

КАЧЕСТВО И ОХРАНА ВОДЫ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

УДК 595.142

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИТОПЛАНКТОНА В ВОДАХ ОХОТСКОГО МОРЯ¹

© 2009 г. **О. В. Зенкин***, **А. В. Леонов****, **В. М. Пищальник***, **С. А. Покрашенко*****

**Сахалинский филиал Дальневосточного геологического института
Дальневосточного отделения Российской академии наук
693023 Южно-Сахалинск, ул. Горького, 25*

***Институт океанологии Российской академии наук
117997 Москва, Нахимовский просп., 36*

****Сахалин энерджи инвестмент компания Лтд.
123242 Москва, Новинский бульв., 31*

Поступила в редакцию 20.05.2008 г.

Для идентификации природных процессов, происходящих в поверхностном слое вод в Охотском море и на прилегающих к нему акваториях, по спутниковой информации определены сезонные изменения концентрации Хл “а” и решена задача типизации вод по спутниковым данным в видимом диапазоне спектра. Анализ годового цикла изменения концентрации фитопланктона подтвердил наличие обнаруженной ранее по модельным расчетам кратковременной вспышки развития фитопланктона в южной части Охотского моря в период становления ледяного покрова. Выделены классы вод, отражающие различную геоэкологическую обстановку для характерных районов Охотского моря. Рассчитаны зависимости роста концентрации Хл “а” от температуры поверхности воды, выполнена корректировка используемых стандартных соотношений в биооптических алгоритмах для различных районов Охотского моря.

Дистанционные наблюдения за фитопланктоном с искусственных спутников Земли ведутся в видимом диапазоне спектра по цветности воды на поверхности океана с конца 1970-х гг. Первый цветной сканер CZCS (Coastal Zone Color Scanner) был установлен на борту спутника Nimbus 7, который передавал данные с октября 1978 по июнь 1986 г. [4]. Спутниковые данные позволяют исследовать процессы, происходящие в верхних слоях океана, в различных спектральных, временных и пространственных диапазонах. Основное отличие данных дистанционного зондирования (ДДЗ) от судовых и стационарных наблюдений заключается в том, что со спутников выполняются не точечные, а пространственные (на определенной площади) наблюдения за распределением фитопланктона, что позволяет более объективно оценивать такие важные параметры его состояния, как биомасса и биопродуктивность в региональных и глобальном масштабах. Оцененная по результатам экспедиционных определений продукции и измерений концентраций Хл “а” в поверхностном слое океана с помощью спутникового сканера CZCS за 1978–1986 гг. глобальная годовая продукция в океане составляет 100×10^9 т С/год, а отдельно для Тихого, Индийского

и Атлантического океанов соответственно 45, 25 и 30 млрд. т/год [5].

Цветность вод на поверхности океана, в первую очередь, зависит от концентрации в воде фитопланктона. Сканер CZCS поставлял регулярные данные о цветности вод океана на 6 каналах видимой и ближней инфракрасной частях спектра с разрешением 1 км. В Университете Майами и Годдардовском центре космических полетов НАСА были разработаны методы обработки этого массива данных и создан атлас “Ocean Color from Space”, где были собраны глобальные и региональные карты цветности вод океана, которые и характеризуют концентрацию фитопланктона в различных районах Мирового океана [18].

По материалам атласа “Ocean Color from Space” был сделан вывод, что отдельные районы Охотского моря (особенно в период таяния льда) находятся в зоне наивысших концентраций фитопланктона в Мировом океане, которая кольцом охватывает все северное полушарие Земли в средних и высоких широтах.

Статистика контактных измерений Хл “а” в Охотском море невелика, поэтому наиболее информативным и доступным в настоящее время является Интернет-ресурс спутниковой информации [18]. Дистанционное зондирование поверхности океана со спутников играет важную роль в понимании связи

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 06-05-96016-р_восток_a).

между состоянием биоресурсов океана и воздействием внешних факторов антропогенного и природного характера [8].

Наблюдения за цветностью вод океана были прерваны в 1986 г. по причине отсутствия специальных спутников с соответствующими сканерами. Возобновились они только в 1996 г. после запуска спутников со сканерами MOS/IRS P3 (Индия), OCTS и POLDER/ADEOS (Япония) и в 1997 г. спутника SEASTAR со сканером SeaWiFS (США). С этого времени начался процесс исследований фитопланктона в водах Мирового океана с применением спутниковых и экспедиционных данных [4].

Цвет поверхностных вод океана тесно связан с концентрацией фитопланктона в морской среде. Фитопланктон представляет собой микроскопические одноклеточные растительные организмы (размером от 1 мкм до 1 мм) и включает представителей многих групп водорослей, например – диатомовых (Bacillariophyta), динофлагеллят (Pirrrophyta), кокколитофорид (Coccolithus), кремнежгутиковых (Siliocoflagellata), криптоноад (Cryptophyta), хризомонад (Chrysophyta), зеленых (Chlorophyta), синезеленых (Cyanophyta) и др. Из них первые три группы обычно преобладают в морских биоценозах. Когда концентрация клеток фитопланктона достигает порядка 10^2 – 10^3 кл/л, то наблюдается изменение окраски вод, называемое “цветением моря”. Оно бывает красного, коричневого, желтого, молочнобелого и др. оттенков. Окраска морской воды в период цветения фитопланктона зависит от преобладающего вида, концентрации, сезонной изменчивости и ряда других факторов, что отчетливо видно на приведенных снимках (рис. 1 а–в) (здесь и на других рисунках в данной статье используется окраска спутниковых снимков в серых полутонах по причине отсутствия возможности представления рисунков в цветовой гамме). На этом рисунке светлосерым тоном выделены регионы с высокой концентрацией фитопланктона, темным – с низкой концентрацией.

В настоящее время наблюдения за пространственно-временным показателем распределения биомассы фитопланктона (Хл “а” – зеленого пигмента растительных клеток, играющего основную роль в фотосинтезе) из космоса ведутся при помощи спектрорадиометров MERIS (Medium Resolution Imaging), ASTER и MODIS на спутниках TERRA и AQUA. Наземные центры приема и обработки ДДЗ располагаются в различных регионах планеты и по спектральной яркости каналов в видимой области спектра ведут расчет концентрации Хл “а” и других параметров состояния вод океана, применяя биооптические алгоритмы, откалиброванные по данным контактных измерений.

