – на 9-й неделе. В вертикальном распределении Кхл, необходимом при расчёте скорректированного судового значения Кхл, только на ст. 1 наблюдался максимум на поверхности (3,6 мг/м³). На ст. 2,3 максимум Кхл (2-3 мг/м³) на-

блюдался на глубине 25-50 м при Кхл на поверхности от 0,6 до 1,6 мг/м³. На станциях, расположенных за пределами шельфа, вертикальное распределение Кхл в пределах эвфотической зоны было однородным порядка 0,2–0,5 мг/м³. На ст. 8, 62, расположенных на свале глубин, на глубинах соответственно 60 и 130 м (вне эвфотической зоны) были отмечены повышенные по сравнению с верхними горизонтами Кхл около 1,5 мг/м³, что вероятно свидетельствует о резком опускании воды с поверхности на глубину. Термогалинные характеристики вод на этих горизонтах (соответственно -0,34°C; 33,88‰ и -0,73°C; 33,88‰), отличающиеся от характеристик вышележащих вод (0,19-0,31°C; 33,9‰ и 0,1-0,11°C и 33,91‰) и характерные для шельфовых вод, свидетельствуют также об опускании вод. Причиной этого, по всей видимости, являются процессы взаимодействия более холодных и менее солёных шельфовых вод с более тёплыми и солёными внешними водами. К 9-й неделе произошло уменьшение Кхл. На ст. 66 максимум Кхл (2,2 мг/м³) по сравнению со ст. 1 переместился на глубину 20 м. На станциях 65, 64 также произошло уменьшение Кхл до 0,7-1,1 мг/м³ в максимуме и до 0,4-0,7 мг/м³ на поверхности. На ст. 63, в отличие от предшествующих станций, на которых цветение уже завершалось, на 9-й неделе цветение только началось с максимумом на поверхности около 2 мг/м³. Различия в судовом значении Кхл на поверхности и скорректированного не превышали 12 % от значения на поверхностном горизонте. Наибольшие расхождения этих значений наблюдались на станциях с максимумом Кхл на поверхности, то есть на ст. 1, 63.

Изменчивость спутникового значения Кхл при влиянии стока органического вещества с побережья после оттепели и выпадения атмосферных осадков

Во временном ходе Кхл по спутниковым данным за 2007 г. вслед за максимумом Кхл на 4-й неделе через три недели на 8-й (с 26.02 по 05.03.2007) выделяется второй резкий интенсивный пик (*рис. 2*). При этом пике наблюдается резкое увеличение показателя поглощения света детритом и РОВ и количества атмосферных осадков. По суточным данным с разрешением 0,25°×0,25° со спутника TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), полученным при помощи системы Giovanni агентства НАСА (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>), и данным гидрометеорологической станции “Владивосток” с сайта <http://meteo.infospace.ru> выпадение атмосферных осадков и оттепель наблюдались 26.02. По представленным на *рис. 6* распределениям био-оптических характеристик за 24.02 и 28.02.2007 можно сделать вывод, что спутниковые значения Кхл к 28.02.2007 возросли вследствие увеличения их погрешности в связи с ростом содержания детрита и РОВ в воде.

