

УДК 550.47; 551.464.7

Е.А. ШТРАЙХЕРТ, С.П. ЗАХАРКОВ

Сезонные и суточные распределения показателей содержания фитопланктона, органического вещества, взвеси в Амурском заливе и прилегающей области по спутниковым данным

Анализируется сезонный ход показателей содержания фитопланктона, органического вещества, взвеси в трех областях Амурского залива и прилегающей области в 2013–2014 гг. по данным цвета вод со спутниковых датчиков MODIS-Aqua и GOCI-COMS. Определены особенности этого временного хода при его сопоставлении с изменением температуры поверхности моря, скорости и направления ветра, количеством атмосферных осадков. Выделены способствующие образованию придонной гипоксии вод ситуации, которые рассматривались отдельно по суточным пространственным распределениям параметров цвета вод.

Ключевые слова: фитопланктон, органическое вещество, взвесь, гипоксия придонных вод, MODIS-Aqua и GOCI-COMS, зал. Петра Великого.

Seasonal and diurnal distributions of the phytoplankton, organic and suspended matter contents indicators in the Amur Bay and the adjacent area according to satellite data. E.A. SHTRAIKHERT, S.P. ZAKHARKOV (V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, FEB RAS, Vladivostok).

Seasonal course of the phytoplankton, organic and suspended matter contents indicators in three areas of the Amur Bay and the adjacent area during 2013–2014 according to the data on water color (WC) from the MODIS-Aqua and GOCI-COMS satellite sensors is analyzed. Features of this time variation at its comparing with change of the sea surface temperature, the wind speed and direction, the precipitation quantity are revealed. Separate cases have been distinguished as contributing to the formation of near-bottom water hypoxia. These cases were separately considered using the diurnal spatial distributions of WC parameters.

Key words: phytoplankton, organic matter, suspended matter, near-bottom water hypoxia, MODIS-Aqua and GOCI-COMS, Peter the Great Bay.

Одним из направлений применения спутниковых данных о цвете вод является мониторинг изменения их состояния (изучение и выявление случаев «цветения» фитопланктона и эвтрофикации вод, загрязнения органическим веществом, увеличения содержания взвеси) [27]. Временная серия площадных спутниковых наблюдений характеристик цвета океана (концентрация и флуоресценция хлорофилла-а – K_{chl} , Φ_{chl} , показатели поглощения света детритом и желтым веществом – a_{dg} , обратного рассеяния света взвешенными частицами – b_{sp}), отображающих содержание фитопланктона, органического вещества, взвеси, позволяет при отсутствии облачности получить информацию о преобладающих в данное время в конкретном месте биогеохимических процессах, проследить за их

*ШТРАЙХЕРТ Елена Аркадьевна – кандидат географических наук, научный сотрудник, ЗАХАРКОВ Сергей Петрович – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник (Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток). *E-mail: straj@poi.dvo.ru

изменением. На основе этого можно выделить ситуации, способствующие образованию гипоксии вод, предварительно изучив случаи ее появления, обнаруженные по наблюдениям *in situ* [21, 27].

По *in situ* данным в конце лета – начале осени выявлены случаи гипоксии вод в зал. Петра Великого (ЗПВ) – в Амурском заливе и в районе Дальневосточного морского биосферного заповедника ДВО РАН (ДМБЗ) к юго-западу от о-ва Фуругельма. Области гипоксии вод располагались, как правило, во впадинах морского дна, где глубина бассейна превышала глубину эвфотического слоя [9–11]. Основная причина образования гипоксии придонных вод – бактериальное разложение органического вещества в условиях низких обменных процессов, в частности при стратификации вод. Избыточное поступление в Амурский залив органического вещества, как правило, связывают с эвтрофикацией вод, возникающей после паводков на р. Раздольная, одной из наиболее крупных рек Южного Приморья. Образование гипоксии вод у о-ва Фуругельма связывают с возможным влиянием Туманной – самой крупной реки на юге Приморья, и материковым стоком со стороны зал. Посьета. На содержание кислорода в воде оказывает влияние изменение мутности вод вследствие изменения при этом глубины эвфотического слоя и, следовательно, условий жизнедеятельности фотосинтезирующих растений. Изменение мутности вод и потребление фитопланктоном биогенных элементов зависят от материкового стока, на который оказывает существенное влияние выпадение атмосферных осадков. Кроме того, образование гипоксии придонных вод в Амурском заливе связывают с ветрами южных направлений, вызывающими даунвеллинг вод, а разрушение стратификации и слоя гипоксии вод – с ветрами северных направлений [26].