Впервые для региона Дальнего Востока регулярный прием и обработку ДДЗ на основе наблюдений сканера SeaWiFS стала вести в 2000 г. наземная спутниковая станция TERASCAN (ГУП СахНИРО,

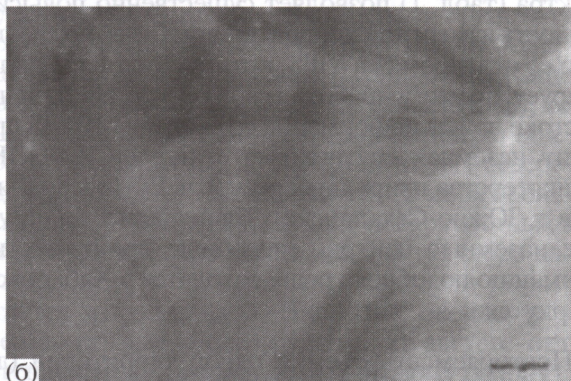
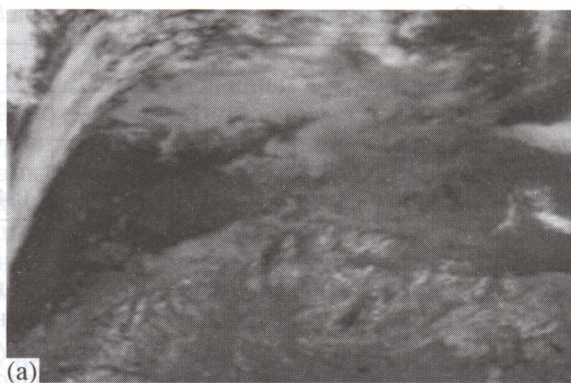


Рис. 1. Примеры снимков из космоса, иллюстрирующих активное развитие фитопланктона в поверхностном слое в разных районах Мирового океана. а – западная часть Баренцева моря (спутник Terra, спектрорадиометр MODIS, 01.08.2004 г.) – бурное развитие фитопланктона (кокколитофорид *Coccolithus huxleyi*), белый цвет – облачность; б – центральная часть Аравийского моря (снимок с орбитальной станции) – цветение динофлагеллят (окраска воды ржаво-красная – явление “красного прилива”); в – северная часть Тихого океана (спутник SeaWiFS, 26–27. VI. 2000 г.) – скопления кокколитофоры яркой расцветки (наличие у фитопланктона белой кальциевой раковины, хорошо отражающей солнечный свет).

г. Южно-Сахалинск). Там же был организован архив спутниковой информации.

С 2002 г. для Дальнего Востока (включая район Охотского моря) основным инструментом мониторинга состояния воднобиологических объектов по

Таблица 1. Основные характеристики радиометра MODIS

Показатель	Номера каналов					
	1–2	3–7	8–19	20–25	26	27–36
Спектральный диапазон, мкм	250	500	1000	1000	1000	1000
Пространственное разрешение, м	0.62–0.88	0.46–2.16	0.41–0.97	3.66–4.55	1.36–1.39	6.54–14.39

цветности поверхностных вод моря служит 36-канальный спутниковый сканер MODIS с разрешением 250–1000 м, установленный на спутниках AQUA и TERRA. Большое число каналов в видимой области спектра (табл. 1) позволяет существенно повысить точность измерений концентрации Хл “а” по сравнению со сканером SeaWiFS, который хотя и функционирует, но уже выработал свой ресурс. На Дальнем Востоке прием информации со сканера MODIS проводит наземная спутниковая станция СКАНЭКС Министерства природных ресурсов РФ (расположена в г. Южно-Сахалинске). Ближайшие действующие наземные центры, способные принимать информацию подобного рода, находятся в Хабаровске и Иркутске.

Повторяемость съемки одной территории (для одного спутника) с полосой обзора 2300 км составляет 1–2 раза в сутки в зависимости от широты места съемки. Хотя данные дистанционного зондирования MODIS со спутников AQUA и TERRA принимаются и архивируются в Южно-Сахалинске, расчет концентрации Хл “а”, температуры (T) поверхности моря и ряда других океанологических параметров не проводится, поскольку мониторинг поверхности

океана не является профильной задачей Министерства природных ресурсов РФ.

На регулярной основе в глобальном масштабе расчет концентрации Хл “а”, а также ряда других данных дистанционного зондирования поверхностных вод Мирового океана производится зарубежными центрами. Расчетные параметры могут быть заказаны из баз данных этих центров (например, Интернет-ресурс [18]). Информация представляется как в цифровом, так и в графическом формате.

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ ЗА СОСТОЯНИЕМ ФИТОПЛАНКТОНА В ОХОТСКОМ МОРЕ

По данным спутниковой телеметрии сканера SeaWiFS для каждого пролета спутника проводится расчет концентрации Хл “а”, пигментов фитопланктона и T воды на поверхности моря (рис. 2). На снимках темным цветом выделены районы с минимальными концентрациями Хл “а” и значениями T воды в поверхностном слое (шкалы концентраций Хл “а” и T приведены на рис. 2). Белым цветом выделена земля и участки водной поверхности, закрытые облачностью. В полутонах серого цвета отчетливо

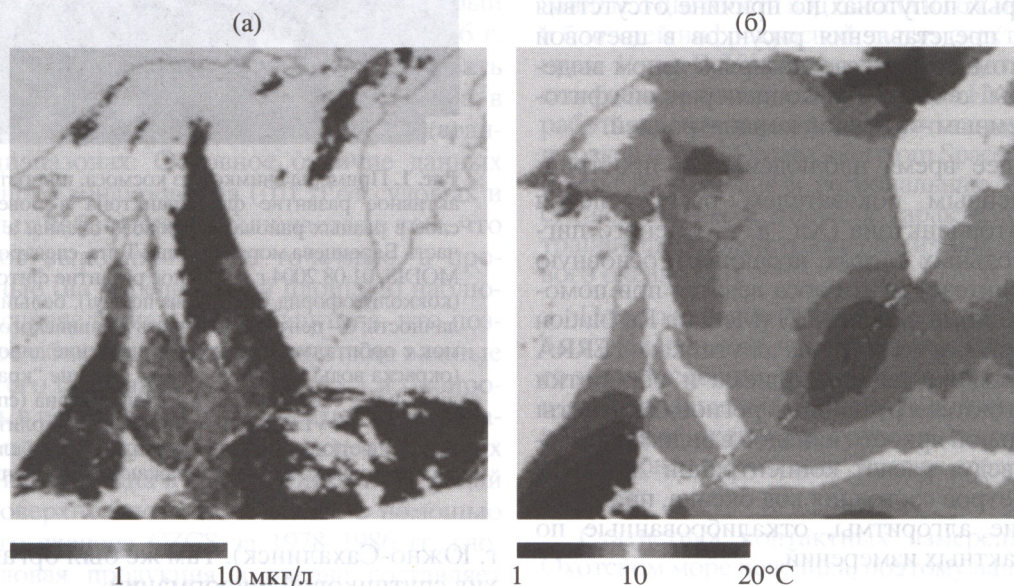


Рис. 2. Примеры спутниковых снимков Охотского моря, показывающих распределение Хл “а” (спутник SeaWiFS, 05.VII. 2002 г.) (а); T воды летом (белым цветом выделена территория суши и участки водной поверхности, закрытые облачностью) (б).

