

На правах рукописи



Цхай Жанна Романовна

**ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ
КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА-А В ПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ
ОХОТСКОГО МОРЯ И ПРИЛЕГАЮЩИХ АКВАТОРИЙ
ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ**

Специальность 25.00.28 – океанология

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата географических наук

Южно-Сахалинск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном научном учреждении «Сахалинский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии» и Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук **Шевченко Георгий Владимирович**

Официальные оппоненты:

Филатов Николай Николаевич, доктор географических наук, профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник Отдела комплексных научных исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института водных проблем Севера Карельского научного центра Российской академии наук, г. Петрозаводск

Лаврова Ольга Юрьевна, кандидат физико-математических наук, доцент, заведующая Лабораторией аэрокосмической радиолокации Отдела «Исследование Земли из космоса» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института космических исследований Российской академии наук

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук

Защита состоится « 27 » ноября 2017 г. в 12 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.239.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте океанологии им. П. П. Ширшова Российской академии наук по адресу: г. Москва, 117997, Нахимовский пр., 36.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте <http://www.ocean.ru/disser/> Института океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан « » 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

кандидат физико-математических наук

Гинзбург Анна Ивановна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Важнейшим условием рационального использования морских биоресурсов является оценка состояния морских экосистем [Кропотов и Кривенко, 1999]. Оценка биопродукционного потенциала дальневосточных морей, в которых ведется интенсивный рыбный промысел, важна, прежде всего, для решения практических промысловых и прогностических задач. Одним из основных параметров биопродуктивности океанических вод является фитопланктон – первичное звено трофических цепей водных экосистем [Винберг, 1960; Водоросли, 1989], который с помощью фотосинтеза создает органическое вещество, являющееся энергетической основой для последующих этапов продукционного процесса [Алимов, 1989, 2000]. Жизненный цикл фитопланктона напрямую связан с гидрологическими процессами в океанах, микроводоросли являются одним из идентификаторов динамики вод. Фотосинтетические пигменты относятся к наиболее часто используемым показателям при изучении фитопланктона водных экосистем. Установка спектрорадиометров на искусственных спутниках Земли позволила получать оперативные и регулярные данные о распределении концентрации хлорофилла-*a* на поверхности.

Работы по изучению концентрации хлорофилла-*a* дистанционными методами в первую очередь касались верификации и коррекции спутниковых оценок в некоторых районах Охотского моря [Фефилов, 2003; Штрайхерт, 2008]. На основе этих исследований были разработаны методики расчета региональных алгоритмов восстановления концентрации хлорофилла-*a* по спутниковым данным [Зенкин, 2003; Букин и др., 2003; Штрайхерт, 2008]. Однако недостатками этих работ были малый объем и краткосрочные периоды сравниваемых данных. Во всех случаях в качестве спутниковой информации были использованы измерения со сканера SeaWiFS.

В это же время появились статьи японских ученых, в которых на основе спутниковых измерений был проведен анализ сезонной динамики

концентрации хлорофилла-*a* в Охотском море по данным сканера CZCS, осредненным за 1978–1986 гг. [Saitoh *et al.*, 1996]. Также были предприняты попытки изучения межгодовой изменчивости по данным спектрорадиометров SeaWiFS и OCTS за 1996–1999 гг. [Fukuda *et al.*, 2000] и 1998–2001 гг. [Matsumoto *et al.*, 2004]. Эти исследования охватили непродолжительный временной промежуток и практически не затронули последние десятилетия, когда над акваторией дальневосточных морей произошла перестройка климатических процессов, повлекшая за собой изменение океанологических условий [Глебова, 2014].

В настоящее время на шельфе Охотского моря ведется активное освоение нефтегазовых месторождений, что делает актуальным постоянный мониторинг краткосрочных и долговременных изменений морской экосистемы под воздействием естественных и антропогенных факторов. Эффективным и практически единственным средством такого мониторинга является спутниковая информация.

Цель диссертационной работы – исследование пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-*a* на поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий по спутниковым данным.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Создание базы спутниковых данных о концентрации хлорофилла-*a* на поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий, полученных со сканеров SeaWiFS и MODIS.
2. Сравнение спутниковых данных, полученных со сканера MODIS, и судовых измерений концентрации хлорофилла-*a* в поверхностном слое изучаемой акватории.
3. Определение характера сезонных и межгодовых особенностей распределения концентрации хлорофилла-*a* с использованием метода естественных ортогональных функций (ЕОФ).
4. Выявление факторов, влияющих на сезонную и межгодовую изменчивость концентрации хлорофилла-*a* в Охотском море.

Научную новизну исследования составляют основные положения, выносимые на защиту:

1. На представительном материале за период с 2004 по 2012 г. показано, что спутниковые данные сканера цвета MODIS хорошо согласуются с данными судовых съемок на большей части акватории Охотского моря и Татарского пролива Японского моря. Для сканера SeaWiFS определены границы районов, для которых необходима коррекция спутниковых данных.
2. На основе анализа большого объема спутниковых измерений с помощью метода ЕОФ дано описание закономерностей сезонной и межгодовой динамики концентрации хлорофилла-*a*, выделены сезонные фазы развития и районы повышенного продуцирования фитопланктона в поверхностном слое Охотского моря и прилегающих акваторий.
3. Установлено, что в начале 2010-х годов в западной части Охотского моря и Татарском проливе произошло изменение динамики концентрации хлорофилла-*a* в летний период по сравнению с предыдущим десятилетием, которое, вероятно, стало следствием наблюдавшегося климатического сдвига (усиления южного переноса в атмосфере и увеличения температуры поверхности воды).