В изучаемом нами районе (рис. 1) в Амурский залив помимо упомянутых впадают более мелкие реки Камышовая, Цукановка, Гладкая, Пойма, Нарва, Барабашевка, Амба, Шмидтовка, Седанка, Богатая и др. На реках Седанка и Богатая расположены водохранилища.

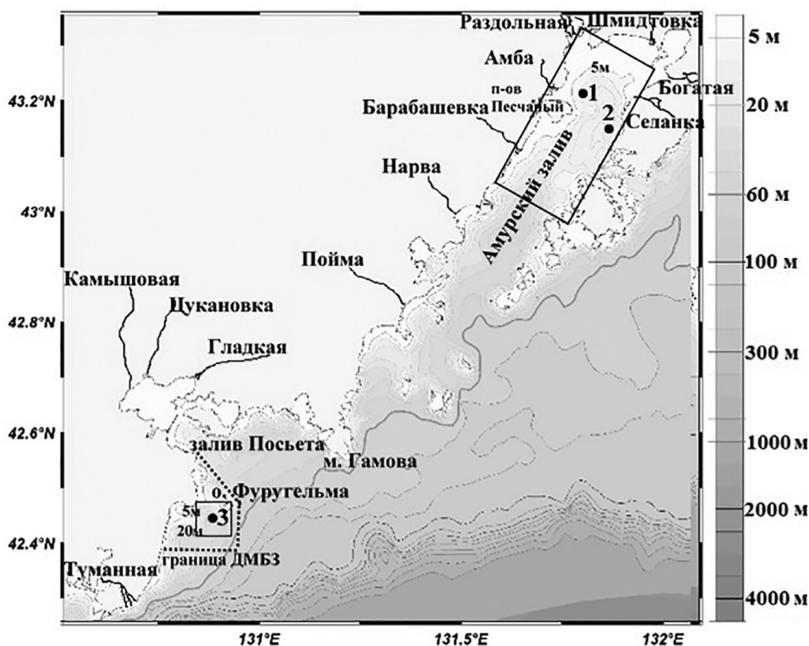


Рис. 1. Район исследования. Показаны места впадения наиболее крупных рек в Амурский залив и прилегающую область. На р. Богатая и р. Седанка отмечены водохранилища. 1–3 – точки, в которых анализировался сезонный ход показателей K_{chl} и Φ_{chl} , a_{0g} , b_{hp} . Сплошной линией показаны районы, где, согласно литературным данным, зафиксированы случаи гипоксии придонных вод (батиметрическая карта взята с сайта http://pacificinfo.ru/data/cdrom/11/img/3_1_2/pgb_bathy.png, шкала справа показывает глубины)

Амурский залив подвержен сильному антропогенному влиянию, так как сюда поступают сточные воды г. Владивосток и других населенных пунктов.

Цель работы: 1) по спутниковым данным определить особенности сезонного хода показателей содержания фитопланктона, желтого вещества с детритом, взвеси в точках 1–3 (рис. 1) в 2013 и 2014 гг., сопоставив его с ходом температуры поверхности моря ($T_{\text{пм}}$), направлением ветра и количеством атмосферных осадков ($K_{\text{ао}}$); 2) проанализировать пространственные распределения указанных показателей цвета вод с повышенными значениями при определенных гидрометеорологических условиях, отметить ситуации, способствующие образованию гипоксии вод.

Материалы и методы

В районе исследования (рис. 1) в точках 1–3 по ежесуточным данным MODIS-Aqua получены данные о сезонном ходе показателей $K_{\text{хл}}$ и $\Phi_{\text{хл}}$, $a_{\text{дг}}$, $b_{\text{бр}}$ для 2013–2014 гг. Так как оценки этих параметров основаны на анализе спектра яркости моря, помимо основных оптически активных компонентов (ОАК) – фитопланктона, желтого вещества, детрита, взвеси – незначительный вклад вносят микроскопические организмы – гетеротрофные бактерии и вирусы [22], играющие важную роль в биогеохимических процессах. Вирусы разрушают клетки фито- и бактериопланктона, что приводит к высвобождению органического вещества. Показатель органического вещества и бактериальная продукция (БП) связаны между собой [3], поэтому уровень БП также может служить признаком образования гипоксии вод. Продукты разложения этих организмов, как и фитопланктона, присутствуют в воде в виде детрита [22].