проявляется пятнистость (фрагментарность) концентрации Хл “а” и связь его максимальных величин с определенными значениями T воды вне зависимости от зональности акватории.

Этот факт свидетельствует о том, что цветение отдельных видов фитопланктона происходит в строго определенном диапазоне температур, и эту закономерность можно отчетливо отслеживать по спутниковым снимкам. Характер распределения максимальных концентраций Хл “а” меняется во времени и пространстве, но при комплексном анализе с T воды это позволяет выделять элементы динамики вод и идентифицировать цветение различных видов фитопланктона.

Для региона Охотского моря к числу основных природных факторов, которые определяют развитие фитопланктона, следует отнести T воды, ледовый режим и содержание в воде биогенных веществ (БВ). Анализ сезонной изменчивости концентрации Хл “а” в Охотском море и прилегающих к нему акваториях северо-западной части Тихого океана проводился в характерных районах 1–9, размером 15×15 км (1 – Пенжинский зал., 2 – банка Кашеварова, 3 – центральный район моря, 4 – зал. Терпения, 5 – район течения Соя, 6 – Курильский район, 7, 8 – тихоокеанский сектор о. Итуруп и о. Уруп соответственно, 9 – зал. Анива). Их выбор проводился с учетом районирования, выполненного ранее японскими исследователями и основанного на изучении пространственной изменчивости концентрации фитопланктона по данным сканера CZCS [21]. Районы 7 и 8 использовались для сравнительного анализа сезонной изменчивости фитопланктона в Охотском море и в сопряженных акваториях океана. Это районирование Охотского моря несколько отличается от проведенного с помощью кластерного анализа изменений концентраций Хл “а” – с его помощью было выделено 6 условных районов – северная, центральная, юго-западная акватории моря, район около западного берега п-ова Камчатка, северо-восточный шельф Сахалина и зона влияния стока р. Амур (Амурский лиман и Сахалинский зал.) [19].

Исследование внутригодовой изменчивости T поверхностных вод и концентрации Хл “а” по данным спутниковых наблюдений позволило выделить следующие гидродинамические процессы, под влиянием которых на акваториях Охотского моря отмечается существенный рост фитопланктона [7]: таяние льда (сопровождающееся поступлением БВ в поверхностный слой воды при одновременном росте освещенности морской среды), вынос БВ с речным стоком (например, влияние вод р. Амур прослеживается на расстоянии нескольких сотен километров [21]), зоны апвеллинга вод, формирование фронтальных зон в вихревых образованиях различной направленности вращения, которые постоянно перемещаясь в пространстве, создают благоприятные условия для развития различных видов фито-

планктона практически в течение всего года в разных районах моря [2].

С учетом накопленных в настоящее время знаний можно схематично представить годовой цикл формирования и изменения биомассы фитопланктона в Охотском море. После окончания ледового сезона и обогащения питательными БВ вод деятельного слоя моря (в результате зимней конвекции и таяния льда), определяющим фактором развития фитопланктона становится T воды.

На акваториях Охотского моря, северной части Японского моря и около Курильских о-вов по ДДЗ со спутников NOAA-12 и NOAA-14 в 1997–2001 гг. выделены хорошо прослеживаемые области теплых течений (Цусимское, Куроисио) и зоны более холодных вод (районы средних Курил, банка Кашеварова, северо-восточное побережье Сахалина), которые отличаются устойчивым апвеллингом вод. Со второй половины мая до середины июля в северо-западной и северной частях Охотского моря наблюдается положительная аномалия T поверхностных вод, которая сменяется в конце августа–сентябре на отрицательную, а на основной акватории моря она остается максимальной. Напротив, океанские водные массы в мае–июне холоднее, а в августе–октябре теплее, чем в среднем по изучаемому району [14].

Характер пространственно-временной изменчивости температуры поверхности моря обуславливает существенное разнообразие динамики концентрации фитопланктона. По мере прогрева вод поверхности моря с юга на север распространяется волна цветения фитопланктона (рис. 3). Здесь следует учитывать, что активное развитие отдельных видов фитопланктона приурочено к строго определенным диапазонам температуры воды, в результате чего наблюдается несколько волн цветения разной интенсивности. Общую картину распределения биомасс фитопланктона еще более усложняет динамика вод и ее сезонная изменчивость (рис. 4).

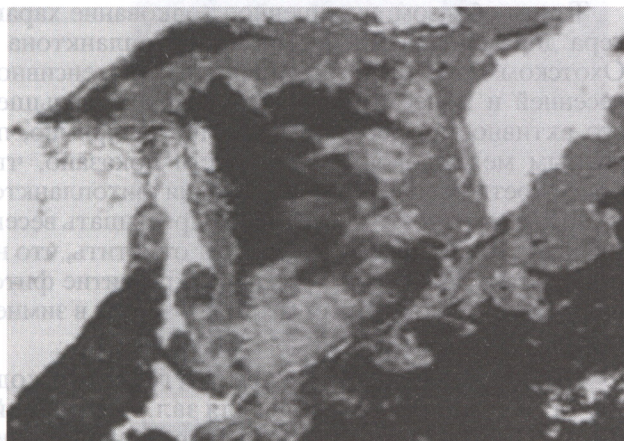
Таким образом, упрощенное толкование характера динамики роста биомассы фитопланктона в Охотском море [21] и наличия двух (интенсивной весенней и менее интенсивной осенней) всплесков его активности требует уточнений. Например, по данным межгодовой изменчивости показано, что более трети осенних пиков цветения фитопланктона по интенсивности роста может превышать весенний пик его биомассы [7]. Следует отметить, что не обращается должного внимания на развитие фитопланктона по акваториям Охотского моря в зимнее время [16].