Достоверность научных результатов определяется значительным объемом и высоким качеством спутниковых и судовых данных. Для изучения пространственно-временных вариаций концентрации хлорофилла-*a* на поверхности Охотского моря был применен широко распространенный в метеорологии и океанологии метод естественных ортогональных функций (ЕОФ). Результаты, полученные в ходе исследований, хорошо согласуются с результатами других авторов [*Мордасова и Метревели, 1997; Матвеев, 2008*].

Научное и практическое значение исследования. Полученные данные о вариациях концентрации хлорофилла-*a* могут быть использованы при анализе продукционных характеристик Охотского моря, изменений гидрологических

условий акватории и пространственного распределения гидробионтов в трофической цепи. Результаты работы и полученные в ней выводы могут быть применены при разработке прогнозов запаса промысловых объектов и оценке антропогенного воздействия при добыче полезных ископаемых на шельфе дальневосточных морей.

Апробация. Основные положения диссертации были представлены на конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов Мирового океана» (Владивосток, 2004), XIII Международной конференции по промысловой океанологии (Светлогорск, 2005), Чтениях памяти Владимира Яковлевича Леванидова (Владивосток, 2005), Международном симпозиуме “Climate Variability and Sub-Arctic Marine Ecosystems” (Виктория, Канада, 2005), Международной конференции организации PORSEC (Пусан, 2006), отраслевой конференции «Математическое моделирование и информационные технологии в исследованиях биоресурсов Мирового океана» (Владивосток, 2007), Всероссийской научной конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы в Дальневосточном регионе» (Южно-Сахалинск, 2011), Международной конференции «Дистанционное зондирование окружающей среды: научные и прикладные исследования в Азиатско-Тихоокеанском регионе» (Владивосток, 2013), на Всероссийской научной конференции «Геодинамические процессы и природные катастрофы. Опыт Нефтегорска» (Южно-Сахалинск, 2015).

Личный вклад автора. Автор непосредственно участвовал во всех этапах диссертационной работы: обработке и анализе спутниковых и судовых данных с помощью статистических и математических методов, разработке необходимого программного обеспечения на языке программирования IDL, обсуждении и интерпретации полученных результатов. Автор принимал участие в подготовке результатов исследований к опубликованию в журналах и лично представлял их на российских и международных конференциях.

Публикации соискателя по теме диссертации. Материалы диссертации полностью изложены в работах, опубликованных соискателем. По теме

диссертации опубликовано 15 работ, включая четыре статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, две работы – в сборниках статей и девять тезисов докладов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 145 наименований. В работе содержатся 50 иллюстраций и 10 таблиц. Общий объем диссертации – 125 страниц.

Благодарности. Автор выражает глубокую признательность своему научному руководителю д. ф.-м. н. Г. В. Шевченко. Автор благодарит к. г. н. Н. С. Ванина, В. П. Дудкова, к. г. н. А. Л. Фигуркина, Д. Н. Чульчекова и других сотрудников ТИНРО-Центра и СахНИРО, принявших участие в сборе и подготовке экспедиционного материала для данной работы. Автор также сердечно благодарит к. г. н. Г. В. Хен, к. г. н. С. Ю. Глебову и М. Е. Кузнецова за внимательное отношение и полезные советы при подготовке данной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дана общая характеристика работы, в том числе обоснована актуальность темы, определены основная цель исследования и поставленные задачи, указаны основные положения, выносимые на защиту, достоверность полученных результатов, научная и практическая значимость работы, личный вклад автора и апробация полученных результатов.

В **Главе 1** изложена изученность вопроса, описаны материалы и методы исследования. **Разделы 1.1–1.3** имеют обзорный характер. В **разделе 1.1** дана характеристика фитопланктона как источника хлорофилла-*a*. В **разделе 1.2** изложен краткий исторический обзор исследований фитопланктона в Охотском море и Татарском проливе Японского моря с 30-х годов XX столетия и по настоящее время. Подчеркнуто, что в настоящее время фундаментальные и прикладные исследования фитопланктона в большей степени приобретают прогностический характер [Селина, 1998]. В **разделе 1.3** приведены

особенности сезонной изменчивости, горизонтального и вертикального распределения фитопланктона и хлорофилла-*a* в Охотском море и Татарском проливе. По данным комплексных экспедиций, проведенных учеными ВНИРО, ТИНРО и ИО РАН в 1990–1994 гг., Охотское море характеризуется высокой биопродуктивностью. Это обусловлено присутствием в воде большого числа биогенных элементов, чей постоянный приток обеспечивается за счет сложной динамической структуры вод, включающей в себя систему вдольбереговых течений, значительный объем речного стока и заток тихоокеанских вод [Мордасова, 1997]. Для Японского моря характерно неравномерное распределение фитопланктона, что связано с наличием двух физико-географических областей: бореальной и субтропической [Зернова, 1980].