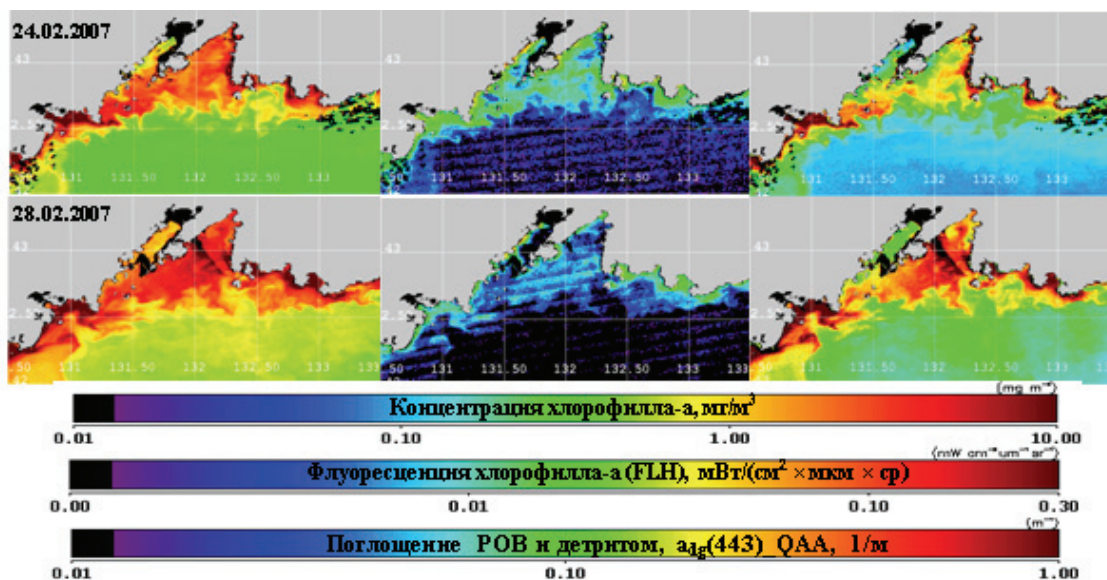


Рис. 6. Распределения K_{chl} , FLH , $a_{dg}(443)_{QAA}$ на 24.02 -55-й день (верхний ряд) и 28.02 -59-й день (нижний ряд) 2007 г., выбранные для сравнения изменчивости био-оптических характеристик до оттепели и выпадения атмосферных осадков и после

Заключение

Таким образом, показано, что второй пик во временном ходе K_{chl} по спутниковым данным для вод ЗШ во время зимне-весеннего цветения фитопланктона обусловлен возрастанием погрешности значения K_{chl} . Увеличение погрешности K_{chl} связано с возрастанием поглощения света детритом и РОВ, образующимся в процессе жизнедеятельности фитопланктона. В отличие от ЗПТ, где наблюдался один пик K_{chl} , цветение в ЗШ шло при более низкой температуре ((-1)-1°C против 2–6°C), что, по-видимому, повлияло на скорость разложения органического вещества и, следовательно, на изменчивость погрешности спутникового значения K_{chl} . Отмечено, что изменчивость погрешности спутникового значения K_{chl} в ЗПВ, может быть также вызвана стоком органического вещества при выпадении атмосферных осадков и оттепели в зимнее время, также паводками на реках, например на реке Раздольной, являющейся наиболее крупной из рек, впадающих в ЗПВ.

Литература

1. Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Ведерников В.И. Подспутниковые измерения цвета океана: верификация спутниковых данных сканера цвета SeaWiFS // *Океанология*. 2000. Т. 40. № 3. С. 357–362.
2. Павлова М.А., Макаревич Е.В. Исследование гетеротрофного бактериопланктона и его основных морфофизиологических групп // *Успехи современного естествознания*. 2011. № 8. С. 56–57.
3. Салюк П.А., Стёпочкин И.Е., Голик И.А., Букин О.А., Павлов А.Н., Алексанин А. И., Косолапкин Г.Ю. Разработка эмпирических алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла-а и окрашенных растворенных органических веществ для Дальневосточных морей из дистанционных данных по цвету водной поверхности // *Исследование Земли из космоса*. 2013. №3.
4. Селиванова Е.А. Симбиотические связи микроорганизмов в планктонных сообществах солёных водоёмов: Автореф. дис. к-та мед. наук: 03.00.07, Оренбург, 2007. 22 с.
5. Сёмкина Г.И. Фитопланктон Тихого океана // М.: Изд-во Наука, 1974. 239 с.