Спектры поглощения излучения детритом и желтым веществом неразличимы, поэтому поглощение ими света описывается одной компонентой [16]. Желтое вещество, или, иначе, окрашенные растворенные органические вещества (ОРОВ) – группа органических растворенных веществ, состоящая из гуминовых и фульвокислот. Они имеют местное происхождение (например, образуются вследствие деградации клеток фитопланктона и других органических частиц) или могут быть принесены с материковым стоком [22].

Спутниковое значение $K_{\text{хл}}$ зависит от коэффициента яркости моря и, следовательно, от относительного содержания ОАК [2, 17, 22]. На прибрежные воды влияют в основном материковый сток и гидродинамические процессы, поэтому содержание и состав ОАК в воде часто меняются. В таких водах коррекция спутниковых значений весьма затруднена, они интересны и полезны для выявления изменчивости в распределении характеристик, обусловленной определенными процессами.

$K_{\text{хл}}$ при значениях выше $0,5 \text{ мг/м}^3$ и благоприятных для развития фитопланктона условиях можно охарактеризовать с помощью $\Phi_{\text{хл}}$ [22]. В спектре $\Phi_{\text{хл}}$ максимум наблюдается преимущественно при 685 нм [6]. $\Phi_{\text{хл}}$ зависит от $K_{\text{хл}}$, удельного коэффициента поглощения света фитопланктоном, потока ФАР и квантового выхода флуоресценции [15]. Испускание света, характерное для $\Phi_{\text{хл}}$, испытывает меньшее по сравнению с сине-зеленой областью влияние поглощения света ОРОВ и детритом [15, 16, 24]. $\Phi_{\text{хл}}$ дает информацию о $K_{\text{хл}}$ и физиологическом состоянии водорослей.

В прозрачных водах сигнал яркости моря и, следовательно, характеристики цвета вод зависят от типа дна (например, песчаное, каменное или населенное бентосными растениями и животными). В районах, подверженных влиянию речного и берегового стока, прозрачность вод резко уменьшается, поэтому влияние типа дна на сигнал яркости вод сводится к нулю [22]. Толщина слоя, в котором формируется сигнал яркости моря, – $20\text{--}25 \%$ от глубины эвфотической зоны [17, 18]. По результатам двух съемок в июле 2001 г. до и после паводка на р. Раздольная (расходы реки составляли соответственно около 50 и $150 \text{ м}^3/\text{с}$) в районе п-ова Песчаный, где глубина бассейна около 10 м , глубины эвфотической зоны были равны соответственно около 8 м и 6 м [5]. Следовательно, максимум слоя

формирования сигнала яркости моря – около 2 м. При продвижении к берегу указанные показатели глубин уменьшались.

Для получения сезонного хода параметров $K_{\text{хл}}$, $\Phi_{\text{хл}}$, $a_{\text{дг}}$, $b_{\text{бр}}$ и $T_{\text{пм}}$ и изучения их пространственных распределений использовались спутниковые данные уровня 2 MODIS-Aqua и GOCI-COMS для безоблачных ситуаций, полученные нами при обработке данных уровня 1, которые заказывали через сайт <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>. Обработку данных выполняли в программном обеспечении SeaDAS версий 6.4 и 7.3. При генерации данных уровня 2 использовали рекомендуемую для мутных прибрежных вод MUMM (Management Unit of the North Sea Mathematical Models) – атмосферную коррекцию [23]. Ее выполнение для шельфовых вод ЗПВ проверено в работах [1, 13, 24]. Параметр $K_{\text{хл}}$ при генерации данных уровня 2 рассчитывали по стандартным алгоритмам, применяемым для MODIS-Aqua и GOCI-COMS (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). $\Phi_{\text{хл}}$ – показатель, полученный по данным MODIS-Aqua. В этом случае $\Phi_{\text{хл}}$ представляет высоту линии флуоресценции хлорофилла-а на длине волны 678 нм, нормализованную на приходящее к поверхности моря излучение [15]. Показатели $a_{\text{дг}}$, $b_{\text{бр}}$ получены по квазианалитическому алгоритму QAA на длине волны 443 нм [21]. Данные датчиков MODIS-Aqua и GOCI-COMS имеют пространственное разрешение примерно 1×1 км в надире и 500×500 м на всем снимке соответственно. Они содержат информацию, получаемую в момент нахождения спутников над районом исследования. MODIS-Aqua находится над этим районом примерно в 3–4 ч по гринвичскому времени, а GOCI-COMS, имея геостационарную орбиту, постоянно и получает данные 8 раз в день в наиболее светлое время суток, с 0:16 UTC до 7:16 UTC (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>).