В разделе 1.4 описаны материалы и методы исследования. В данной работе рассматривались ежесуточные спутниковые данные о концентрации хлорофилла-*a* в районе, ограниченном координатами 135–163° с. ш. и 42–60° в. д. с разрешением 1000×1022 точки:

1. спектрорадиометра SeaWiFS искусственного спутника Земли (ИСЗ) OrbView-2 за период с 2001 по 2004 г., полученные станцией TeraScan, установленной в СахНИРО;

2. спектрорадиометра MODIS ИСЗ Aqua за период с 2002 по 2013 г., предоставленные Ocean Color Processing Group (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>).

Для оценки точности спутниковых данных были использованы судовые данные о концентрации хлорофилла-*a*, полученные в экспедициях ТИНРО-Центра на НИС «Профессор Кагановский» с 2004 по 2010 г. и СахНИРО на НИС «Дмитрий Песков» и «Профессор Пробатов» в 2001–2002 гг. и 2010–2012 гг.

При анализе факторов, влияющих на распределение концентрации хлорофилла-*a*, использовались данные по температуре поверхности воды и концентрации льда, полученные станцией TeraScan СахНИРО со спутников серии NOAA с 2003 по 2013 г. Необходимые биохимические показатели морской среды были рассчитаны на основе данных «Океанографического

атласа шельфовой зоны острова Сахалин» [Пищальник и Бобков, 2000]. Для количественного описания пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-*a* был использован метод ЕОФ [Багров, 1959].

В **Главе 2** даны физико-географическая характеристика района исследований, общая характеристика климата, на формирование которого в большой степени влияют географическое расположение акватории и муссонная циркуляция атмосферы. Кроме того, описаны гидрологические и гидрохимические условия района, в том числе схема течений в Охотском море и Татарском проливе и динамика водообмена через Амурский лиман.

Глава 3 посвящена сравнению спутниковых данных, полученных сканером MODIS ИСЗ Aqua, и судовых данных о концентрации хлорофилла-*a*. Для оценки точности спутниковых данных необходима верификация и их коррекция на основе судовых измерений. При анализе данных со сканера SeaWiFS ряд исследований привел к выводу, что стандартный алгоритм расчета концентрации хлорофилла-*a* дает существенно завышенные значения его содержания для Охотского моря, а это, в свою очередь, делает невозможным использование алгоритма для данного региона [Букин и др., 2003; Фефилов, 2003; Штрайхерт, 2008].

В настоящей работе в качестве материалов спутниковых измерений использованы данные сканера MODIS. В ходе исследования выяснилось, что сопоставить достаточное количество пар значений по спутниковым и судовым данным не представлялось возможным. Поэтому для оценки сопоставимости спутниковых и судовых измерений было решено применить метод, основанный на сравнении характеристик, осредненных по определенной площади, а в качестве определения достоверности различий использовать критерий Стьюдента [Лакин, 1973]. Сетка судовых станций была достаточно репрезентативна, так как охватывала районы, в частности побережье Камчатки и северную часть Охотского моря, в периоды максимального сезонного продуцирования фитопланктона.

На рисунке 1 показаны изменения концентрации хлорофилла-*a* в разные годы во время весенней съемки.