6. *Фефилов Ю.В.* Разработка и создание информационной технологии дистанционного определения параметров первичной продуктивности в системах мониторинга океана : Автореф. дис. к-та техн. наук: 05.13.11, Москва, 2003. 19 с.
7. *Шифрин К.С.* Введение в оптику океана // Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 5–57.
8. *Штрайхерт Е.А., Захарков С.П., Дьяков С.Е.* Коррекция спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а для Японского моря // Исследование Земли из космоса. 2006. № 6. С. 72–82.
9. *Штрайхерт Е.А., Захарков С.П., Гордейчук Т.Н., Шамбарова Ю.В.* О механизме зимне-весеннего цветения фитопланктона в заливе Петра Великого и прилегающей к нему части // Вестник ДВО РАН. 2012. № 6. С. 81–88.
10. *Behrenfeld M.J., Westberry T.K., Boss E.S., O'Malley R.T., Siegel D.A., Wiggert J.D., Franz B.A., McClain C.R., Feldman G.C., Doney S.C., Moore J.K., Dall'Olmo G., Milligan A.J., Lima I., Mahowald N.* Satellite-detected fluorescence reveals global physiology of ocean phytoplankton // Biogeosciences. 2009. Vol. 6. P. 779–794.
11. *Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Ershova S.V., Evdoshenko M.A.* Bio-optical characteristics retrieved from satellite ocean color data // The Eastern Mediterranean as Contrasting Ecosystems. 1999. P. 313–326.
12. *Gordon H.R., Clark D.K., Brown J.W., Brown O.B., Evans R.H., Broenkow W.W.* Phytoplankton pigment concentrations in the middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates // Applied Optics. 1983. Vol. 22. No. 1. P. 20–36.
13. *Gordon H.R., McCluney W.R.* Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing // Appl. Opt. 1975. Vol. 14. P. 413–416.
14. IOCCG. Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications. Lee Z. P. (ed.). Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group. Dartmouth. Canada, 2006. No. 5. P. 73–85.
15. *Jo C.O., Kim K.R.* Effects of melting sea ice in the Tatarskiy Strait on spring bloom along the Primorye coast in the East Sea // Far-eastern sea shelf ecosystems of yesterday, today, and tomorrow. PICES, Vladivostok, Russia. 2005. P. 8.
16. *Kim S., Saiton S., Ishizaka J., Isoda Y., Kishino M.* Temporal and Spatial Variability of Phytoplankton Pigment Concentrations in the Japan Sea Derived from CZCS Images // J. of Oceanography. 2000. Vol. 56. P. 527–538.
17. *Kim H., Yoo S., Oh I.* Relationship between phytoplankton bloom and wind stress in the sub-polar frontal area of the Japan/East Sea // J. of Marine Systems. Vol. 67. 2007. P. 205–216.
18. *Lim S., Jang C., Oh I., Park J.* Climatology of the mixed layer depth in the East Sea (Japan Sea) // J. of Marine Systems. 2012. Vol. 96-97. P.1–14.
19. *O'Reilly, J.E., Maritorena S., O'Brien M. C. et al.* SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3 // NASA Technical Memorandum. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2000. Vol. 11. P. 9–23.
20. *Salyuk P., Bukin O., Alexanin A., Pavlov A., Mayor A., Shmirko K., Akmaykin D., Krikun V.* Optical properties of Peter the Great Bay waters compared with satellite ocean colour data // International Journal of Remote Sensing. Vol. 31, No. 17-18. 2010. P. 4651–4664.
21. *Sverdrup H.U.* On conditions for the vernal blooming of phytoplankton // J. Conseil. Explor. Mer. 1953. Vol. 18, No. 3. P. 287–295.
22. *Yamada K., Ishizaka J., Yoo S., Kim H., Chiba S.* Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll-a concentration in the Japan/East Sea (JES) // Progress in Oceanography. 2004. Vol. 61. P. 193–211.
23. *Zakharkov S.P., Lobanov V.B., Mitchell B.G., Sovetnikova L.N.* The production parameters of phytoplankton in the Japan Sea in winter and spring 2000. PICES, Hakodate, Hokkaido, Japan. 2000. P. 159.

Chlorophyll-a concentration and bio-optical characteristics in the Peter the Great Bay (Sea of Japan) during winter-spring phytoplankton bloom

E.A. Shtraikhert, S.P. Zakharkov, T.N. Gordeychuk, Ju.V. Shambarova

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS
Vladivostok 690041, Russia
E-mail: straj@poi.dvo.ru*

