

На правах рукописи



ШТРАЙХЕРТ ЕЛЕНА АРКАДЬЕВНА

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХЛОРОФИЛЛА-А В ЯПОНСКОМ И
ОХОТСКОМ МОРЯХ ПО СПУТНИКОВЫМ И СУДОВЫМ
ДАНЫМ**

Специальность 25 00 28 – океанология

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата географических наук

Владивосток - 2008



Работа выполнена в Тихоокеанском океанологическом институте им В И Ильичева
Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель кандидат биологических наук, доцент
Захарков Сергей Петрович

Научный консультант доктор физико-математических наук
Митник Леонид Моисеевич

Официальные оппоненты доктор географических наук, профессор
Плотников Владимир Викторович

кандидат физико-математических наук
Алексанин Анатолий Иванович

Ведущая организация Тихоокеанский научно-исследовательский
рыбохозяйственный центр

Защита диссертации состоится “ 15 “ мая 2008 г в 14 часов на заседании
диссертационного совета Д 005 017 02 в Тихоокеанском океанологическом институте
им В И Ильичева ДВО РАН по адресу 690041, г Владивосток, ул Балтийская, 43

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Тихоокеанского
океанологического института им В И Ильичева ДВО РАН

Автореферат разослан “ 14 “ апреля 2008 г

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 005 017 02
кандидат географических наук



Храпченков Ф Ф

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы определяется необходимостью изучения биопродуктивности морей дальневосточного региона России. Концентрация хлорофилла-*a* является одной из важнейших биопродукционных характеристик водного бассейна. Хлорофилл-*a* - это пигмент, который присутствует во всех зеленых растениях, в частности, в фитопланктоне. Содержание хлорофилла-*a* в воде может служить показателем гидрологических особенностей водоема. Фитопланктон является первым звеном трофической цепи и, следовательно, определяет биопродуктивность всей экосистемы Мирового океана. Определение биопродуктивности водоемов при помощи методов, основанных на взятии дискретных проб, затруднительно. Пространственный и временной охват наблюдений, доступных для дискретных методов, не позволяет получить детальную информацию об океанологических процессах в обширных акваториях. Более полную информацию о распределении хлорофилла-*a* и других параметров в приповерхностном слое вод можно получить, используя спутниковые наблюдения. Оценка концентрации хлорофилла-*a* из космоса основана на измерении спектра уходящего излучения Земли на верхней границе атмосферы. Составляющая спектра этого излучения – восходящее излучение моря. Оно зависит от концентрации хлорофилла-*a*, а также от концентрации, распределения по размерам и состава частиц органического и неорганического происхождения. Взаимодействие восходящего излучения моря с атмосферой существенно усложняет определение концентрации хлорофилла-*a*. Тем не менее, спутниковые измерения служат основой для построения длительных временных рядов концентрации хлорофилла-*a*, позволяют исследовать ее синоптическую и сезонную изменчивость. В работе для исследования концентрации хлорофилла-*a* использовались данные, полученные датчиком цвета океана SeaWiFS со спутника OrbView-2 и спектрорадиометром MODIS со спутников Terra и Aqua. Для интерпретации результатов привлекались поля ТПО, восстановленные из измерений радиометра AVHRR со спутников серии NOAA, и поля приводного ветра, найденные по наблюдениям скаттерометра SeaWinds со спутника QuikSCAT.

Для оценки первичной продукции водоема необходимо знать значения концентрации хлорофилла-*a* с минимальными погрешностями. Решение этой задачи сопряжено со значительными трудностями, так как точность спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a*, особенно в прибрежных районах, мала. Погрешность спутниковых оценок зависит от таких факторов как состояние атмосферы (количества и состава аэрозоля, наличия дымки, вариаций содержания озона и др.), присутствие в воде оптически активных компонент (взвесь терригенного и органического происхождения, растворенная органика) и их вертикального распределения в приповерхностном слое. Для снижения погрешности необходима верификация и региональная коррекция спутниковых оценок по судовым подспутниковым измерениям.

Целью работы является выявление временных и пространственных закономерностей распределения хлорофилла-*a* в отдельных районах Японского и Охотского морей, верификация и коррекция спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a*.

В связи с поставленной целью решались следующие задачи:

- 1 Проведение судовых измерений концентрации хлорофилла-*a* и формирование на их основе массива сопряженных судовых и спутниковых данных
- 2 Изучение изменчивости распределения хлорофилла-*a* в водах Охотского и Японского морей, в частности, в зал Петра Великого
- 3 Исследование изменчивости концентрации хлорофилла-*a*, обусловленной океанологическими процессами
- 4 Верификация и коррекция спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a* по судовым данным

Обоснованность и достоверность полученных результатов определяются

- точностью экстрактного спектрофотометрического метода, при помощи которого были получены судовые оценки концентрации хлорофилла-*a* в рейсах 1999-2004 гг., и большим количеством выполненных наблюдений,
- достоверностью спутниковых данных, полученных из международного центра хранения и обработки спутниковой информации по цвету океана при

Центре космических полетов им Годдарда в НАСА (NASA GSFC), и используемыми в работе методами обработки этих данных,

- большим объемом сопряженных спутниковых и судовых данных о концентрации хлорофилла-*a*, полученных в различных физико-географических условиях

Научная новизна состоит в

- формировании большого массива судовых измерений и спутниковых данных по концентрации хлорофилла-*a*,

- выявлении максимумов концентрации хлорофилла-*a* в холодном секторе Японского моря и заливе Петра Великого, приходящихся на апрель-май и ноябрь,

- обнаружении связи между скоростью, направлением ветра и концентрацией хлорофилла-*a* в осенний период в заливе Петра Великого,

- выявлении максимумов концентрации хлорофилла-*a*, усредненных для всего Охотского моря, приходящихся на май-июнь и сентябрь-октябрь, а также для акваторий, прилегающих к северо-восточному и юго-восточному побережью о Сахалин, отмечаемых в июне и в сентябре-октябре и в мае и в октябре, соответственно,

- выявлении возможной причины резких межгодовых различий концентрации хлорофилла-*a* в районе у северо-восточного побережья о Сахалин,

- обосновании необходимости региональной и сезонной коррекции спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a* в Японском и Охотском морях и в получении уравнений коррекции на основе судовых измерений