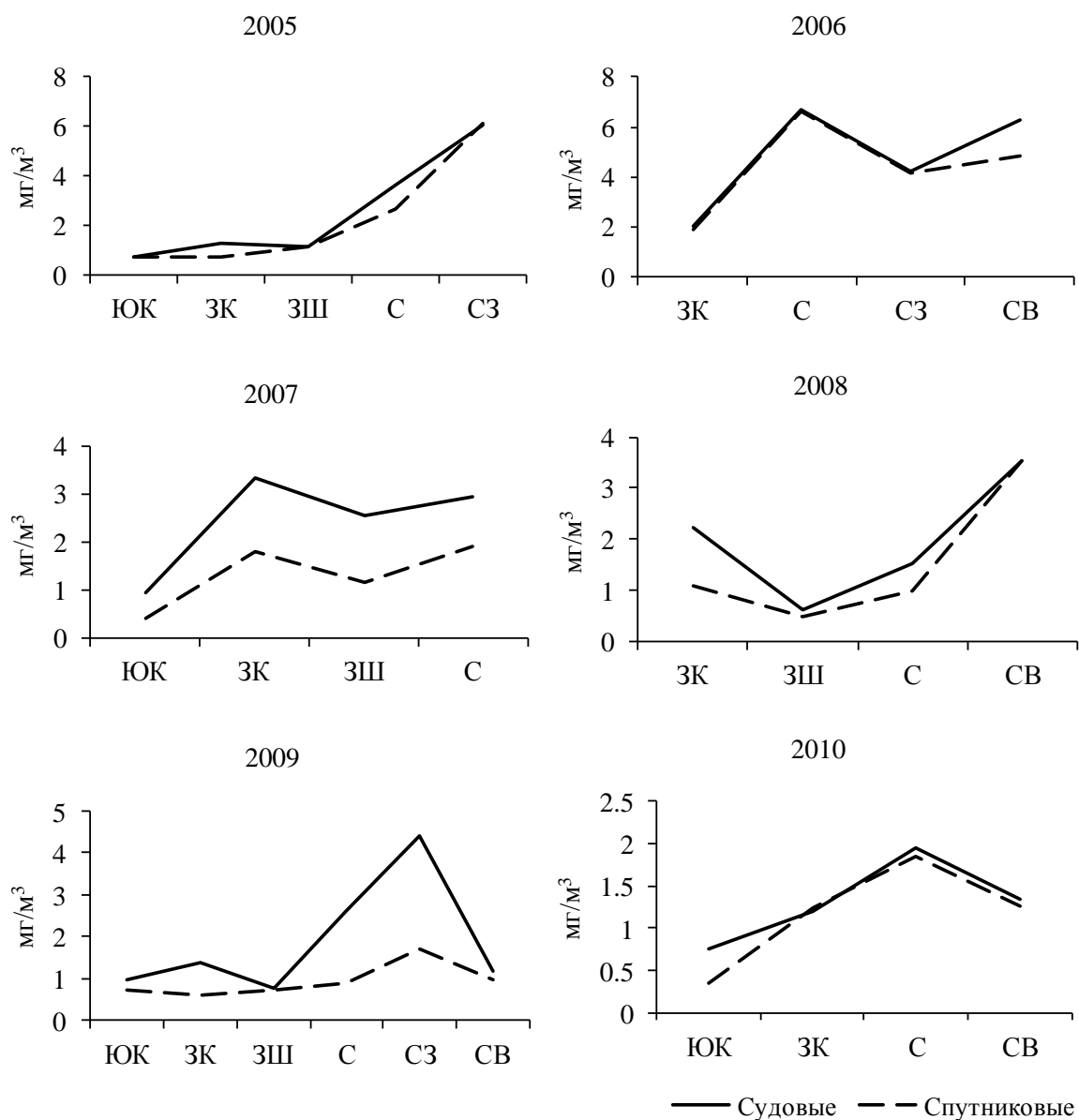


Рисунок 1. Изменчивость средней концентрации хлорофилла-*a* (мг/м³) по спутниковым и судовым данным во время весенней съемки в следующих районах Охотского моря: ЮК – Южные Курилы; ЗК – западно-камчатский шельф; ЗШ – залив Шелихова; С – северная часть Охотского моря; СЗ – северо-западная часть Охотского моря; СВ – северо-восточный шельф Сахалина

За период с 2004 до 2012 г. сравнительный ряд значений средней концентрации хлорофилла-*a* по спутниковым и судовым данным включил в себя 67 наблюдений. Коэффициент корреляции между спутниковыми

(MODIS/Aqua) и судовыми измерениями составил 0,88, что указало на достаточно близкую оценку концентрации хлорофилла-*a* по спутниковым (MODIS/Aqua) и судовым данным в Охотском море. Высокий коэффициент корреляции показал, что и судовые, и спутниковые данные имеют однонаправленную динамику изменения концентрации хлорофилла-*a* в зависимости от сезона и района Охотского моря. Кроме того, в подавляющем большинстве случаев средние значения изучаемого параметра находились в пределах среднеквадратичного отклонения σ сравниваемых рядов.

Из рисунка 1 видно, что динамика изменения содержания вещества в зависимости от района в полной мере отражена в результатах дистанционного зондирования. Тот же самый вывод можно сделать и при анализе межгодовой изменчивости. В весенний период, отвечающий максимальной интенсивности «цветения» микроводорослей, спутниковые данные дали практически точную либо несколько заниженную оценку концентрации хлорофилла-*a* вне зависимости от гидрологических особенностей отдельных районов Охотского моря. Летом в сезонный минимум «цветения» оценки концентрации хлорофилла-*a* по спутниковым наблюдениям были завышены в отдельные годы только в прибрежных районах.

Некоторое различие между спутниковыми (MODIS/Aqua) и судовыми измерениями наблюдалось у побережья Южных Курил. Однако, по сравнению с другими районами Охотского моря, в прикурильских водах, за исключением Южно-Курильского пролива, отмечалась слабая фотосинтетическая деятельность, а при низких значениях даже небольшие по величине различия становятся статистически значимыми. Тем не менее, спутниковые оценки фактически находились в одном диапазоне с судовыми данными и средняя концентрация хлорофилла-*a* не превышала 1 мг/м^3 .

В таблице 1 представлены результаты, полученные при оценке достоверности различий данных с помощью критерия Стьюдента. В целом,

существенных отличий между спутниковыми и судовыми данными при уровне значимости 0,01 не наблюдалось в 74% случаев.

Таблица 1. Результаты оценки достоверности различий между спутниковыми (MODIS/Aqua) и судовыми данными в районе исследований

Район	Оценка сопоставимости	Примечания
Северо-западная часть Тихого океана	50%	Высокая относительная погрешность при низких концентрациях хлорофилла- <i>a</i>
Южные Курилы	50%	Высокая относительная погрешность при низких концентрациях хлорофилла- <i>a</i>
Западно-камчатский шельф	60%	Весной спутниковые оценки занижены, летом завышены
Залив Шелихова	70%	Весной спутниковые оценки занижены, летом завышены
Северная часть Охотского моря	70%	Весной спутниковые оценки согласуются лучше, чем осенью
Северо-западная часть Охотского моря	80%	Выпал из общей картины один случай
Северо-восточный шельф Сахалина	100%	Вне зависимости от сезона
Залив Анива	100%	Вне зависимости от сезона
Татарский пролив	100%	Вне зависимости от сезона