Полученный сезонный ход характеристик цвета вод и их пространственные распределения для отдельных дней сопоставлены с данными по $T_{\text{пм}}$, ветру (скорость и направление), $K_{\text{ао}}$. Метеорологическая информация с гидрометеорологических станций (ГМС) «Владивосток» и «Посъет» получена через сайт <http://tr5.ru>, данные по $K_{\text{ао}}$ – со спутника TRMM для районов, ограниченных координатами 42,5–43,5° с.ш.; 131–132,2° в.д. и 42,2–42,7° с.ш.; 130,5–131,2° в.д., включающих области нахождения ГМС «Владивосток» и «Посъет». Данные с TRMM получены через систему Giovanni (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>).

Результаты и обсуждение

Сезонный ход показателей содержания хлорофилла-а, органического вещества, взвеси по спутниковым данным. На рис. 2 (см. вклейку) показан сезонный ход показателей $K_{\text{хл}}$, $\Phi_{\text{хл}}$, $a_{\text{дг}}$, $b_{\text{бр}}$, $T_{\text{пм}}$, $K_{\text{ао}}$ в точках 1–3 в 2013 и 2014 гг. по ежесуточным данным MODIS-Aqua, ГМС, TRMM. В точке 3 по $K_{\text{хл}}$ и $\Phi_{\text{хл}}$ отчетливо прослеживаются два основных максимума – весенний и осенний, ассоциируемых с развитием фитопланктона. Весной увеличение $K_{\text{хл}}$ и $\Phi_{\text{хл}}$ наблюдается примерно с начала–середины марта. К данному периоду ветровое перемешивание вод ослабевает, а их температура начинает расти, сезонная освещенность увеличивается.

Для «цветения» фитопланктона важным является соотношение между глубиной эвфотической зоны и перемешанного слоя [19, 25]. Этим соотношением определяется наличие биогенных элементов и света – двух основных факторов, необходимых для развития фитопланктона [8]. Показатель $a_{\text{дг}}$ увеличивался по мере «цветения» фитопланктона из-за накопления в воде продуктов его жизнедеятельности. При этом вариации $a_{\text{дг}}$ связаны с ветровым перемешиванием вод, которое приводит к выносу на поверхность вод, более богатых органическим веществом. В результате таких вариаций показателя $a_{\text{дг}}$ меняется расхождение между спутниковыми и судовыми оценками $K_{\text{хл}}$ [13]. Относительно высокие значения $K_{\text{хл}}$ и $\Phi_{\text{хл}}$, ассоциируемые с весенним «цветением» фитопланктона, в 2013 г. наблюдались более продолжительное время (с начала марта по середину апреля),

чем в 2014 г. (с середины по конец марта). Возможно, более длительное «цветение» в 2013 г. связано с более медленным прогревом вод, более холодной зимой, чем в 2014 г. Как правило, в холодные зимы наблюдается более глубокая конвекция вод, и в результате – вынос к поверхности вод, более насыщенных биогенными элементами [4, 12]. Так, $T_{\text{пм}}$ на 30.03.2013 г. и 31.03.2014 г. составляла около 1 °С и 4 °С соответственно. Возможной причиной повышенных значений $\Phi_{\text{хл}}$ в зимний период является изменение ее квантового выхода при неблагоприятных для «цветения» фитопланктона условиях [6, 15].

Спутниковые данные о цвете вод в точке 1 отсутствуют в 2013 г. до конца апреля, в 2014 г. – до начала апреля из-за наличия льда в месте исследования. В 2014 г. после их появления перед паводком на р. Раздольная данные отсутствуют с конца апреля по конец июня из-за облачности. В 2013 г. максимумы показателей $\Phi_{\text{хл}}$, b_{bp} с начала по середину–конец мая связаны с паводком на р. Раздольная (рис. 2а, см. вклейку). При этом значения $K_{\text{хл}}$, в отличие от показателей $\Phi_{\text{хл}}$, не такие высокие, как во время осеннего «цветения» фитопланктона или в отдельных случаях при наличии северных ветров в летний период (например, 10.07.2013 г., когда отмечены высокие показатели a_{dg} (рис. 2, 3)). Относительно низкие значения $K_{\text{хл}}$ при весеннем паводке на р. Раздольная объясняются заметным влиянием на сигнал яркости моря обратного рассеяния света взвесью и низкими показателями a_{dg} . При невысоких значениях показателя b_{bp} низкие значения $K_{\text{хл}}$ можно объяснить сезонным заглублением пикноклина и опусканием вслед за ним фитопланктона. Высокие $K_{\text{хл}}$ при северных ветрах связаны со стонными явлениями, вызывающими подъем биогенных элементов и органического вещества из нижележащих слоев воды. В точке 2 увеличение указанных выше показателей соотносится с их изменением в точке 1, но эти значения заметно меньше. В период летнего минимума развития фитопланктона случаи увеличения упоминаемых выше характеристик соотносятся