Научная и практическая значимость

Результаты и выводы диссертации могут быть использованы

- при изучении гидробиологических процессов в дальневосточных морях России,

- при планировании и проведении мониторинга экологического состояния этих морей,

- для оценки биопродуктивности северо-западной части Японского моря

Положения, выносимые на защиту:

- в результате анализа сезонного хода концентрации хлорофилла-*a* в Японском море за 1999-2003 гг показано, что в холодном секторе моря и, в частности, в зал Петра Великого наблюдаются максимумы, в апреле-мае и в ноябре,
- изменение концентрации хлорофилла-*a* в осенний период в зал Петра Великого обусловлено ветровым апвеллингом и термической конвекцией,
- в усредненных по акватории Охотского моря значениях средней за месяц концентрации хлорофилла-*a*, выявлены максимумы в мае-июне и в сентябре-октябре,
- у северо-восточного побережья о Сахалин максимумы концентрации хлорофилла-*a* наступают в июне и в сентябре, а в районе у юго-восточного побережья острова – в мае и в октябре,
- у северо-восточного побережья о Сахалин, в северо-западной части Японского моря и, особенно, в зал Петра Великого спутниковые оценки концентрации хлорофилла-*a* в большинстве случаев превышают судовые измерения в 1,5 раза и более,
- спутниковые оценки концентрации хлорофилла-*a* могут быть скорректированы по полученным в работе линейным уравнениям, параметры которых были рассчитаны с учетом сезонной изменчивости и физико-географических особенностей

Апробация работы Результаты исследований были представлены на следующих российских и международных конференциях региональная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике (ДВГУ, Владивосток, 2000), молодежная конференция ТОИ ДВО РАН по океанологии (Владивосток, 2001), Annual Meetings of North Pacific Marine Science Organization PICES PICES-99 (Vladivostok, Russia, 1999), PICES-2001 (Victoria, Canada, 2001), PICES-2003 (Vladivostok, Russia, 2003), PICES-2005 (Vladivostok, Russia, 2005), International Symposium on Oceanography of the East Asian Marginal Seas CREAMS-2000 (Vladivostok, Russia, 2000), International Symposium “Atmospheric and Ocean Optics Atmospheric Physics” (Irkutsk, Russia, 2001), International Conference “Current Problems in Optics of Natural Waters” (St Petersburg, Russia, 2001), International Pan Ocean Remote Sensing Conference PORSEC (Bali, Indonesia, 2002) Результаты диссертации докладывались также на океанологических семинарах ТОИ ДВО РАН

Публикации По теме диссертации опубликовано 17 работ, из которых 3 - в журналах из списка ВАК Список научных работ приведен в конце автореферата

Структура и объем работы Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения Она содержит 160 страниц печатного текста, в том числе 48 иллюстраций, 15 таблиц, библиография включает 161 наименование

Личный вклад автора

Все результаты, включенные в диссертацию, получены автором самостоятельно или на равных правах с соавторами Автор принимал непосредственное участие на всех этапах проведенного исследования, включая разработку методики обработки спутниковых данных, обработку спутниковых и экспериментальных судовых данных, анализ полученных результатов Вклад автора был, как правило, определяющим при получении судовых данных, разработке методики обработки спутниковых данных, написании докладов Автор принимал непосредственное участие в отборе проб воды для определения пигментов фитопланктона в экспедициях в зал Петра Великого на НИС “Луговое” (23 11-02 12 1999 г., 03 03-11 03 2000 г.), в северо-западной части Японского моря на НИС “Павел Гордиенко” (14 04-23 04 1999 г.), в Охотском море на НИС “Профессор Гагаринский” (02 06-16 06 2000 г.) Кроме того, автор самостоятельно определял пигменты фитопланктона практически во всех рейсах, упомянутых в диссертации

Благодарности. Работа выполнена в ТОИ ДВО РАН под научным руководством канд биол наук Захаркова С П, которому автор выражает свою искреннюю благодарность Автор также благодарит научного консультанта д-ра физ-мат наук Митника Л М, канд геогр наук Лобанова В Б, д-ра физ-мат наук Пермякова М С, канд физ-мат наук Алексанина А И и д-ра физ-мат наук Шевченко Г В за многочисленные консультации и ценные замечания при подготовке работы Автор благодарит сотрудников международного центра космических полетов им Годдарда НАСА за предоставление спутниковых данных по цвету океана и программного обеспечения SeaDAS, а также сотрудника Института океанографии им Скриппса Мати Кари за предоставление программы WIM/WAM Автор выражает искреннюю признательность и благодарность коллегам по работе за помощь и моральную поддержку

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируются цели и задачи исследования. Показана научная новизна и практическая значимость работы, формулируются положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор литературы по изучению содержания хлорофилла-*a* в Японском и Охотском морях, как по судовым, так и спутниковым данным. Изложена суть метода спутниковых измерений концентрации хлорофилла-*a*. Приводятся сведения о специфике ошибок спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a*.

В разделе 1.1 излагается современное состояние вопроса по изучению распределения хлорофилла-*a* в Японском и Охотском морях по судовым данным. Приводятся сведения о временном и пространственном распределении хлорофилла-*a* в исследуемых морях.

В разделе 1.2 излагаются особенности определения концентрации хлорофилла-*a* со спутников. В разделе 1.2.1 описан метод определения концентрации хлорофилла-*a* в приповерхностном слое воды по спутниковым данным. Метод основан на пассивном дистанционном зондировании океана в оптическом диапазоне спектра. Рассматриваются физические основы этого метода. В разделе 1.2.2 приводятся алгоритмы расчета концентрации хлорофилла-*a* по спутниковым данным с учетом коэффициентов яркости моря. Наилучшими эмпирическими алгоритмами были признаны OC2 и OC4. Они основаны на эмпирической взаимосвязи между концентрацией хлорофилла-*a* и отношением коэффициентов яркости моря на длинах волн 490 и 555 нм для OC2, и 443, 490, 510, 555 нм для OC4. Коэффициент яркости моря зависит от оптических свойств водной среды и может быть выражен через показатели поглощения (a) и обратного рассеяния и (b) основных цветообразующих компонент хлорофилла фитопланктона (chl), минеральной взвеси (me), растворенного органического вещества ($ров$). В этом и предыдущем разделах также обосновывается необходимость коррекции спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a*, обусловленной региональной и сезонной изменчивостью оптических характеристик вод. Эмпирические алгоритмы расчета концентрации хлорофилла-*a* по спутниковым данным о цвете океана, найденные для вод первого типа, не могут быть применены к водам второго типа. Необходимо согласование этих алгоритмов с условиями среды. При этом возникают трудности, связанные с получением приемлемого количества одновременных спутниковых и судовых оценок для получения статистически значимых

корреляционных зависимостей. Поэтому в ряде случаев исследования проводились на выборках малого объема. В разделе 1.2.3 приводится перечень спутников, предназначенных для регистрации цвета океана. Также приводятся сведения о сканере цвета океана SeaWiFS и спутнике OrbView-2. В данной работе, в основном, были использованы данные о концентрации хлорофилла-*a* с указанного сканера.