В районе Южных Курил в 2005 и 2009 годах достоверных различий между рядами спутниковых и судовых измерений нет, а в 2007 и 2010 годах они существенны. У западного побережья Камчатки отмечалась хорошая сопоставимость данных в 60% рассмотренных случаев вне зависимости от сезона. Несмотря на видимую разницу значений весной 2007 года, достоверными эти различия были в районе Южных Курил и у западного побережья Камчатки, в заливе Шелихова и северной части Охотского моря расхождения были статистически незначимыми. В северной и северо-западной частях Охотского моря значительные различия между спутниковыми и судовыми данными наблюдались только весной 2009 года, а в заливе

Шелихова – летом 2004 года. У северо-восточного побережья Сахалина, в заливе Анива и Татарском проливе систематических различий не было вообще.

Таким образом, систематических различий между спутниковыми (MODIS/Aqua) и судовыми измерениями концентрации хлорофилла-*a* на изучаемой акватории не обнаружено и нет существенной необходимости введения корректирующих коэффициентов в стандартный алгоритм расчета данных с этого сканера. В результатах нашего исследования показано, что дистанционные наблюдения хорошо отражают реальную ситуацию распределения фитопланктона в поверхностном слое Охотского моря, и это позволяет с доверием относиться к полученным спутниковым оценкам сезонной и межгодовой динамики концентрации хлорофилла-*a*.

Для сравнения спутниковых данных сканеров SeaWiFS и MODIS поле разности значений концентрации хлорофилла-*a* за 2002–2004 гг. было разложено с помощью метода ЕОФ (рис. 2).

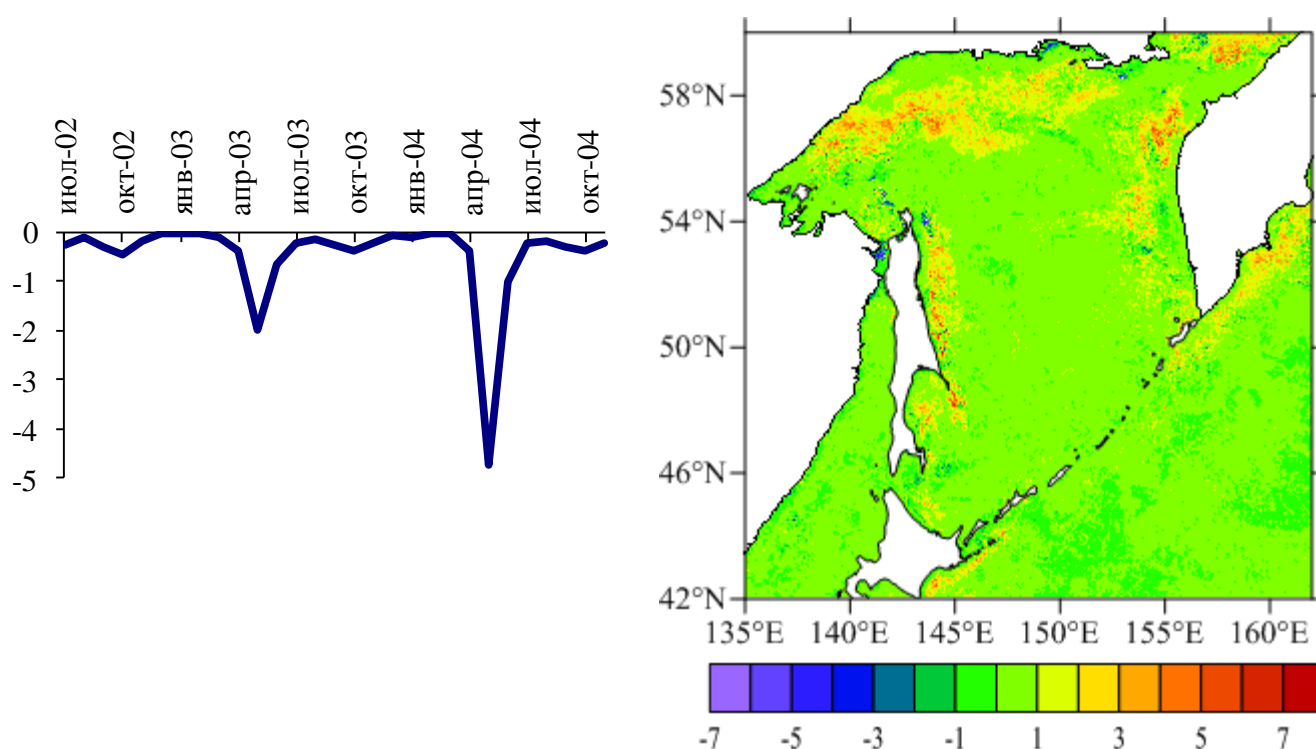


Рисунок 2. Амплитуда и распределение вектора первой моды ЕОФ массива разности значений концентрации хлорофилла-*a* ($\text{мг}/\text{м}^3$) со сканеров MODIS и SeaWiFS

За исключением мая и июня величина амплитуды первой моды варьируется на промежутке $[-0,5, 0]$. На большей части акватории значения вектора первой моды также близки к нулю, что означает сходство результатов измерений по обоим сканерам. В то же время существенные различия в оценках концентрации хлорофилла-*a* наблюдались в мае и июне в шельфовых районах, а именно – в прибрежной зоне п-ова Камчатка, в северной части Охотского моря, у восточного Сахалина, у тихоокеанского побережья Южных и Северных Курил. Таким образом, во время весеннего «цветения» фитопланктона в зонах его повышенного продуцирования значения концентрации хлорофилла-*a* со сканера SeaWiFS были значительно выше, чем со сканера MODIS, и в этих районах требуется коррекция спутниковых данных для сканера SeaWiFS.