На рис. 5 приведен фрагмент годового хода Хл “а” и температуры воды для зал. Анива (район 9). По максимальным значениям концентраций отчетливо выделяются 3 пика цветения фитопланктона. Первый (с концентрацией ~ 6 мг/м³) приходится на январь (25 сут) при T воды 0.3 – 0.5 °С. Цветение продолжается в течение ~ 2 -х недель. Второй (весен-



0.1 5 10 мг/м³ март–май 2002 г.

Рис. 3. Распределение Хл “а” в Охотском море и в прилегающих к нему акваториях в период весеннего цветения фитопланктона (черный цвет – районы с низкой концентрацией, светлосерый – >5, темносерый – до 10 мкг/л Хл “а”).



0.1 5 10 мкг/л май 2002 г.



0.1 5 10 мкг/л сентябрь 2002 г.

Рис. 4. Примеры спутниковых снимков, показывающих распределение Хл “а” в Охотском море. а – в мае 2002; б – в октябре 2002 г. (белый цвет – суша и участки моря, покрытые льдом).

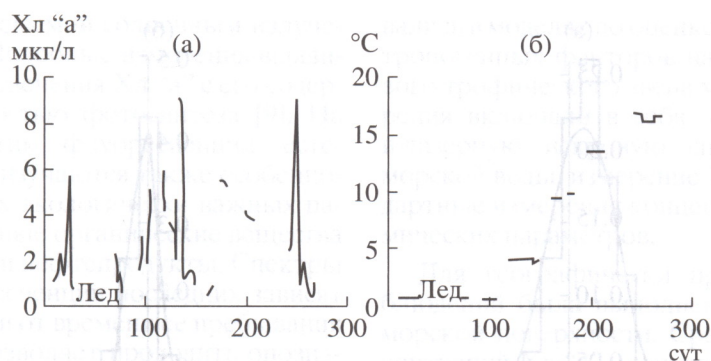


Рис. 5. Воспроизведенные по космическим снимкам фрагменты годового хода в зал. Анива (Охотское море) концентраций Хл "а" (а), T воды (пробелы в наблюдениях обусловлены наличием облачности и ледового покрова на поверхности моря) (б).

ний в апреле–мае с максимумом на 135-е сут) наблюдается при такой же T сразу после таяния льда. Продолжительность цветения составляет >50 сут. Максимальные концентрации Хл "а" колеблются от 6 до 9 $\text{мг}/\text{м}^3$. Третий непродолжительный пик (<2 -х недель) отмечается осенью (250-е сут) в период достижения T воды максимума в годовом ходе (17–18°C). По значениям концентрации Хл "а" он сравним с весенним ($\sim 9 \text{ мг}/\text{м}^3$).

В зал. Терпения (район 4) рост концентрации Хл "а" наблюдается также в апреле–мае (пик цветения с концентрацией 8 $\text{мг}/\text{м}^3$ приходится на 120-е сут при температуре воды $\sim 1.2^\circ\text{C}$). Отчетливо выделяется и второй пик цветения в сентябре на 260-е сут с концентрацией Хл "а" до 6–7 $\text{мг}/\text{м}^3$ при T воды $\sim 14^\circ\text{C}$.

Наименее продуктивными являются центральные районы Охотского моря (районы 3, 8). В летний период концентрация Хл "а" здесь составляет $\sim 0.5 \text{ мг}/\text{м}^3$. Выделяются два пика цветения фитопланктона – в мае и ноябре. Весенний пик по концентрациям ($\sim 3 \text{ мг}/\text{м}^3$) почти в два раза превышает осенний.

В пространственном распределении повышенные концентрации фитопланктона отмечены в северной части моря (рис. 3). Продолжительность периода цветения фитопланктона там намного больше, чем на юге, поскольку прогрев поверхностного слоя происходит значительно медленнее. Максимальные концентрации биомассы фитопланктона ($>10 \text{ мг}/\text{м}^3$) наблюдаются в районах стационарного апвеллинга вод (районы 1 и 2) в июне.

Активное цветение фитопланктона в мае также фиксируется в шельфовой зоне вдоль восточного побережья о. Сахалин (рис. 4). Частично это может быть объяснено развитием прибрежного апвеллинга вод у северо-восточного побережья острова в летнее время. При этом косвенные данные [13] указывают на то, что на акваториях, прилегающих к северной части острова, интенсивность цветения фитопланктона должна практически полностью определяться режимом стока р. Амур, который обу-

словливает значительное распреснение вод поверхностного слоя и его обогащение БВ.

В прилегающих районах Тихого океана (7 и 8) пики цветения фитопланктона с концентрацией $>3 \text{ мг}/\text{м}^3$ приходятся примерно на те же сроки: весенний – на 130-е и 150-е сут, соответственно, но при более высокой T воды (2.5–3.0°C); осенний – приблизительно на 260 сут при температуре воды 11–14°C. Концентрация фитопланктона здесь значительно ниже ($\sim 5\text{--}7 \text{ мг}/\text{м}^3$), что обусловлено влиянием вод течения Соя, обедненных по БВ.

БИООПТИЧЕСКИЕ АЛГОРИТМЫ ОЦЕНКИ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛ "а" ПО СПУТНИКОВОЙ ИНФОРМАЦИИ

Применение дистанционного зондирования для оценки концентрации фитопланктона в водах верхнего слоя океана и его продуктивности основано на оптических свойствах фотосинтезирующего пигмента. Известно, что пигмент фитопланктона поглощает солнечную энергию преимущественно в голубой и красной зонах спектра и отражает в зеленой. Таким образом, существует определенное соотношение между спектральным отражением вод поверхностного слоя океана и концентрацией фитопланктона. Соотношения яркости в голубой, красной и зеленой спектральных зонах (цветовые индексы) определяют цветность воды. Эти значения и закладываются в биооптические алгоритмы для расчета концентрации Хл "а". Параметры цветности воды рассчитываются посредством алгоритмов атмосферной коррекции и биооптических алгоритмов. Биооптический алгоритм для расчета концентрации Хл "а" по данным MODIS основан на использовании четырех индексов цветности воды. Для расчета T поверхностных вод используются инфракрасные каналы 31 и 32 (диапазоны 10.780–11.280 и 11.770–12.270 $\mu\text{м}$).