Раздел 1.3 посвящен рассмотрению работ по изучению изменчивости распределения хлорофилла-*a*, обусловленной океанологическими процессами. Отмечено, что в северной и в северо-западной части Японского моря изменчивость концентрации хлорофилла-*a* изучена недостаточно. Согласно литературным данным, таяние льда рассматривается в качестве основного процесса, ведущего к изменчивости концентрации хлорофилла-*a* для Охотского моря. Рассмотрению влияния других океанологических процессов в научной литературе уделяется мало внимания.

В **разделе 1.4** дан обзор работ, посвященный сравнительному анализу спутниковых оценок с судовыми измерениями концентрации хлорофилла-*a*, их коррекции, выделению структурных особенностей био-оптических характеристик в верхнем слое океана. Сравнение спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a* с судовыми проводилось в юго-восточной части Японского моря вблизи о. Хонсю (Sasaoka K et al., 2002, Saitoh S et al., 2004). Отмечено, что в северо-западной части Японского моря не проводилось систематических одновременных наблюдений спутниковых и судовых оценок концентрации хлорофилла-*a*. Между тем оптические свойства вод холодного сектора Японского моря существенно отличаются от таковых в теплом секторе. Оптические характеристики вод Охотского моря более изменчивы. Поэтому для получения уравнений коррекции спутниковых концентраций хлорофилла-*a* необходимо разделение моря на области с однородными био-оптическими свойствами воды.

Вторая глава посвящена изложению методов получения судовых и спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a*, их обработки с целью верификации и коррекции. Также приводится описание используемых в работе данных о прозрачности воды и концентрации взвеси.

В **разделе 2.1** представлена информация о судовых данных. Приведена таблица рейсов, в которых были получены эти данные, с указанием времени их проведения и района исследования. В подразделе 2.1.1 представлена методика определения концентрации

хлорофилла-*a* в пробах морской воды Для определения концентрации хлорофилла-*a* во взвеси фитопланктона, осевшей на фильтры, был применен стандартный спектрофотометрический метод, основанный на анализе спектров поглощения экстракта хлорофилла-*a* в 90% ацетоне (Кобленц-Мишке, 1983, SCOR-UNESCO, 1966) В подразделах 2.1.2 и 2.1.3 приводятся методики определения прозрачности воды по глубине видимости диска Секки и оценки всей взвеси, присутствующей в морской воде, которая включает частицы биологического и терригенного происхождения

В разделе 2.2 дана характеристика спутниковых данных, применяемых в работе Для верификации и коррекции спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a* и изучения океанологических процессов в приповерхностном слое океана из Центра хранения и обработки спутниковой информации по цвету океана (Центр космических полетов им Годдарда НАСА) были получены спутниковые данные уровня 1 Они содержали файлы LAC (Local Area Coverage) с данными об излучении толщи моря в оптическом диапазоне спектра с пространственным разрешением данных 1,12 км×1,12 км, файлы с метеорологической информацией (поля давления, ветра, относительной влажности), полученные из Национального центра по прогнозу окружающей среды (National Center for Environmental Prediction - NCEP), и файлы с данными об общем содержании озона, регистрируемого спектрометром EP-TOMS (Earth Probe-Total Ozone Mapping Spectrometer) Эти данные позволили произвести атмосферную коррекцию радиационных потоков в спектральных каналах сканера цвета SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field-of view Sensor) при расчете концентрации хлорофилла-*a* по алгоритму OC2 с использованием программного обеспечения SeaDAS 4.6 Информация о приповерхностном ветре, полученная из центра NCEP, использовалась при изучении ветрового апвеллинга в зал Петра Великого Для изучения сезонной и межгодовой динамики концентрации хлорофилла-*a* использовались спутниковые данные уровня 3, имеющие временное разрешение 8 дней и 1 месяц Эти данные были получены с сайта <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/> Для построения распределения отклонений концентрации хлорофилла-*a* от среднего за несколько лет использовалось программное обеспечение WIM/WAM (Windows Image Manager/WIM Automation Module) Для изучения изменения продуктивности воды при ветровом апвеллинге были дополнительно проанализированы спутниковые изображения океана в инфракрасной области спектра, полученные со спутников NOAA и Aqua (EOS-PM1) Информация о направлении и скорости

приповерхностного ветра, была получена с сайта <http://www.ssmi.com>. Эти характеристики регистрировались скаттерометром со спутника QuikSCAT,

В разделе 2.3 оценка интенсивности апвеллинга производилась по его индексу Индекс апвеллинга рассчитывался по скорости и направлению приповерхностного ветра. Характеристики ветра извлекались из файлов метеорологической информации, полученной из центра NCEP, с помощью программного обеспечения SeaDAS 4.6