В **Главе 4** рассмотрены особенности пространственного распределения и сезонной изменчивости концентрации хлорофилла-*a*. В **разделе 4.1** по результатам анализа спутниковых данных (MODIS/Aqua) с применением метода ЕОФ определены наиболее важные закономерности пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-*a* на поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий (рис. 3).

График амплитуды первой моды показал основные закономерности сезонной и межгодовой изменчивости концентрации хлорофилла-*a*. Колебания амплитуды первой моды имели достаточно устойчивый сезонный характер. С ноября по март значения амплитуды первой моды были близки к нулю, что означало слабую фотосинтетическую деятельность на изучаемой акватории в холодный период года. В апреле и мае интенсивность «цветения» фитопланктона возрастала. Первый и, как правило, максимальный годовой пик концентрации хлорофилла-*a* наблюдался в июне. Более слабый осенний экстремум отмечался в сентябре, во все годы его величина изменялась незначительно. Таким образом, подтвердился ранее известный факт о наличии двух пиков «цветения», характерных для морей субарктического типа [Вентцель и др., 2000].

Все элементы амплитуды и вектора первой моды были одного знака. По распределению вектора первой моды можно определить зоны повышенного продуцирования фитопланктона. Высокие концентрации хлорофилла-*a* отмечены вдоль побережья п-ова Камчатка. Значительным содержанием пигмента характеризовалась северная часть Охотского моря, в особенности район северо-западного шельфа и залив Шелихова.

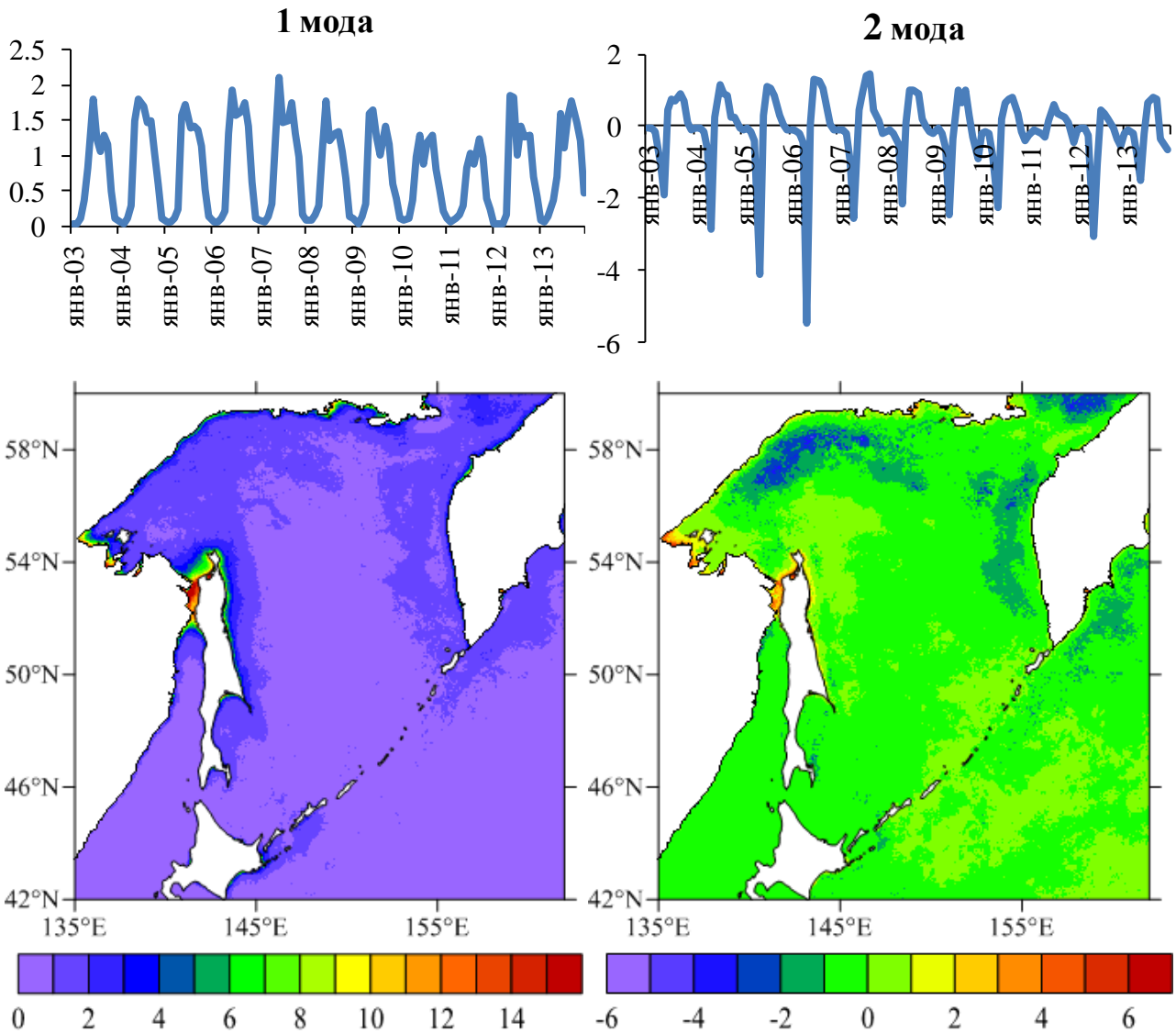


Рисунок 3. Амплитуда и пространственное распределение векторов ($\text{мг}/\text{м}^3$) первой и второй мод EOF