Калибровка алгоритмов осуществляется путем статистической обработки информации спутниковых цветовых индексов и данных стационарных и судовых наблюдений за концентрацией и химическим

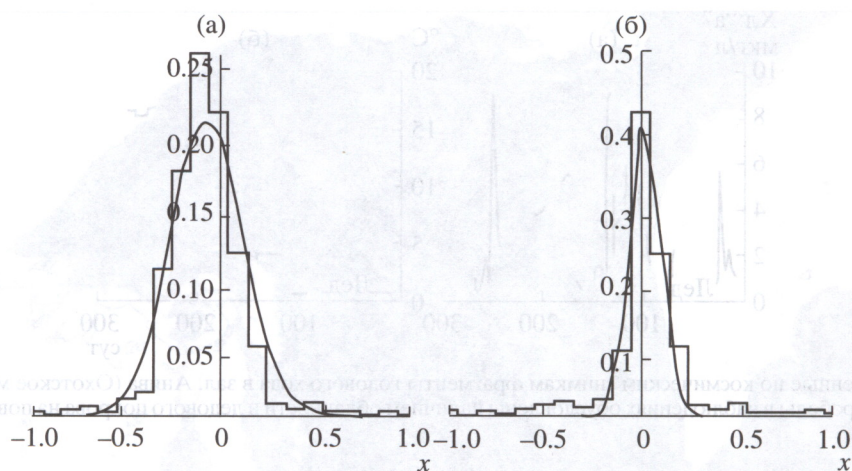


Рис. 6. Статистические оценки погрешностей определения для Охотского моря индекса цветности воды L_{wn490}/L_{wn555} (высота 0.20, центр 0.068652, ширина 0.18, среднеквадратичное отклонение 0.308195) (а), концентраций Хл “а” (высота 0.41, центр 0.0223706, ширина 0.075, среднеквадратичное отклонение 0.194250) (б).

составом фито- и зоопланктона, полученных в условиях *in situ* [1, 17]. Химический анализ необходим для изучения влияния загрязнения морских водоемов на развитие и функционирование планктонного сообщества. Особенно это актуально в случае нефтяного загрязнения морских акваторий.

Биооптические спутниковые алгоритмы SeaWiFS и MODIS, откалиброванные для одних районов океана, могут давать значительные погрешности в случае их применения для других акваторий. Ошибки расчетов концентрации Хл “а” в Охотском море могут быть оценены с использованием последовательного ряда спутниковых снимков, которые в течение дня поступают на наземную станцию. Поскольку концентрация фитопланктона и погодные условия в течение нескольких часов меняются незначительно, то расхождения в абсолютных значениях концентрации Хл “а” следует отнести за счет ошибки сканера и последующей обработки исходных данных биооптическими алгоритмами.

В [7] для оценки разброса значений указанных показателей по выборке из 2500 точек были построены гистограммы относительных частот (рис. 6). Основаниями гистограмм служат прямоугольники с частичными интервалами длины $h = 0.1 \text{ мг/м}^3$. Высота прямоугольников – это плотность относительной частоты, поэтому площадь гистограммы относительных частот равна 1. Гистограммы использовались для получения параметров кривой нормального распределения индекса цветности воды и концентрации Хл “а”.

У сканера SeaWiFS индекс цветности воды L_{wn490}/L_{wn555} (отношение нормализованной спектральной яркости каналов с длиной волны 490 и 555 нм) используется в качестве параметра в биооптическом алгоритме расчета концентрации Хл “а”. Значения среднеквадратичного отклонения (СКО)

для индекса цветности L_{wn490}/L_{wn555} и для Хл “а” соответственно составляют 0.1942 и 0.3082 (рис. 6). Опыт применения сканера цвета вод SeaWiFS для определения ряда параметров поверхностного слоя воды в Баренцевом море обсуждается в [3].

Далее по полученным оценкам СКО могут быть определены вероятности появления ошибок, например, с применением известного в статистике правила 3σ . Так, при концентрации Хл “а”, равной 0.5 мг/м^3 , вероятность расхождения на 0.3 мг/м^3 будет составлять $\sim 30\%$. Для данной концентрации это достаточно существенная погрешность.

Значительные расхождения значений статистических оценок для индекса цветности воды и концентрации Хл “а” свидетельствуют о больших погрешностях при применении стандартного алгоритма расчета концентрации Хл “а” для Охотского моря. Точность алгоритмов можно существенно повысить, имея достаточное количество данных, полученных в условиях *in situ* (подспутниковые судовые или стационарные измерения).

В целом, несмотря на очевидный прогресс, повышение точности и адекватности алгоритмов оценки концентрации Хл “а” по цветности воды ограничено небольшим количеством и географическим распределением одновременно полученных данных по параметрам излучения и концентрациям Хл “а” *in situ*. Недостаточное количество информационного материала для калибровки алгоритмов, а также ошибки выбора структуры биооптических алгоритмов являются основными факторами, снижающими точность расчетов концентраций Хл “а”.

Существенно увеличить объем измерений концентрации Хл “а” можно с помощью современных технологий, например, применяя проточный лазерный флуориметр. Он позволяет на ходу судна проводить измерения интенсивности флуорес-

ценции Хл “а”, возбуждаемой солнечным излучением в морской среде. Подобные измерения выявили связь интенсивности свечения Хл “а” с его содержанием в воде и скоростью фотосинтеза [9]. На основании характеристик флуоресценции естественной морской воды изучаются также особенности распределения таких экологически важных параметров как растворенные органические вещества разного происхождения и нефтепродукты. Спектры и интенсивность флуоресценции последних зависят от типа исходной нефти и от времени ее пребывания в морской среде, что позволяет проводить опознавание источников нефтяного загрязнения среды, оценивать толщину нефтяного пятна на поверхности и возраст разлитой нефти. Флуоресцентные индикаторы (например, растворы красителей родамина, флуоресцемина и др.) используются для исследований перемещений водных масс, динамики и распространения загрязняющих веществ, в том числе компонентов сточных вод, в водных средах [9]. Использование аппаратуры для измерения интенсивности флуоресценции значительно снижает затраты на отбор проб и проведение контактных измерений, а также сокращает время на обработку проб и одновременно увеличивает в несколько раз объем данных по статистике измерений. Увеличение объема измерений позволяет осуществить разработку региональных биооптических алгоритмов для оценки концентрации фитопланктона [6].