Раздел 2.4 посвящен разработке подхода для верификации (проверки) и коррекции спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a*, полученных по алгоритму OC2. В литературе, как правило, приводится сравнение спутниковых оценок с судовыми измерениями концентрации хлорофилла-*a* без рассмотрения проблем, которые возникают при этом. В первую очередь необходимо учесть неоднозначность спутниковой оценки и судового измерения по масштабу наблюдения. Судовое измерение является точечным, а спутниковая оценка - это оценка по объему воды. Этот объем определяется толщиной слоя, в котором формируется сигнал о восходящем излучении моря и пространственным разрешением спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a*. Учет неоднозначности, обусловленной толщиной слоя, в котором формируется сигнал о восходящем излучении моря, производился с помощью метода Гордона - Кларка (Gordon et al, 1983). Этот метод основан на расчете усредненной концентрации хлорофилла-*a* по вертикальному профилю в приповерхностном слое. Для учета неоднозначности, вызванной оценкой на определенной площади необходимо знать величину вариабельности концентрации хлорофилла-*a* на этом участке морской поверхности. За оценку вариабельности были взяты данные, представленные в статье (Букин и др., 2000). Также возникает проблема получения выборок одновременных спутниковых и судовых оценок концентрации хлорофилла-*a* с приемлемым объемом данных для построения уравнений коррекции. Во многих случаях для судовых измерений отсутствует спутниковая оценка из-за наличия облачности. Получение судовых измерений концентрации хлорофилла-*a* является трудоемкой работой. Для устранения этой проблемы решался вопрос об увеличении объемов выборок путем привлечения спутниковых оценок, полученных с разницей по времени от судовых наблюдений равной 0, 1, 2, 3 дня. При этом степень согласованности судовых измерений со спутниковыми оценками определялась из анализа значений выборочного коэффициента корреляции (r) между спутниковыми и судовыми данными о концентрации хлорофилла-*a*. Отмечено, что r был значимым между спутниковыми и

судовыми оценками, разница между которыми составляла 0, 1, 2 дня. Для оценок, которые были получены с разницей по времени измерения в 3 дня, r был статистически незначим. Поэтому в случаях, где наиболее приемлемые для исследования спутниковые оценки отсутствовали, они брались с разницей по времени их оценивания от судовых измерений в 1, 2 дня. Ввиду неоднородности морских акваторий по био-оптическим свойствам воды возникает необходимость разделения полученных выборок на подвыборки с одинаковыми свойствами данных. Оно производилось согласно следующим характеристикам данных в выборках: 1) коэффициента различия между спутниковыми и судовыми оценками концентрации хлорофилла-*a* (определяется как отношение спутниковой к судовой оценке концентрации хлорофилла-*a*), 2) судовой концентрации хлорофилла-*a* на станции, 3) расположению станции по отношению к берегу. В результате разделения выборок на подвыборки объемы данных в выборках уменьшались, но значения коэффициентов корреляции между спутниковыми и судовыми оценками концентрации хлорофилла-*a* увеличивались. Уравнения коррекции спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a* строились по данным полученных выборок. Уравнения были получены с помощью стандартного программного обеспечения. При линейной зависимости по сравнению с другими формами уравнений (логарифмическая, степенная, экспоненциальная) достигался более высокий коэффициент корреляции (R) между спутниковыми и судовыми оценками. При построении уравнений определялись выбросы. Выбросы исключались из данных, по которым строились уравнения. Коэффициенты корреляции полученных уравнений проверялись на статистическую значимость. При этом критические значения R определялись для 5%-ного уровня значимости из таблицы критических значений этого параметра. Ввиду того, что выборки, по которым строились зависимости, были малыми, то статистическая значимость коэффициентов корреляции, полученных зависимостей, также проверялась по критерию Стьюдента, использующего преобразование Фишера. В разделе приводится оценка ошибок уравнений коррекции.

В **третьей главе** рассматривается распределение хлорофилла-*a* в Японском и Охотском морях. С помощью программного обеспечения SeaDAS по спутниковым данным уровня 3 нами были построены среднемесячные распределения хлорофилла-*a* за 1999-2003 гг. Анализируются эти распределения. Приводится годовой ход среднемесячных спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a*, усредненных по районам исследования. Наряду со спутниковыми оценками анализируются также судовые данные.

Рассматриваются процессы, приводящие к изменчивости концентрации хлорофилла-а в исследуемых районах

Раздел 3.1 посвящен изучению распределения хлорофилла-а по спутниковым и судовым данным в Японском море. Согласно спутниковым данным о распределении хлорофилла-а за 1999-2003 гг., в целом для холодного сектора Японского моря отмечено два максимума развития фитопланктона. Они приходятся на апрель – май и ноябрь. По оценке Кима и др. (Kim et al., 2000), Копелевича и др. (Kopelevich et al., 2003, 2005), данной по распределениям соответственно за 1978-86 гг. и 1998-2004 гг., в Японском море (включая теплый сектор) наблюдаются весенний (март-май в первом случае и март-июнь во втором случае) и осенний (октябрь-декабрь в обоих случаях) пики цветения фитопланктона. На среднемесячных спутниковых распределениях хлорофилла-а прослеживаются два основных сектора – теплый и холодный с соответствующим ходом развития фитопланктона. Более четкое разделение моря на два сектора наблюдается в весенний период. Осеннее цветение фитопланктона распространяется по Японскому морю более равномерно, чем весеннее. Отмечено, что в ноябре возрастание концентрации хлорофилла-а распространяется на весь район Японского моря. В холодном секторе по повышенной концентрации хлорофилла-а можно выделить зал Петра Великого, прибрежную зону и район крупномасштабного циклонического круговорота над япономорской котловиной. Из анализа среднемесячных спутниковых полей концентрации хлорофилла-а, следует, что в зал Петра Великого пик весеннего увеличения этой биопродукционной характеристики приходится на апрель или май, а осеннего – на ноябрь. Из анализа судовых измерений следует, что для начала марта в целом характерны низкие значения концентрации хлорофилла-а. Лишь на станциях, где отмечено образование стратификации, наблюдались высокие концентрации пигмента в приповерхностном горизонте. Для середины апреля в прибрежной зоне максимум концентрации хлорофилла-а (около $1-1,5 \text{ мг/м}^3$) располагался на глубинах 5-25 м, а в мористой части акватории залива он располагался в приповерхностном горизонте. В середине ноября – начале декабря вертикальные профили концентрации хлорофилла-а характеризовались максимумом, располагавшимся, как правило, на глубине 10-25 м со значением около $1-5 \text{ мг/м}^3$.