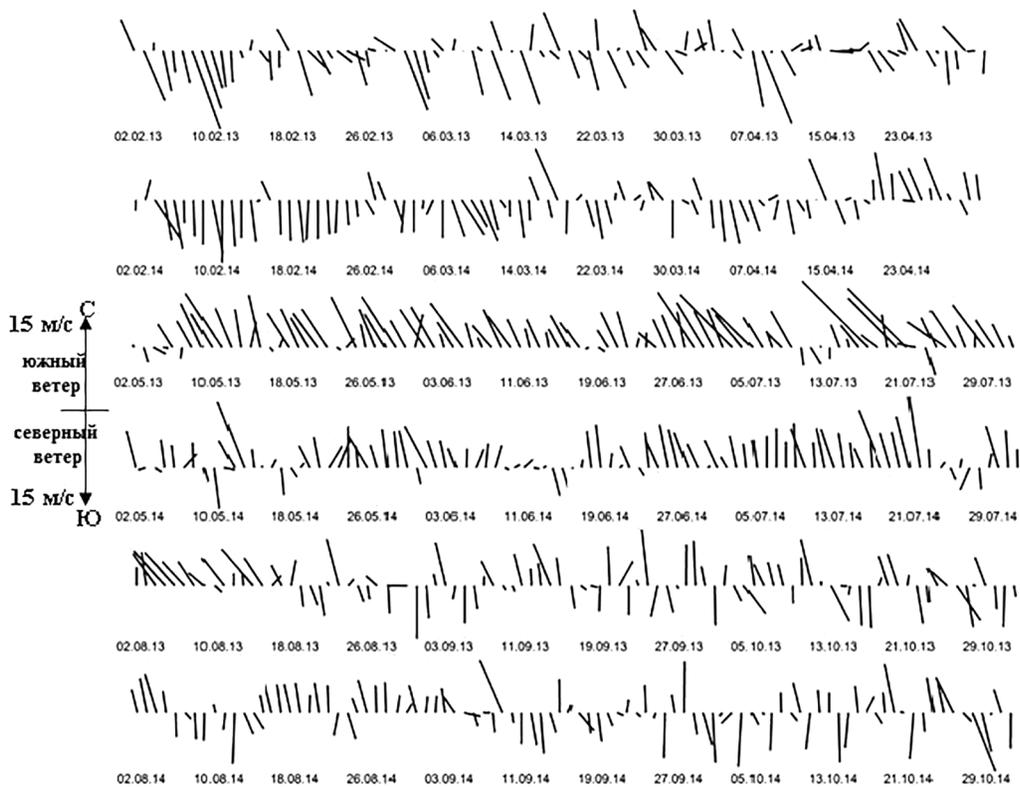


Рис. 3. Среднесуточное распределение скорости и направления ветра по дням для периодов 01.02–30.04.2013, 01.02–30.04.2014, 01.05–31.07.2013, 01.05–31.05.2014, 01.08–31.10.2013, 01.08–31.10.2014 на ГМС «Владивосток»

со случаями северного ветра, повышенного показателя K_{ao} , сильных ветров южных направлений, отмечаемых длительное время.

Максимальные значения параметров K_{xl} и Φ_{xl} в точке 3 осенью 2013 г. приходятся на середину–конец октября, в 2014 г. – на начало ноября. При этом увеличение значений показателя Φ_{xl} начиналось в начале сентября, и до начала октября они оставались на уровне средних. В 2014 г. значения Φ_{xl} в этот период были ниже, чем в 2013 г. В Амурском заливе увеличение значений Φ_{xl} наблюдалось уже с середины–конца августа. В 2013 г. показатель Φ_{xl} достиг относительно высоких значений в конце августа, тогда как в 2014 г. – только в конце сентября – начале октября (рис. 2).