ПОДСПУТНИКОВЫЕ КОНТАКТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ Хл “а” В ОХОТСКОМ МОРЕ

Для выявления соответствий и привязки получаемых со спутников ДДЗ и данных судовых наблюдений проводят так называемые подспутниковые комплексные океанологические исследования на специально выбираемых морских полигонах. В их программу могут быть включены гидрологические, гидрохимические, гидробиологические и биохимические исследования, которые выполняются с борта судов синхронно по времени со спутниковыми дистанционными зондированиями морской поверхности [15]. В августе 2001 и 2002 г. в Охотском море был проведен сбор информации о фитопланктоне с борта НИС “Надежда” с участием специалистов ДВО РАН из Тихоокеанского океанологического института, Института биологии моря, Дальневосточного государственного университета, Дальневосточной государственной морской академии и Тихоокеанского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии.

Научная программа была направлена на изучение состояния планктонного сообщества шельфовых зон Японского и Охотского морей. В судовых условиях проводились комплексные измерения биооптических, гидрологических и гидрохимических параметров поверхностных вод, которые использо-

вались в моделях по оценке влияния природных и антропогенных факторов на функционирование первого трофического звена морских экосистем. Измерения включали в себя лазерную флуориметрию и лазерную искровую спектроскопию состояния морской воды, измерение T и солёности воды, стандартные измерения концентрации Хл “а” и гидрохимических параметров.

Для географически привязанных судовых наблюдений была выполнена подборка ДДЗ вод на морской поверхности. Сравнительный анализ концентраций Хл “а”, оцененных во время рейса НИС “Надежда” (рис. 7) и с помощью спутниковых данных, указывает на существенные различия их абсолютных значений и характера распределения.

Так, судовые данные по всем районам Охотского моря, где были проведены измерения (рис. 7а), дают близкое к типичному для большинства районов Мирового океана логнормальное распределение с модой ~ 0.3 мкг/л, в то время как мода всех полученных по маршруту судна спутниковых концентраций (рис. 7б) близка к концентрации 0.6 мкг/л и форма их распределения явно отлична от логнормальной.

Различия наблюдаются и при рассмотрении данных, полученных за 1 сут (27 августа 2002 г.). Судовые измерения дают двумодальное распределение с максимумами ~ 0.2 и 1.5 мкг/л (рис. 7в), а спутниковые данные имеют моду в ~ 1 мкг/л (рис. 7г). Две моды концентраций в судовых наблюдениях соответствуют измерениям в различных типах вод во фронтальной зоне банки Кашеварова.

Выполненная двумя способами (рис. 6 и 7) оценка точности расчета концентрации Хл “а” свидетельствует о больших ошибках (в частности, сопоставление гистограмм показывает на систематическое завышение концентраций) при применении спутникового глобального алгоритма расчета концентрации Хл “а” для Охотского моря. Из этого следует вывод, что для повышения точности наблюдений следует выполнить процедуру корректировки используемых соотношений в биооптических алгоритмах для различных районов Охотского моря. Такая работа для отдельных районов Охотского моря была выполнена впервые. В результате получены корректирующие поправки к коэффициентам биооптического алгоритма.

Впервые вместо интерактивной технологии применялась информационная технология автоматической обработки данных со спутников SEASTAR и TERRA, которая позволяла находить спектральные данные по дате и географическим координатам судна. Поскольку набор подспутниковых измерений, полученных проточным лазерным флуорометром, был довольно велик, то разработанная технология позволила существенно сократить время на поиск и обработку информации. В табл. 2 приведен фрагмент обработки данных подспутниковых контактных измерений концентраций Хл “а” по результатам

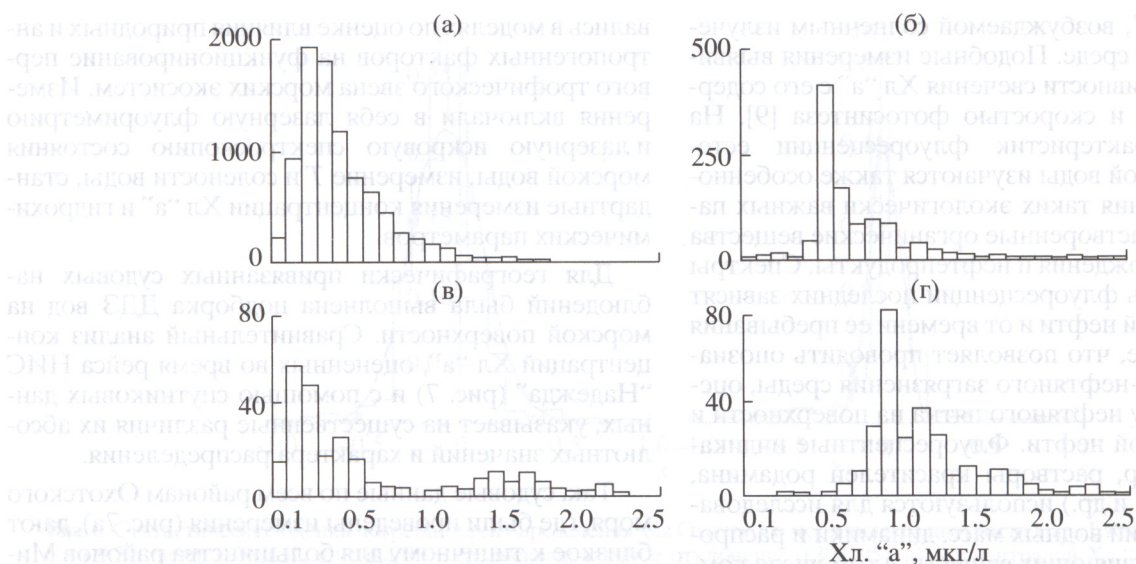


Рис. 7. Гистограммы концентраций Хл “а”. а, в – судовые измерения; б, г – восстановленные по спутниковым данным (по вертикальной оси – объем выборки).

судовых наблюдений на НИС “Надежда” и данных сканера SeaWiFS в Охотском море, вычисленных по биооптическим алгоритмам.

В дальнейшем контактные измерения Хл “а” в Охотском море могут проводиться методами регистрации пассивного и активного индуцированного излучения в различных спектральных диапазонах (видимый, ультрафиолетовый и т.д.), поскольку в

настоящее время ряд фирм активно работает над созданием аппаратуры лазерной спектроскопии – LDI (Laser Diagnostic Instruments Inc) разрабатывает измерительные лазерные устройства FLS, которые могут применяться в судовом либо воздушном (airborne) вариантах; OCEAN OPTICS ведет разработку устройств оптоволоконной спектрометрии; AVANTES выпускает спектроскопические и флуориметрические устройства.