В **разделе 3.2** на основе спутниковых данных о концентрации хлорофилла-а, ТПО, скорости и направлению приповерхностного ветра в 2003 и 2004 гг. рассматривается

влияние ветрового апвеллинга и термической конвекции воды на биопродуктивность зал Петра Великого осенью Показано, что апвеллинг и термическая конвекция в этот период приводят к максимуму концентрации хлорофилла-а в зал Петра Великого При сопоставлении спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а и значений индекса апвеллинга отмечено, что в сентябре и октябре между этими параметрами существовала взаимосвязь, а в ноябре отсутствовала Этот факт также подтверждается при сравнении среднемесячных распределений поля ветра, полученных скаттерометром со спутника QuikSCAT, с временным ходом концентрации хлорофилла-а в зал Петра Великого в осенний период Появление холодных вод на морской поверхности вдоль побережья Приморья в сентябре-октябре, наблюдаемое на спутниковых распределениях температуры воды, свидетельствует об апвеллинге Показано, что увеличение концентрации хлорофилла-а у побережья Приморья происходит при ветрах северо-западного и юго-западного направлений со скоростью от ~3 до ~10 м/сек

В разделе 3.3 рассматриваются распределения хлорофилла-а по спутниковым и судовым данным в Охотском море Отмечено, что первый максимум развития фитопланктона приходится на май или июнь, хотя иногда в южной части моря он сдвигается на апрель Второй максимум содержания хлорофилла-а уступает по величине первому и наблюдается в сентябре или октябре По спутниковым распределениям хлорофилла-а за 1999-2003 гг можно выделить определенные зоны весеннего цветения фитопланктона Цветение, как правило, начинается у юго-восточной части о Сахалин, в зал Шелихова, вдоль побережья п-ва Камчатка В июне концентрация хлорофилла-а в областях, охваченных цветением месяцем раньше, становится меньше, цветение перемещается в акваторию у северо-восточной части о Сахалин Распределение хлорофилла-а осенью имеет более равномерный характер, чем весной По данным судовых съемок у восточной части о Сахалин в конце мая - начале июня 1999 г и в июне 2000 г, отмечено, что в первом случае максимум биопродукционной характеристики располагался в приповерхностном горизонте, а во втором – на глубине 10-25 м Концентрация хлорофилла-а в максимуме составляла около 10 мг/м³

В разделе 3.4 обсуждаются механизмы, приводящие к изменчивости концентрации хлорофилла-а в Охотском море По спутниковым и судовым данным отмечены существенные межгодовые изменения содержания хлорофилла-а в районе у м Терпения в

1999 г и в 2000 г Показано, что возможной причиной этих изменений является изменение границ распространения на север соленых и теплых вод течения Соя Анализ профилей температуры и солености воды показал, что в 1999 г воды холодного промежуточного слоя в районе у м Терпения были замещены более теплыми и солеными водами Зимнее охлаждение более соленых вод было причиной более глубокой конвекции воды в 1999 г по сравнению с 2000 г Более глубокая конвекция воды привела к большему содержанию в эвфотическом слое биогенных элементов, что и было причиной более высоких концентраций хлорофилла-а в 1999 г по сравнению с 2000 г (Захарков и др, 2007)

Отмечено, что в водах у восточного побережья о Сахалин максимальные концентрации хлорофилла-а наблюдаются над свалом глубин Причиной этих максимальных концентраций, по всей видимости, являются приливные течения В 1999 г и 2000 г на свале глубин зарегистрировано размывание галоклина Верхняя его часть вышла на поверхность В придонном же слое соленость по сравнению с окружающими станциями уменьшилась Такой процесс характерен для приливно-отливного перемешивания Вследствие перемешивания и подъема вод в поверхностном слое на станциях, на которых было зафиксировано поднятии изохалин, отмечалось увеличение концентрации хлорофилла-а по сравнению с окружающими ее станциями

В разделе 3.5 обобщается материал, представленный в третьей главе Сравниваются концентрации хлорофилла-а в Японском и Охотском морях. Концентрация хлорофилла-а в весеннем максимуме развития фитопланктона по среднемесячным спутниковым оценкам для Охотского моря составила $4-5 \text{ мг/м}^3$, а для Японского – $1-3 \text{ мг/м}^3$ В осеннем максимуме концентрация хлорофилла-а для Охотского моря отмечена в пределах $1,5-3 \text{ мг/м}^3$, а для Японского – $0,5-2 \text{ мг/м}^3$ По пяти кривым годового хода концентрации хлорофилла-а и усредненным за 5 лет (1999 - 2003 гг) отклонениям спутниковых оценок пигмента от его среднегодовых значений, были выявлены особенности распределения данного биопродукционного параметра. Отмечено, что весенние максимумы концентрации хлорофилла-а в холодном секторе Японского моря и зал Петра Великого не всегда наступают одновременно в отличие от осенних Оценка концентрации хлорофилла-а, полученная усреднением за год среднемесячных спутниковых данных, для холодного сектора Японского моря составляла около $0,6 \text{ мг/м}^3$, а для зал Петра Великого 1 мг/м^3 Для Охотского моря она составляла около $1,2 \text{ мг/м}^3$, а для вод северо-восточной и юго-восточной частей о Сахалин соответственно $1,6$ и $1,7 \text{ мг/м}^3$

Четвертая глава посвящена анализу спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а и сравнению их с судовыми данными, а также получению уравнений коррекции для районов Японского и Охотского морей

В **разделе 4.1** проводится верификация спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а и построение уравнений коррекции для Японского моря Судовые данные, используемые при верификации спутниковых оценок, были получены в восьми рейсах, проведенных в 1999-2004 гг., на 210 станциях Отмечено, что в районе исследования преобладали воды с концентрацией хлорофилла-а около $0,6 \text{ мг/м}^3$ Сравнение спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а с судовыми измерениями показало, что для холодного сектора Японского моря спутниковые значения, в большинстве случаев, завышены более чем на 35 % В зал Петра Великого завышение спутниковых оценок относительно судовых составляло более 200% В южной части моря они не превышали 35 % Этот результат согласуется с исследованиями японских коллег Ошибки спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а, приведенные в работе Сазаоки и др (Sasaoka K. et al, 2002) для станций, расположенных в юго-восточной части Японского моря вблизи от о. Хонсю, не превышают 35% В зал Петра Великого также были зафиксированы заниженные спутниковые оценки концентрации хлорофилла-а Больше всего их наблюдалось на прибрежных станциях во время проведения осенне-зимнего рейса НИС “Луговое” с 23.11 по 03.12.1999 Отмечено, что занижение спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а не превышает 72 % Завышение спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а более чем на 200% характерно для данных, полученных в весенний период По спутниковым оценкам, сопряженным во времени и пространстве с судовыми измерениями строились уравнения связи, называемые в работе уравнениями коррекции Вывод этих зависимостей подробно представлен в разделе 2.4 В разделе 4.1 уравнения строились по выборкам, полученным за время проведения рейсов Эти выборки не разделялись на подвыборки После коррекции спутниковых оценок гистограмма концентрации хлорофилла-а стала сравнима с гистограммой, построенной по судовым данным При применении уравнений для коррекции независимых данных следует учитывать время и район их получения, величину концентрации хлорофилла-а