Повышенные значения показателей a_{dg} , b_{bp} (например, 10.07.2013 г. и 11.02.2014 г.) характерны для периодов после северных ветров со скоростью от 3–7 м/с. Ветры северного направления в результате сгонных явлений приводят к разрушению сезонной стратификации вод, подъему нижележащих вод с более высоким содержанием органического вещества и взвеси. Увеличение этих показателей наблюдается также при «цветении» фитопланктона и стоке материковых вод после выпадения большого количества атмосферных осадков (15.04.2013 г. и 09.08.2013 г.) (рис. 2, 3). Наибольшие показатели b_{bp} наблюдаются при материковом стоке (например, во время весеннего паводка на р. Раздольная в мае 2013 г.).

Ситуации, способствующие образованию гипоксии вод. Весеннее «цветение» фитопланктона у о-ва Фуругельма (рис. 2, 4а, см. вклейку) в 2013 г., более продолжительное, чем в 2014 г., к тому же наблюдаемое 15.04.2013 г. (т.е. после заметного снижения скорости северных ветров после 10.04.2013 г. и связанных с ними обменных процессов между поверхностью и придонными слоями), можно отнести к ситуации, в результате которой снижается уровень кислорода в придонном слое.

Наибольшие показатели Φ_{xl} , b_{bp} отмечены во время весеннего паводка на р. Раздольная (рис. 2а). Распределение показателей K_{xl} , Φ_{xl} , a_{dg} , b_{bp} , $T_{им}$ приводятся на 31.05.2013 г. – конец паводка (рис. 4б). Можно видеть, что показатели Φ_{xl} , b_{bp} снизились, тогда как a_{dg} и соответственно K_{xl} возросли. Увеличение a_{dg} в северо-западной части Амурского залива объясняется накоплением продуктов жизнедеятельности фитопланктона и других организмов из-за невозможности их выноса в мористую часть залива вследствие циркуляции вод, возникающей при ветрах южных направлений. На указанную дату и около 5 дней до этого наблюдались ветры южных направлений со скоростью 7–10 м/с (рис. 3). Схема ветровых течений [7] в Амурском заливе представлена на сайте <http://pacificinfo.ru/data/cdrom/2>. Ветры южных направлений создают в Амурском заливе циркуляцию вод, способствующую их даунвеллингу, и в результате приводят к образованию гипоксии вод [26].

Формированию гипоксии вод в Амурском заливе и у о-ва Фуругельма способствует «цветение» фитопланктона 03.07.2013 г., вызванное материковым стоком вследствие высокого показателя K_{ao} (в среднем около 50 мм/день). При этом отмечен сильный юго-восточный ветер со среднесуточными значениями около 10–14 м/с, который до этого сохранялся около 5 дней. Поэтому на показатель Φ_{xl} мог повлиять сток р. Туманная. В Амурском заливе из-за обильного стока р. Раздольная даже при юго-восточном ветре наблюдается шлейф высоких значений Φ_{xl} и $T_{им}$ от места впадения р. Раздольная в Амурский залив по западному его побережью (рис. 4в).

Материковый сток со стороны побережья г. Владивосток, прослеживающийся на изображениях характеристик цвета вод на 09.08.2013 г., распространяющийся к западному побережью Амурского залива и затем южнее мыса Гамова (рис. 2, 4г, 5, см. вклейку), по-видимому, вызван переполнением водохранилищ, находящихся на реках Богатая и Седанка, в результате выпадения обильных атмосферных осадков. Этот поток вызвал заметное увеличение показателей b_{bp} , Φ_{xl} , a_{dg} , что могло существенным образом повлиять на образование придонной гипоксии вод. Возможно, этот поток помимо процессов вентиляции придонных вод, возникающих при северных ветрах в конце августа, когда проводилась судовая гидрохимическая съемка в 2013 г., также повлиял на распределение придонного содержания кислорода, которое отличалось от распределений в другие годы. Так, в конце

августа 2013 г. минимальное содержание кислорода наблюдалось в северной, более мелкой части залива, а в более глубокой его части содержание кислорода в придонном слое было выше [26].

В начале осени отмечено увеличение показателей $\Phi_{\text{хл}}$, что связано с выносом биогенных элементов к поверхности в результате начавшихся и имеющих неустойчивый характер процессов ветрового и конвективного перемешивания вод (рис. 2, 4d). Так как в результате этих процессов происходит вынос к поверхности биогенных элементов, приводящих к «цветению» фитопланктона, они являются дополнительным источником образования придонной гипоксии вод. Например, после прохождения урагана Деннис в июле 2005 г. высокая мутность вод всего западного шельфа Флориды, сопровождаемая «цветением» водорослей в результате выноса к поверхности биогенных элементов, привела к гипоксии вод, следствием чего явилась гибель бентосных организмов [14, 20].