Predominance of the light absorption by detritus and yellow substance in comparison with the absorption by phytoplankton pigments leads to the overestimation of satellite chlorophyll-a concentration values. Variability of the detritus and yellow substance content in water from start to end of the phytoplankton bloom in the surface water

layer or at the runoff from coast can lead to variability of the difference between the satellite and real chlorophyll-a concentration values. Therefore, the increase or maximum of chlorophyll-a concentration, which are observed according to the satellite data, can not exist in reality. Temporal variability of chlorophyll-a concentration by means of satellite data and the influence of the variations of the detritus and yellow substance content in water on this variability for two areas of the Peter the Great Bay with the adjacent part, which differ in the temperature of the winter-spring phytoplankton bloom, were investigated in this work. According to the satellite data, averaged for 8-day, it is implemented the comparison between the temporal variability of the chlorophyll-a concentration and the variability of other satellite ocean color products, characterizing the phytoplankton vital functions (fluorescence of chlorophyll-a and light absorption by detritus and yellow substance), in shelf zone and the zone of the Primorye Current from January to May of 2003–2007. According to the daily satellite data, the relationships between the chlorophyll-a concentration and the above mentioned characteristics of ocean color at the observed peaks of chlorophyll-a concentrations were analyzed. The influence of light absorption by detritus and yellow substance on variability of error of satellite chlorophyll-a concentration values is shown. A comparison between the satellite and shipboard chlorophyll-a concentration values for the shelf zone was carried out at two temporal phytoplankton bloom periods, which followed one another and were characterized by increasing light absorption by detritus and yellow substance. The comparison showed growing discrepancy between these data. As a result, according to the satellite data the chlorophyll-a concentration from the first to the second of these periods increased, while according to the shipboard data, it decreased. An example of the increase of the satellite chlorophyll-a concentration value at the increase of light absorption by detritus and yellow substance caused by the runoff of organic matter from the coast as a result of precipitation is also considered.

Keywords: SeaWiFS, MODIS-Aqua, concentration and fluorescence of chlorophyll -a, light absorption by detritus and yellow substance, phytoplankton bloom.

References

1. Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Vedernikov V.I. Podsputnikovyie izmereniya tsveta okeana: verifikatsiya sputnicovykh dannyyh skannera tsveta SeaWiFS (Sub-satellite measurements of the ocean color: Validation of the SeaWiFS Data), *Okeanologiya*, 2000, Vol. 40, No. 3, pp. 357–362.
2. Pavlova M.A., Makarevich E.B. Issledovanie geterotrofnogo bakterioplanktona i ego osnovnykh morfologicheskikh grupp (Research of heterotrophic bacterioplankton and its main morphological groups), *Uspechi sovremennogo estestvoznaniya*, 2011, pp. 56–57.
3. Salyuk P.A., Steepochkin I.E., Golik I.A., Bukin O.A., Pavlov A.N., Aleksanin A.I. Razrabotka yempericheskikh algoritmov vosstanovleniya koncentratsii klorofilla-a i okrashennykh rastvorenykh organicheskikh veschestv dlya Dal'nevostochnyykh morei iz distantsionnykh dannyyh po tsvetu vodnoi poverkhnosti (Development of empirical algorithms for chlorophyll-a and colored dissolved organic matter concentrations estimation from water remote sensed data in the Far Eastern seas), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2013, No. 3, pp. 45–57.
4. Selivanova E.A. *Simbioticheskiye svyazi mikroorganizmov v planktonnykh soobshchestvakh solenyykh vadoemov. Avtoref. diss. kand. med. nauk* (Symbiotic relationships of microorganisms in the plankton communities of salt reservoirs): Synopsis Diss. cand. med. sci., Orenburg, 2007, 22 p.
5. Semina G.I. *Fitoplankton Tikhogo okeana* (Pacific Ocean phytoplankton), Moscow: Nauka, 1974, 239 p.
6. Fefilov Yu.V. *Razrabotka i sozdaniye informatsionnoi tehnologii distantsionnogo opredeleniya parametrov pervichnoi produktivnosti v sistemakh monitoringa okeana. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* (Development and creation of information technology for remote determination of the primary productivity parameters in the ocean monitoring systems. Synopsis Diss. cand. tech. sci.), Moscow, 2003. 19 p.
7. Shifrin K.S. *Vvedeniye v optiku okeana* (Introduction to ocean optics), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983.
8. Shtraikhert E.A., Zakharkov S.P., D'yakov S.E. Korrektsiya sputnikovykh otsenok kontsentratsii klorofilla-a dlya Yaponskogo morya (Correction of the satellite estimations on the basis of the shipboard measurements of chlorophyll-a concentration for the Sea of Japan), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2006, No. 6, pp. 72–82.
9. Shtraikhert E.A., Zakharkov S.P., Gordeichuk T.N., Shambarova Yu.V. O mekhanizme zimne-vessenego tsveteniya fitoplanktona v zalive Petra Velikogo i prilegayuschei k nemu chasti (About the mechanism of winter-spring phytoplankton bloom in Peter the Great Bay and the adjacent part based on satellite data), *Vestnik DVO RAN*, 2012, No. 6, pp.81–88.
10. Behrenfeld M.J., Westberry T.K., Boss E.S., O'Malley R.T., Siegel D.A., Wiggert J.D., Franz B.A., McClain C.R., Feldman G.C., Doney S.C., Moore J.K., Dall'Olmo G., Milligan A.J., Lima I., Mahowald N. Satellite-detected fluorescence reveals global physiology of ocean phytoplankton, *Biogeosciences*, 2009, Vol. 6, pp. 779–794.
11. Burenkov V.I., Kopelevich O.V., Sheberstov S.V., Ershova S.V., Evdoshenko M.A. Bio-optical characteristics retrieved from satellite ocean color data, *The Eastern Mediterranean as Contrasting Ecosystems*, 1999, pp. 313–326.