Таблица 2. Сравнительный анализ концентрации Хл “а” по данным спутниковых (SeaWiFS) и подспутниковых измерений НИС “Надежда” в Охотском море (фрагмент)

Яркость восходящего излучения канала SeaWiFS, нм								Концентрация Хл “а” (0.01 × мг/л)		(9)–(10), %
412	443	490	510	555	670	765	865	9*	10**	11
1	2	3	4	5	6	7	8			
616	548	406	337	238	99	44	23	12	23	11
646	584	441	373	271	131	71	46	15	28	12
646	584	441	373	271	131	71	46	16	28	12
650	593	454	385	286	145	79	51	20	26	5
650	593	454	385	286	145	79	51	24	26	2
650	593	454	385	286	145	79	51	27	26	0
650	593	454	385	286	145	79	51	28	26	2
650	593	454	385	286	145	79	51	36	26	10
684	613	482	409	335	178	119	77	39	39	0
684	613	482	409	335	178	119	77	41	39	2

* – по результатам судовых наблюдений на НИС “Надежда” в Охотском море методом лазерной флуориметрии;

** – концентрация (0.01*мг/л) Хл “а”, рассчитанная по спутниковым данным.

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИТОПЛАНКТОНА В ОХОТСКОМ МОРЕ ЗИМОЙ И РАЗРАБОТКА СРЕДСТВ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ СПУТНИКОВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Анализ годового цикла изменений концентрации фитопланктона впервые был показан по результатам математического моделирования состояния экосистемы прол. Лаперуза [11] и зал. Анива [12]. Впоследствии [7, 10, 20] факт кратковременной вспышки фитопланктона в период становления льда в южной части Охотского моря был подтвержден спутниковыми и судовыми наблюдениям (рис. 4). Также была проведена оценка температурного режима, при котором возникает цветение. Дальнейшие исследования зимнего цветения фитопланктона основывались на использовании ежедневных снимков спутника MODIS, начиная с 2002 г., когда снимки для региона Охотского моря стали поступать регулярно. Анализ пространственного распределения концентрации Хл “а” по данным дистанционного зондирования со спутника TERRA MODIS (от 25 января 2002 г.) подтверждает соотношения, ранее полученные со спутника SeaWiFS (рис. 5).

Для других районов Охотского моря зимний рост фитопланктона в 2002 г. также отмечен, но он не был столь ярко выражен. Дальнейшие исследования показали, что рост концентрации Хл “а” в осенне-зимний период характерен не только для зал. Анива, но и для других районов моря (например, зал. Терпения). При этом более чем в 30% случаев абсолютные значения концентрации Хл “а” в осенне-зимний период могут быть выше, чем весной. Например, на снимке со спутника TERRA-MODIS за 1 января 2006 г. хорошо идентифицируется зимняя вспышка фитопланктона не только в зал. Анива, но и в зал. Терпения и в акваториях, свободных от дрейфующего льда (у берегов Приморья и на южной оконечности о. Хоккайдо) (рис. 8). Результаты моделирования показали, что зимний максимум развития диатомовых водорослей в зал. Анива определяется концентрацией силикатов [10, 12, 20].

Отметим, что при рассмотрении изменений концентраций Хл “а” в продуктивный период (апрель–ноябрь) выявлена корреляционная связь между среднегодовыми концентрациями Хл “а” и содержанием в охотоморской воде силикатов. Значение коэффициента корреляции между этими переменными в апреле–октябре оценено равным 0.508 (прол. Лаперуза), а в июне–октябре – 0.997, 0.762 и 0.569 соответственно в водах прол. Лаперуза, юго-западной части Охотского моря и северо-восточного шельфа о. Сахалин. Важно также, что для Охотского моря не обнаружено зависимости развития фитопланктона от содержания фосфатов [16].

Визуализация данных дистанционного зондирования была выполнена с применением ГИС-техно-

логий (программная оболочка ArcGIS), которые позволяют более удобно представлять спутниковую информацию по сравнению с традиционными пакетами обработки данных дистанционного зондирования, поскольку в одном окне могут отображаться данные разных снимков в виде тематических слоев. ГИС-технологии предоставляют дополнительные интерактивные возможности для исследования количественных и качественных характеристик океанографических процессов и иллюстрации результатов моделирования.

ВЫВОДЫ

Расчет гидрофизических параметров поверхности и цветности вод океана в зарубежных центрах обработки данных производится по осредненным для всего Мирового океана алгоритмам, калиброванным по данным контактных измерений в различных его районах. Поскольку контактных измерений по Охотскому морю очень мало, то при калибровке глобальных спутниковых алгоритмов они не применялись. Соответственно, точность расчета концентрации Хл “а” для вод Охотского моря невелика. Однако точность расчетных данных может быть значительно увеличена при условии разработки регионального биооптического алгоритма расчета концентрации Хл “а” для региона Охотского моря. Для калибровки регионального алгоритма необходимо проведение подспутниковых контактных наблюдений (эпизодических или постоянных, судовых или авиационных) для привязки спутниковых данных к условиям того региона Охотского моря, мониторинг состояния которого предполагается проводить.

Космические технологии ДДЗ предусматривают эпизодическую замену спутников и, соответственно, установку более совершенной аппаратуры сканирования поверхности Земли. Как показано в настоящей работе, использование предлагаемых штатных программ обработки спутниковых данных для Охотского моря приводит к существенным погрешностям (>30%). Поэтому процедура корректировки биооптических алгоритмов путем проведения подспутниковых контактных измерений необходима для каждого поколения сканеров. Основоположающими условиями организации мониторинговых наблюдений за изменением концентрации фитопланктона в Охотском море является:

– формирование геоинформационной базы данных спутниковых наблюдений на основе регулярного сбора информации;

– совершенствование методики оперативной обработки информации и ее последующего анализа с целью выявления условий колебания концентрации фитопланктона “а” под воздействием природных и антропогенных факторов (например, в случае нефтяных загрязнений). Планирование и проведение



Рис. 8. Фрагмент космического снимка, показывающего распределение Хл "а" 01.I.2006 г. 1 – 1.0 мкг/л, 2 – 0.4, 3 – 0.2 мкг/л, 4 – суша. Расчет выполнен по данным спутника TERRA-MODIS в центре обработки данных NASA.