В **разделах 4.2, 4.3, 4.4** сравниваются результаты верификации спутниковых оценок в подвыборках данных, проводится анализ уравнений коррекции по этим выборкам Судовые

данные для построения этих уравнений были получены в рейсах НИС “Павел Гордиенко” (14 04-23 04 1999 г), “Луговое” (23 11-03 12 1999 г, 01 03-11 03 2000 г), “Проф Гагаринский” (02 06-16 06 2000 г)

В разделе 4.5 рассматриваются оценки ошибок уравнений коррекции спутниковых концентрации хлорофилла-а, построенных по данным для однородного и неоднородного полей концентрации хлорофилла-а. Для однородного поля ошибка определяется главным образом точностью судовых измерений, спутниковых оценок для вод первого типа, несовпадением спутниковых и судовых значений из-за разницы во времени их определения. Точность судовых измерений определяется зависимостью, представленной в разделе 2.1.1. Известно, что ошибка спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а для вод первого типа составляет 35%. Ошибка, возникающая из-за одновременности определения концентрации хлорофилла-а спутниковым и судовым методом, принималась равной 20%. При расчете ошибки построения уравнения коррекции для неоднородного поля концентрации хлорофилла-а учитывалась изменчивость этой концентрации в пределе пикселя спутникового изображения, что составляет 50% от среднего значения. Эта оценка взята из данных, представленных в статье О.А. Букина и др. (2000). Относительная результирующая ошибка составляет 60-80%.

В разделе 4.6 обобщается содержание четвертой главы. Отмечено, что для Японского и Охотского морей спутниковые оценки концентрации хлорофилла-а, в большинстве случаев, завышены. Встречаются случаи, когда они занижены. Обнаружено, что заниженные спутниковые оценки концентрации хлорофилла-а в северо-восточной части Охотского моря имеют место над зоной свала глубин, а в зал Петра Великого - у побережья в осенний период. Отмечено, что в зал Петра Великого максимальные ошибки спутниковых оценок составляют примерно 500% при концентрации хлорофилла-а около 3 мг/м³ (по судовым данным). Ошибки спутниковых оценок в заливах о Кюсю и Хонсю (Япония), также достигали 300-500% (Ishizaka, 2007).

Рассчитаны коэффициенты линейной регрессии $Y = AX + B$, где Y и X - соответственно скорректированная и нескорректированная спутниковая оценка концентрации хлорофилла-а, и коэффициенты корреляции R между спутниковыми оценками и судовыми измерениями. Эти уравнения использовались для коррекции спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а. Коэффициенты найдены для 1)

отдельных рейсов и конкретных сезонов, 2) зон, отличающихся по физико географическим условиям (по подвыборкам данных) и 3) массива данных по всем рейсам (табл 1) Для увеличения объема, выборки со сравнимыми коэффициентами различия и концентрацией хлорофилла-*a* объединялись Были объединены мористая и промежуточная зоны в рейсе НИС "Павел Гордиенко" и мористая зона в осеннем рейсе НИС "Луговое" с промежуточной зоной рейса НИС "Павел Гордиенко" Применение найденных уравнений к спутниковым данным, полученным по исследуемым районам, приводит к существенному улучшению согласия дистанционных и судовых оценок концентрации хлорофилла-*a*, что следует из данных табл 2 С помощью программы WIM/WAM по средним концентрациям хлорофилла-*a* за период с 15 по 30 апреля было построено среднее за 10 лет (1998-2007 гг) распределение для Японского моря Отдельно для каждого года были рассчитаны отклонения концентрации хлорофилла-*a* от среднемноголетнего распределения (рис 1) Для холодного сектора моря сравнивались распределения концентрации хлорофилла-*a*, усредненные за 2 недели в апреле Значительная межгодовая изменчивость этих распределений вызвана, по-видимому, смещением гидробиологического сезона год от года в исследуемом районе Одним из критериев выбора уравнения коррекции является проверка совместимости гидробиологических сезонов, что осуществляется по величине концентрации хлорофилла-*a* Судовые оценки концентрации хлорофилла-*a*, которые использовались в этой проверке, были получены в рейсах НИС "Академик Лаврентьев" (07 05-18 05 04) и "Профессор Гагаринский" (07 04-05 06 01 и 14 11-03 11 03) Показано, что после коррекции спутниковых оценок, взятых из независимых выборок, их ошибки уменьшились (рис 2) Ошибки спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a* до коррекции составляли ~91%, ~178%, ~95% После коррекции по уравнениям, полученным по выборкам данных для отдельных рейсов, ошибки снизились до ~(12±7)%, ~(25±13)%, ~(89±9)%, а по уравнениям, построенным по подвыборкам – до ~(3±4), ~(44±12)%, ~(20±5)%

Таблица 1

Районы и время рейсов, в которых измерялась концентрация хлорофилла-а
 R – коэффициент корреляции, N - объем выборки Aoc2 и Voc2 – коэффициенты регрессии, рассчитанные при применении к спутниковым данным алгоритма OC2,
 C - средняя оценка концентрации хлорофилла-а по спутниковым измерениям, сопряженным с судовыми