Участки повышенного содержания хлорофилла-*a* были локализованы в устьях крупных рек Охотоморского бассейна, где наблюдался значительный вынос биогенных элементов с речным стоком. Максимальные по региону

концентрации хлорофилла-*a* были зафиксированы в районе стока крупнейшей реки дальневосточного бассейна – Амур. Высокое содержание пигмента наблюдалось также на шельфе у северо-восточного побережья Сахалина, куда поступало большое количество биогенных веществ из нескольких источников. Наряду со стоком из реки Амур и многочисленных лагун доставка питательных веществ происходила за счет прибрежного апвеллинга [*Красавцев и др.*, 2000; *Полупанов*, 2007]. Зона интенсивного «цветения» отмечалась в районе Южных Курил на границе смешения вод течений Соя и Ойясио [*Истоки Ойясио*, 1997]. Еще одна фронтальная зона с повышенной продуктивностью фитопланктона располагалась с тихоокеанской стороны Северных Курил в районе Камчатского течения. В то же время следует заметить, что в центральной части Охотского моря и на юге Татарского пролива отмечено слабое течение процессов фотосинтеза вне зависимости от сезона.

Амплитуда второй моды носила ярко выраженный периодичный характер. Она принимала отрицательные значения в апреле–мае, а положительные, как правило, – с июня по ноябрь, т. е. в течение всего безледного периода. При этом отрицательный минимум в мае сменялся экстремальным положительным значением в июне. В пространственном распределении второй моды отчетливо выделялись области с положительными и отрицательными значениями (рис. 3). Отрицательные значения отмечались в северной части Охотского моря, у берегов Камчатки и юго-восточного побережья Сахалина. Положительными величинами характеризовались, прежде всего, прибрежные районы. Значительные положительные значения в векторе второй моды наблюдались не только в Амурском лимане, но и в других районах залива модифицированных амурских вод. Следовательно, амплитуда и вектор второй моды определили особенности жизненного цикла фитопланктона в той или иной части Охотского моря.

Последующие моды разложения по ЕОФ показали отличительные черты развития фитопланктона на локальных промежутках времени и участках акватории.

Таким образом, при интерпретации результатов, полученных при разложении исходного поля вариаций концентрации хлорофилла-*a* по ЕОФ, были выделены и проанализированы следующие факторы, обуславливающие развитие фитопланктона на поверхности изучаемой акватории: таяние льда, температура поверхности воды и обеспеченность биогенными веществами посредством преимущественно речного стока.

Зимой биогенные элементы находятся в воде в количестве, достаточном для развития фитопланктона, но оно сдерживается низкой температурой воды. Повышение температуры воды вызывает лавинообразное весеннее «цветение» фитопланктона. Летом на большей части акватории Охотского моря образуется слой температурного скачка, который препятствует доступу биогенных элементов с глубины. Образуется дефицит питательных веществ, который, несмотря на благоприятную температуру воды, обрывает «цветение» фитопланктона. Процесс развития фитопланктона на большей части акватории Охотского моря можно разбить на три фазы:

первая фаза – охватывает период от зимы до весеннего повышения температуры поверхности воды до $+2-5^{\circ}\text{C}$, когда развитие фитопланктона обусловлено фактором температуры;

вторая фаза – период от весеннего до осеннего «цветения» фитопланктона, когда развитие микроводорослей определяется наличием биогенных веществ в воде;

третья фаза – после осеннего «цветения» до зимы, когда при избытке биогенных элементов после разрушения термоклина снижение концентрации хлорофилла-*a* вызвано уменьшением температуры в поверхностном слое.

В разделе 4.2 выделены особенности пространственного распределения и сезонной изменчивости концентрации хлорофилла-*a* по данным сканера SeaWiFS в районе, прилегающем к проливу Лаперуза, и Амурском лимане.

Сравнение данных сканера SeaWiFS, принятых станцией TeraScan, с результатами анализа проб воды поверхностного слоя в заливе Анива показало,

что по всем сравниваемым периодам спутниковые и судовые данные находились в одном диапазоне изменений концентрации хлорофилла-*a*.

В результате анализа сезонной изменчивости концентрации хлорофилла-*a* по спутниковым и судовым данным в районе пролива Лаперуза были выявлены два максимума – весной и осенью. Весенний максимум (апрель–май) был приурочен к таянию льда в проливе и характеризовался значительными межгодовыми вариациями. Высокие концентрации хлорофилла-*a* наблюдались в северной части залива Анива. Низкое содержание вещества отмечалось в области течения Соя. Осенний максимум был более слабым, но и более устойчивым – как по величине амплитуды и времени наступления (октябрь), так и по пространственному распределению.