Заключение

Выявлены особенности сезонного хода показателей содержания в воде фитопланктона, детрита с желтым веществом, взвеси. Отмечены: 1) два основных пика $\Phi_{\text{хл}}$ – весенний и осенний, приходящиеся соответственно на март и конец октября – начало ноября в области у о-ва Фуругельма, май и середину августа – середину октября в Амурском заливе; 2) относительно высокие показатели $a_{\text{дг}}$, $b_{\text{бр}}$ в Амурском заливе и поэтому заметное влияние органического вещества и взвеси на параметр $K_{\text{хл}}$; 3) увеличение параметра $a_{\text{дг}}$ по мере «цветения» фитопланктона, при северном ветре со скоростью примерно 3–7 м/с (наблюдающемся в течение 1–2 сут до события) в зависимости от глубины нахождения слоя с повышенным содержанием органического вещества и в Амурском заливе – при ветрах южных направлений со скоростью примерно 7 м/с (наблюдающихся в течение примерно 3 дней до события), при материковом стоке; 4) максимальные значения $b_{\text{бр}}$ при материковом стоке; 5) при летнем минимуме развития фитопланктона отдельные случаи увеличения $\Phi_{\text{хл}}$: после выпадения большого количества атмосферных осадков, около о-ва Фуругельма – при сильном юго-восточном ветре (около 10 м/с).

Выделены ситуации, способствующие формированию гипоксии вод: весеннее «цветение» фитопланктона у о-ва Фуругельма при устойчивом формировании слоя стратификации (после снижения скорости северного ветра до 3–5 м/с и увеличения $T_{\text{пм}}$ примерно до 1 °С), снижающем обменные процессы между поверхностью и придонными слоями, со значениями параметров цвета вод $K_{\text{хл}}$, $\Phi_{\text{хл}}$, $a_{\text{дг}}$, $b_{\text{бр}}$, соответственно составляющими (для примера – данные по 2013 г.) около 2 мг/м³; 0,03 мВт/(см²×мкм×ср); 0,2 м⁻¹; 0,02 м⁻¹; весеннее «цветение» фитопланктона вблизи впадения р. Раздольная в Амурский залив, вызванное паводком на этой реке, и при этом ветры южных направлений; материковый сток после выпадения значительного количества атмосферных осадков, в области у о-ва Фуругельма – сильный юго-восточный ветер; единичные случаи перемешивания вод летом, в результате чего в поверхностные слои с потоками вод выносятся биогенные элементы, и начало осеннего развития фитопланктона.

Авторы выражают искреннюю благодарность коллегам за содействие и помощь.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексанин А.И., Качур В.А. Особенности атмосферной коррекции спутниковых данных цвета океана в Дальневосточном регионе // Исслед. Земли из космоса. 2016. № 6. С. 56–67.
2. Буренков В.И., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. и др. Подспутниковые измерения цвета океана: верификация спутниковых данных сканера цвета SeaWiFS // Океанология. 2000. Т. 40, № 3. С. 357–362.
3. Захарков С.П., Владимиров А.С., Штрайхерт Е.А. и др. Продукционные характеристики бактерий и фитопланктона в весенне-летний период в Охотском и Беринговом морях // Микробиология. 2017. Т. 86, № 3. С. 364–372.