НИС	Зоны	Время проведения рейса	Район, координаты	\bar{C} , мг/м ³	Aoc2	Voc2	R	N
Японское море								
Павел Гордиенко		14 04 - 23 04 99	39,97-43,24 с ш 130,57-132,28 в д	2,5	0,36	0,15	0,89	21
	мористая и промежуточная	14 04 - 23 04 99	39,97-42,78 с ш 130,57-132,05 в д	1,7	0,49	0,04	0,94	14
	прибрежная	14 04 - 23 04 99	43,11-43,25 с ш 131,8-132,28 в д	4,6	0,25	0,29	0,97	6
Луговое		23 11- 03 12 99	42,29-42,93 с ш 130,72-133,04 в д	1,6	0,76	0,46	0,67	36
	мористая	23 11- 03 12 99	42,23-42,8 с ш 131,68-132,2 в д	1,7	0,54	-0,19	0,94	13
	западная часть прибрежной зоны	23 11- 03 12 99	30 км от западного побережья зал Петра Великого	1,4	0,44	0,85	0,85	14
	восточная часть прибрежной зоны	23 11- 03 12 99	30 км от восточного побережья зал Петра Великого	2	0,86	0,57	0,92	15
Луговое		01 03 - 12 03 2000	42,28-42,96 с ш 130,74-131,6 в д	1,1	0,91	-0,36	0,85	15
	мористая	01 03 - 12 03 2000	42,28-42,8 с ш 130,74-133,04 в д	1,5	0,26	-0,02	0,96	7
	прибрежная	01 03 - 12 03 2000	30 км от западного и восточного побережья зал Петра Великого	0,7	1,08	-0,07	0,99	8
Профессор Хромов		22 07 - 13 08 99	38,78-41,31 с ш 131,3-134,01 в д	0,3	1,02	-0,18	0,82	9
Профессор Хромов		29 02 - 22 03 2000	35,84-46,63 с ш 129,84-140,5 в д	0,5	0,85	0,06	0,75	49
Охотское море								
Профессор Гагаринский	мористая и прибрежная	02 06 - 16 06 2000	53,0-54,5 с ш 143,37-144,95 в д	4,6	0,34	-0,1	0,92	9

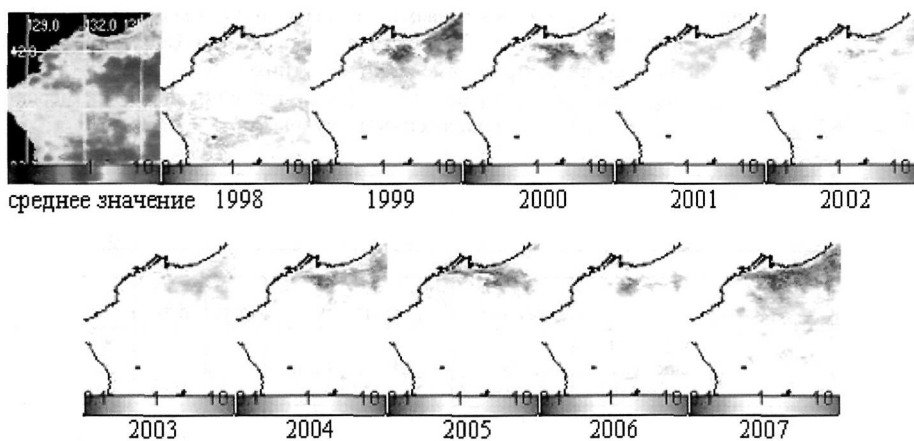


Рис. 1. Межгодовая изменчивость концентрации хлорофилла-а в апреле 1998-2007 гг. по данным спутниковых измерений. Верхнее левое изображение показывает среднее распределение, а последующие изображения в верхнем и нижнем рядах - отношение концентрации хлорофилла за конкретные годы к средней концентрации.

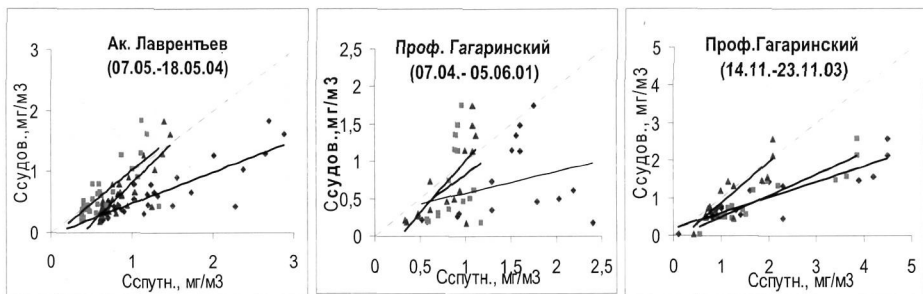


Рис. 2. Сравнение судовых измерений концентрации хлорофилла-а со спутниковыми оценками: \blacklozenge - до проведения коррекции; \blacksquare - после коррекции по уравнениям для конкретных сезонов (весна и осень); \blacktriangle - после коррекции по уравнениям для конкретных сезонов и выделенных зон.

Таблица 2

Относительные ошибки спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а до и после коррекции, рассчитанные по средним значениям в выделенной зоне

зоны	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$	зоны	$\varepsilon_1, \%$	$\varepsilon_2, \%$
Японское море			Охотское море		
мористая и промежуточная	110	7±65	мористая и прибрежная	190	0±62
прибрежная	290	19±62			
вместе	190	17±65			
Залив Петра Великого					
ноябрь-декабрь, 1999 г			март, 2000 г		
мористая	150	0±64	мористая	250	0±64
восточная часть прибрежной зоны	-20	8±67	прибрежная	-6	0±62
западная часть прибрежной зоны	-7	0±62			
вместе	-7	-3±67	вместе	63	-3±77

В заключении сформулированы основные результаты работы

- 1 По спутниковым данным выявлено, что весенние максимумы концентрации хлорофилла-а в холодном секторе Японского моря и зал Петра Великого не всегда наступают одновременно в отличие от осенних,
- 2 Показано, что увеличение концентрации хлорофилла-а у побережья Приморья происходит при ветрах северо-западного и юго-западного направлений, скорости которых составляют от ~3 до ~10 м/сек
- 3 Среднемесячные спутниковые оценки весеннего максимума концентрации хлорофилла-а для всего Охотского моря отражают таковые у северо-восточного побережья о Сахалин, в отличие от акватории, прилегающей к юго-восточному побережью этого острова.
- 4 Показано, что возможной причиной межгодовой изменчивости концентрации хлорофилла-а в акватории, прилегающей к юго-восточному побережью о Сахалин является изменение границ распространения на север вод течения Соя, имеющих повышенную соленость, определяющую глубину конвективного перемешивания
- 5 Выявлено, что
 - в открытых районах холодного сектора Японского моря ошибки спутниковых оценок концентрации хлорофилла-а, как правило, превышают 35%,

- в зал Петра Великого спутниковые оценки концентрации хлорофилла-*a* превышают судовые более, чем на 200%,

- на акватории у северо-восточного побережья о Сахалин спутниковые оценки концентрации хлорофилла-*a* в большинстве случаев завышены в среднем на 200%