12. Gordon H.R., Clark D.K., Brown J.W., Brown O.B., Evans R.H., Broenkow W.W. Phytoplankton pigment concentrations in the middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates, *Applied Optics*, 1983, Vol. 22, No. 1, pp. 20–36.
13. Gordon H.R., McCluney W.R. Estimation of the depth of sunlight penetration in the sea for remote sensing, *Applied Optic*, 1975, Vol. 14, pp. 413–416.
14. IOCCG. Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications, Lee Z. P. (ed.). *Reports of the International Ocean-Color Coordinating Group*, Dartmouth, Canada, 2006, No. 5, pp. 73–85.
15. Jo C.O., Kim K.R. Effects of melting sea ice in the Tatarskiy Strait on spring bloom along the Primorye coast in the East Sea, Far-eastern sea shelf ecosystems of yesterday, today, and tomorrow. *Abstracts of PICES*, Vladivostok, Russia, 2005, p. 8.
16. Kim S., Saiton S., Ishizaka J., Isoda Y., Kishino M. Temporal and Spatial Variability of Phytoplankton Pigment Concentrations in the Japan Sea Derived from CZCS Images, *J. of Oceanography*, 2000, Vol. 56, pp. 527–538.
17. Kim H., Yoo S., Oh I. Relationship between phytoplankton bloom and wind stress in the sub-polar frontal area of the Japan/East Sea, *J. of Marine Systems*, Vol. 67, 2007, pp. 205–216.
18. Lim S., Jang C., Oh I., Park J. Climatology of the mixed layer depth in the East Sea (Japan Sea), *J. of Marine Systems*, 2012, Vol. 96-97, pp. 1–14.
19. O'Reilly, J.E., Maritorena S., O'Brien M. C. et al. *SeaWiFS Postlaunch Calibration and Validation Analyses, Part 3, NASA Technical Memorandum*. Greenbelt, Maryland: NASA Goddard Space Flight Center, 2000, Vol. 11, pp. 9–23.
20. Salyuk P., Bukin O., Alexanin A., Pavlov A., Mayor A., Shmirko K., Akmaykin D., Krikun V. Optical properties of Peter the Great Bay waters compared with satellite ocean colour data, *International Journal of Remote Sensing*, 2010, Vol. 31, No. 17–18, pp. 4651–4664.
21. Sverdrup H.U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton, *J. Conseil. Explor. Mer.*, 1953, Vol. 18, No. 3, pp. 287–295.
22. Yamada K., Ishizaka J., Yoo S., Kim H., Chiba S. Seasonal and interannual variability of sea surface chlorophyll-a concentration in the Japan/East Sea (JES), *Progress in Oceanography*, 2004, Vol. 61, pp. 193–211.
23. Zakharkov S.P., Lobanov V.B., Mitchell B.G., Sovetnikova L.N.. The production parameters of phytoplankton in the Japan Sea in winter and spring 2000, *Abstracts of PICES*, Hakodate, Hokkaido, Japan, 2000, p. 159.