4. Захарков С.П., Селина М.С., Ванин Н.С. и др. Продукционные характеристики фитопланктона и гидрологические условия западной части Охотского моря весной 1999 и 2000 гг. по судовым и спутниковым данным // *Океанология*. 2007. Т. 47, № 4. С. 559–570.
5. Звалинский В.И., Тищенко П.Я. Биогенные элементы в эстуариях. Поведение и биогеохимия // *Состояние морских экосистем, находящихся под влиянием речного стока*. Владивосток: Дальнаука, 2005. С. 89–124.
6. Маторин Д.Н., Рубин А.Б. Флуоресценция хлорофилла высших растений и водорослей. Москва; Ижевск: Ин-т компьютер. исслед., 2012. 256 с.
7. Савельева Н.И. Общая схема циркуляции вод Амурского и Уссурийского заливов по результатам численного моделирования. Владивосток, 1989. 29 с. Деп. ВИНТИ № 2268-В89.
8. Сёмина Г.И. Фитопланктон Тихого океана. М.: Наука, 1974. 239 с.
9. Стунжас П.А., Тищенко П.Я., Ивин В.В. и др. Первый случай анокии в водах Дальневосточного морского заповедника // *Докл. АН*. 2016. Т. 467, № 2. С. 218–221.
10. Тищенко П.Я., Сергеев А.Ф., Лобанов В.Б. и др. Гипоксия придонных вод Амурского залива // *Вестн. ДВО РАН*. 2008. № 6. С. 115–125.
11. Тищенко П.Я., Лобанов В.Б., Звалинский В.И. и др. Сезонная гипоксия Амурского залива (Японское море) // *Изв. ТИНРО*. 2011. Т. 165. С. 136–157.
12. 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 по спутниковым данным // *Вестн. ДВО РАН*. 2012. № 6. С. 81–88.
13. Штрайхерт Е.А., Захарков С.П. О пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-а на шельфе залива Петра Великого при зимне-весеннем цветении фитопланктона по спутниковым и подспутниковым данным // *Исслед. Земли из космоса*. 2016. № 1/2. С. 173–186.
14. Adjeroud M., Andrefouët S., Payri C. Mass mortality of macrobenthic communities in the lagoon of Hikueru atoll (French Polynesia) // *Coral Reefs*. 2001. Vol. 19. P. 287–291.
15. Behrenfeld M.J., Westberry T.K., Boss E.S. et al. Satellite-detected fluorescence reveals global physiology of ocean phytoplankton // *Biogeosciences*. 2009. Vol. 6. P. 779–794.
16. Carder K.L., Hawes S.K., Baker K.A. et al. Reflectance model for quantifying chlorophyll-*a* in the presence of productivity degradation products // *J. Geophys. Res.* 1991. Vol. 96, N C11. P. 20599–20611.
17. 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.
18. Gordon H.R., Clark D.K., Brown J.W. et al. Phytoplankton pigment concentrations in the middle Atlantic Bight: comparison of ship determinations and CZCS estimates // *Appl. Opt.* 1983. Vol. 22, N 1. P. 20–36.
19. Gran H.H., Braarud T. A quantitative study of the phytoplankton in the bay of Fundy and the Gulf of Maine (including observations on hydrography, chemistry and turbidity) // *J. Biol. Board Canada*. 1935. Vol. 1, N 5. P. 279–467.
20. Remote Sensing in Fisheries and Aquaculture // *Rep. Int. Ocean-Color Coordin. Gr.* / eds M. Forget, V. Stuartand, T. Platt. IOCCG: Dartmouth, Canada, 2009. N 8. P. 43–56.
21. Remote Sensing of Inherent Optical Properties: Fundamentals, Tests of Algorithms, and Applications // *Rep. Int. Ocean-Color Coordin. Gr.* / ed. Z.P. Lee. IOCCG: Dartmouth, Canada, 2006. N 5. P. 95–103.
22. Remote Sensing of Ocean Color in Coastal, and Other Optically-Complex Waters // *Rep. Int. Ocean Color Coordin. Gr.* / ed. Sh. Sathyendranath. IOCCG: Dartmouth, Canada, 2000. N 3. P. 8–11.
23. Ruddick K.G., Ovidio F., Rijkeboer M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters // *Appl. Opt.* 2000. Vol. 39, N 6. P. 897–912.
24. Salyuk P.A., Bukin O.A., Alexanin A.I. et al. Optical properties of Peter the Great Bay waters compared with satellite ocean colour data // *Int. J. Rem. Sens.* 2010. Vol. 31, N 17/18. P. 4651–4664.
25. Sverdrup H.U. On conditions for the vernal blooming of phytoplankton // *J. Conseil. Exp. Mer.* 1953. Vol. 18, N 3. P. 287–295.
26. Tishchenko P., Tishchenko P., Lobanov V. et al. Summertime in situ monitoring of oxygen depletion in Amursky Bay (Japan /East Sea) // *Cont. Shelf Res.* 2016. Vol. 118. P. 77–87.
27. Why Ocean Colour? The Societal Benefits of Ocean-Colour Technology // *Rep. Int. Ocean-Color Coordin. Gr.* / eds T. Platt, N. Hoepffner, V. Stuart, C. Brown. IOCCG: Dartmouth, Canada, 2008. N 7. P. 59–72.