6 По найденным соискателем регрессионным уравнениям выполнена коррекция спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a* Показано, что после коррекции для выбранных районов ошибка оценки снизилась для

- северо-западной части Японского моря в апреле 1999 г с $\sim 300\%$ до $\sim 20 \pm 60\%$,

- зал Петра Великого в конце ноября – начале декабря 1999 г примерно со 150% до $\sim 0 \pm 60\%$, в марте 2000 г с $\sim 250\%$ до $\sim 0 \pm 60\%$,

- северо-западной части Охотского моря в июне 2000 г с $\sim 200\%$ до $\sim 0 \pm 60\%$

7 Показана применимость полученных соискателем уравнений коррекции спутниковых оценок концентрации хлорофилла-*a* к независимым выборкам (оценкам концентрации хлорофилла-*a* за другие годы)

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1 ШГрайхерт Е.А., Захарков С П Определение концентрации хлорофилла-*a* методом регистрации восходящего излучения моря // Тез докл региональной конф студентов, аспирантов и молодых ученых по физике Владивосток, 1999 С 62-63

2 Schtrakhert E.A, Alekseev A V, Vanin N S, Yurasov G I, Zakharkov S P Chlorophyll-*a* and the hydrological conditions in Peter the Great Bay in autumn of 1999 // CREAMS abstracts, Vladivostok, Russia, May 15-16, 2000 Vladivostok, 2000 P 40

3 Schtrakhert E.A, Alekseev A V, Stonik I V, Shevchenko O G Phytoplankton and pigment concentration distribution in Peter the Great Bay in autumn of 1999 // CREAMS abstracts, Vladivostok, Russia, May 15-16, 2000 P 40

4 Zakharkov S P, Schtrakhert E A, Alekseev A V, Vanin N S, Yurasov G I Influence the hydrological condition on distribution of chlorophyll-*a* concentration in Peter the Great Bay in autumn of 1999 // PICES abstracts, Canada, October 5-13, 2001 P 60

5 Захарков С П, Орлова Т Ю, Ванин Н С, ШГрайхерт Е.А. Пигментный и видовой состав фитопланктона на северо-востоке Охотского моря в марте-апреле 1998 г // Океанология 2001 т 41, № 5 С 711-718

- 6 **Schtraikhert E.A.**, Zakharkov S P Determination of chlorophyll-*a* concentration on the sea surface using SeaWiFS // Eight Intern Symp on Atmospheric and Ocean Optics Atmospheric Physics Proc of SPIE Irkutsk, June 25-29, 2001 Washington, USA, 2001 V 4678 P 454-463
- 7 **Schtraikhert E.A.**, Zakharkov S P The calibration of the SeaWiFS data by shipborne measurements // Eight Intern Symp on Atmospheric and Ocean Optics Atmospheric Physics Proc of SPIE Irkutsk, June 25-29, 2001 Washington, USA, 2001 V 4678 P 463-471
- 8 **Schtraikhert E.A.**, Zakharkov S P Calibration of satellite monitoring data on chlorophyll-*a* distribution on the sea surface // Current problems in optics of natural waters Proc Intern Conf St-Petersburg Russia September 25-29, 2001 St-Petersburg, 2001 P 209-215
- 9 Захарков С П, Бейбоу Н, Ниммергут А, Селина М С, **Штрайхерт Е.А.** Распределение биологических сообществ // Мониторинг метана в Охотском море сб науч ст / под ред А И Обжирова Владивосток Дальнаука, 2001 С 42-54
- 10 **Штрайхерт Е.А.**, Захарков С П Восстановление распределения хлорофилла-*a* в поверхностных водах залива Петра Великого на основе данных SeaWiFS // Океанологические исследования Сб ст по материалам конф молодых ученых ТОИ ДВО РАН (27-30 ноября 2001 г) / отв ред Р Г Кулинич Владивосток Дальнаука, 2002 С 84-88
- 11 **Schtraikhert E.A.**, Zakharkov S P Investigation of the seasonal variability in the chlorophyll-*a* concentration, using SeaWiFS data // Proceedings PORSEC, Bali, Indonesia September 3-6, 2002 Bali, 2002 P 80-84
- 12 **Штрайхерт Е.А.** Результаты верификации спутниковых данных по концентрации хлорофилла-*a* в поверхностном слое вод дальневосточных морей России Владивосток, 2002 23 с – Деп в ВИНТИ 07 08 02 № 1454
- 13 **Schtraikhert E.A.**, Zakharkov S P The accuracy of chlorophyll-*a* concentration estimates of the SeaWiFS satellite color scanner from the data for Sea of Okhotsk in the spring-summer time // PICES Scientific Report № 26 proc of the 3rd Workshop on the Okhotsk Sea and Adjacent Areas Vladivostok, June 4-6, 2003 Canada, Sydney, 2004 P 139-143
- 14 **Schtraikhert E.A.**, Zakharkov S P Variability of chlorophyll-*a* concentration caused by wind upwelling in Peter the Great Bay in autumn of 2003 // Pacific Oceanography 2005 V 3, № 2 P 136-143

- 15 **Штрайхерт Е.А.**, Захарков С П, Дьяков С Е Коррекция спутниковых оценок на основе судовых измерений концентрации хлорофилла-*a* для Японского моря // Исследование Земли из космоса 2006 № 6 С 72-82
- 16 Захарков С П, Селина М С, Ванин Н С, **Штрайхерт Е.А.**, Бибоу Н 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
- 17 **Штрайхерт Е.А.** Оценка концентрации хлорофилла-*a* по спутниковым данным в Японском море // Океанологические исследования тез докл конф молодых ученых ТОИ ДВО РАН Владивосток, 2007 С 36-37

ЕЛЕНА АРКАДЬЕВНА ШТРАЙХЕРТ

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ХЛОРОФИЛЛА-А В ЯПОНСКОМ И
ОХОТСКОМ МОРЯХ ПО СПУТНИКОВЫМ И СУДОВЫМ ДАННЫМ

Автореферат

Изд лиц ИД № 05497 от 01 08 2001 г Подписано к печати 18 03 2008 г
Формат 60x84/16 Печать офсетная Усл п л 1,5 Уч -изд л 1,0
Тираж 100 экз Заказ 54

Отпечатано в типографии ФГУП Издательство «Дальнаука» ДВО РАН
690041, г Владивосток, ул Радио, 5