подспутниковых экспериментов желательно в периоды пиков цветения фитопланктона в разных районах моря;

выполнение сопоставительного анализа полученных разными способами данных (прямые и дистанционные наблюдения, расчеты с помощью математической модели данных) для формулировки корреляционных соотношений, необходимых для прогностических оценок. Методическая часть проблемы создания регионального алгоритма для Охотского моря разработана. Имеющиеся технологии могут быть адаптированы для расчета концентрации Хл "а" по региональному алгоритму для конкретных районов Охотского моря. Максимальный

эффект будет достигнут при совместной обработке данных контактных измерений не только концентрации Хл "а", но и T воды поверхности моря.

Информация со спутников TERRA и AQUA в настоящее время является адекватным источником данных, позволяющим отслеживать пространственно-временную изменчивость распределения фитопланктона в Мировом океане практически в режиме реального времени. Спутниковые центры, расположенные в различных регионах планеты, с помощью биооптических алгоритмов по спектральной яркости каналов в видимой области спектра проводят расчет концентрации Хл "а" с разрешением 1×1 км (в том числе и для акватории Охотского моря), что

вполне достаточно для решения большинства биологических задач мониторинга морских объектов. Однако данных Интернет-ресурса свободного доступа не всегда достаточно. Поэтому для оперативных задач обработку данных спутниковых наблюдений для региона Охотского моря наиболее целесообразно выполнять в г. Южно-Сахалинске на базе наземной станции Министерства природных ресурсов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Букин О.А., Пермяков М.С., Хованец В.А. и др. Сравнительный анализ результатов измерения концентраций хлорофилла "а", полученных с использованием данных сканера цвета морской поверхности SeaWiFS и методом лазерной индуцированной флуоресценции в Охотском море // Исследование Земли из космоса. 2003. № 4. С. 84–90.
2. Булатов Н.В., Куренная Л.А., Муктепавел Л.С. и др. Вихревая структура вод южной части Охотского моря и ее сезонная изменчивость (результаты спутникового мониторинга) // Океанология. 1999. Т. 39. № 1. С. 36–45.
3. Буренков В.И., Еришова С.В., Копелевич О.В. и др. Оценка пространственного распределения хлорофилла в водах Баренцева моря по данным спутникового сканера цвета океана SeaWiFS // Океанология. 2001. Т. 41. № 5. С. 653–659.
4. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А., Ведерников В.И. Характеристики эпипелагических систем Тихого океана на основе спутниковых и экспедиционных данных // Океанология. 1996. Т. 36. № 2. С. 241–249.
5. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А., Копелевич О.В., Шеберстов С.В. Фотосинтетическая продукция Мирового океана по спутниковым и экспедиционным данным // Океанология. 1996. Т. 36. № 4. С. 566–575.
6. Зенкин О.В. Оптимальное выделение структур информации на примере классификации вод Охотского моря по данным цветного спутникового сканера SeaWiFS // Изв. ТИНРО. 2003. Т. 133. № 3. С. 288–296.
7. Зенкин О. В. Разработка методики оценки геоэкологической обстановки в водах Охотского моря на основе спутниковых данных MODIS. Дис. ... канд. техн. наук. Южно-Сахалинск: Сахалинский филиал ДВГИ ДВО РАН, 2004. 148 с.
8. Зенкин О.В. Классификация биооптических свойств водной поверхности по спутниковым данным цветности воды // Матер. междунар. науч. конф. "Фундаментальные проблемы изучения и использования воды и водных ресурсов", Иркутск: Ин-т географии СО РАН, 2005. С. 113–114.
9. Карабьшев Г.С. Флуоресцентные методы в исследованиях и освоении океана (обзор) // Океанология. 1996. Т. 36. № 2. С. 165–172.
10. Леонов А.В., Могильникова Т.А., Пищальник В.М., Зенкин О.В. Характеристика развития микроводорослей в Охотском море в зимних условиях и моделирование изменений их годового хода в водах залива Анива // Вод. ресурсы. 2006. Т. 34. № 2. С. 204–215.
11. Леонов А.В., Пищальник В.М. Изучение условий функционирования экосистемы залив Анива–пролив Лаперуза // Вод. ресурсы. 2003. Т. 30. № 5. С. 616–636.
12. Леонов А.В., Пищальник В.М. Биотрансформация органогенных веществ в водах залива Анива: оценка с помощью математического моделирования // Вод. ресурсы. 2005. Т. 32. № 5. С. 558–574.
13. Пищальник В.М., Бобков А.О. Океанографический атлас шельфовой зоны острова Сахалин. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2000. Ч. I. 174 с. Ч. II. 108 с.
14. Пузанков К.Л., Шевченко Г.В. Анализ и прогнозирование сезонных вариаций температуры поверхности Охотского моря по спутниковым данным // Тез. докл. XII междунар. конф. по промышленной океанологии. Калининград: АтлантНИРО, 2002. С. 201–202.
15. Романов А.А., Сапожников В.В. Комплексный подспутниковый эксперимент в Черном море // Океанология. 1997. Т. 37. № 5. С. 792–797.
16. Цхай Ж.Р. Анализ сезонных вариаций концентраций хлорофилла "а" методом естественных ортогональных функций в Охотском море по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. 2007. № 6. С. 37–45.
17. Bukin O.A., Permyakov M.S., Puzankov K.L. et al. Comparison analysis of the ship's and satellite chlorophyll A data in the coastal water of the sea of Okhotsk // 3 SPIE Remote Sensing Symposium. Mombetsu, 2002. V. 4892. P. 32.
18. GES DISK: Goddard Earth Sciences. Data Information Service Center. <http://daac.gsfc.nasa.gov>
19. Matsumoto Ch., Saitoh S., Takahashi F., Wakatsushi M. Use of multi-sensor remote sensing to detect seasonal and inter-annual variability in chlorophyll "a" distribution in the Sea of Okhotsk // PICES Sci. Rep. 2004. № 26. P. 151–154.
20. Pishchalnik V.M., Leonov A.V., Mogilnikova T.A., Zenkin O.V. Winter development of diatom microalgae in the Sea of Okhotsk // The 21th Intern. Sympos. on Okhotsk Sea & Sea Ice and Internat. Workshop on Rational Evaluation of Ice Forces on Structures. Mombetsu, 2006. P. 125–129.
21. Saitoh Sei-ichi, Motoaki K., Hidetada J. et al. Seasonal variability of phytoplankton pigment concentration in the Okhotsk Sea // J. Remote Sensing Soc. of Japan. 1996. V. 16. № 2. P. 86–93.