В заливе Анива весной и осенью содержание вещества относительно равномерно распределено в верхнем 30-метровом слое. Летом в поверхностном слое концентрации хлорофилла-*a* незначительны, максимальные их значения приходятся на глубины вблизи хорошо развитого термоклина, который препятствует проникновению биогенных элементов в верхние слои.

При совместном анализе спутниковых данных о концентрации хлорофилла-*a* на акватории Амурского лимана и сопутствующей гидрометеорологической информации выявлены следующие факторы, влияющие на распределение данного вещества, а следовательно, и фитопланктона в целом:

- вынос биогенных веществ рекой Амур, который определяет зоны повышенных концентраций пигмента;
- направление стока реки Амур в Сахалинский залив или Татарский пролив в зависимости от преобладающего сезонного направления ветра;
- распределение солёности, которое обуславливает существование толерантных к различным диапазонам солёности сообществ фитопланктона, различающихся по концентрациям и динамике образования хлорофилла-*a*;

– глубокие циклоны с ветрами южного направления, которые влекут за собой изменение границы опресненных и морских вод, тем самым изменяя локализацию сообществ фитопланктона.

В разделе 4.3 выявлены особенности распределения концентрации хлорофилла-*a*, определенные на основе измерений MODIS/Aqua с 2003 по 2013 г. в отдельных районах изучаемой акватории (рис. 4).

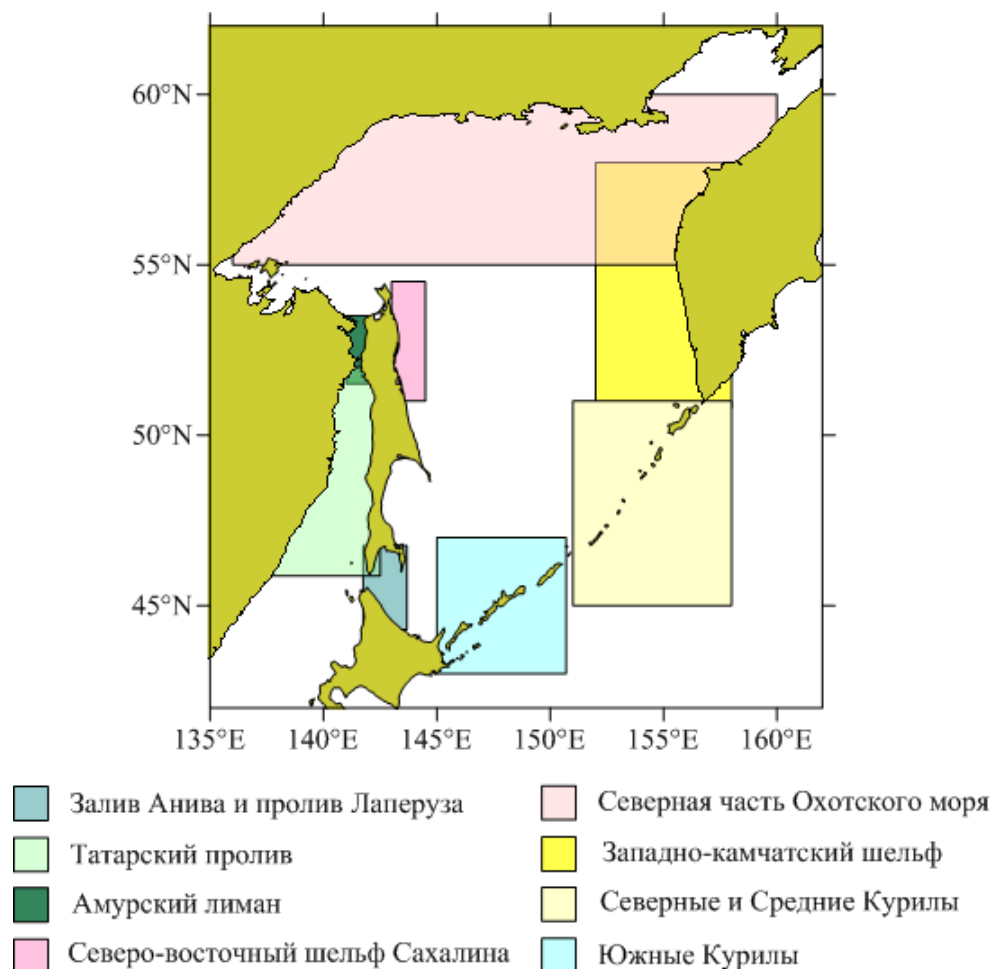


Рисунок 4. Схема районов Охотского моря и прилегающих акваторий для расчета вариаций концентрации хлорофилла-*a* методом EOF

Анализ пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла-*a* показал, что в различных районах Охотского моря существуют локальные особенности процесса развития фитопланктона. Его интенсивность, продолжительность и характер изменения во времени и пространстве зависят от океанологических, гидрохимических и ряда других условий [Матвеев, 2006]. Значения амплитуд первых мод – одного знака (рис. 5), в то время как значения

амплитуд вторых и последующих мод могут быть разных знаков (рис. 6), что указывает на процессы, происходящие в противофазе.

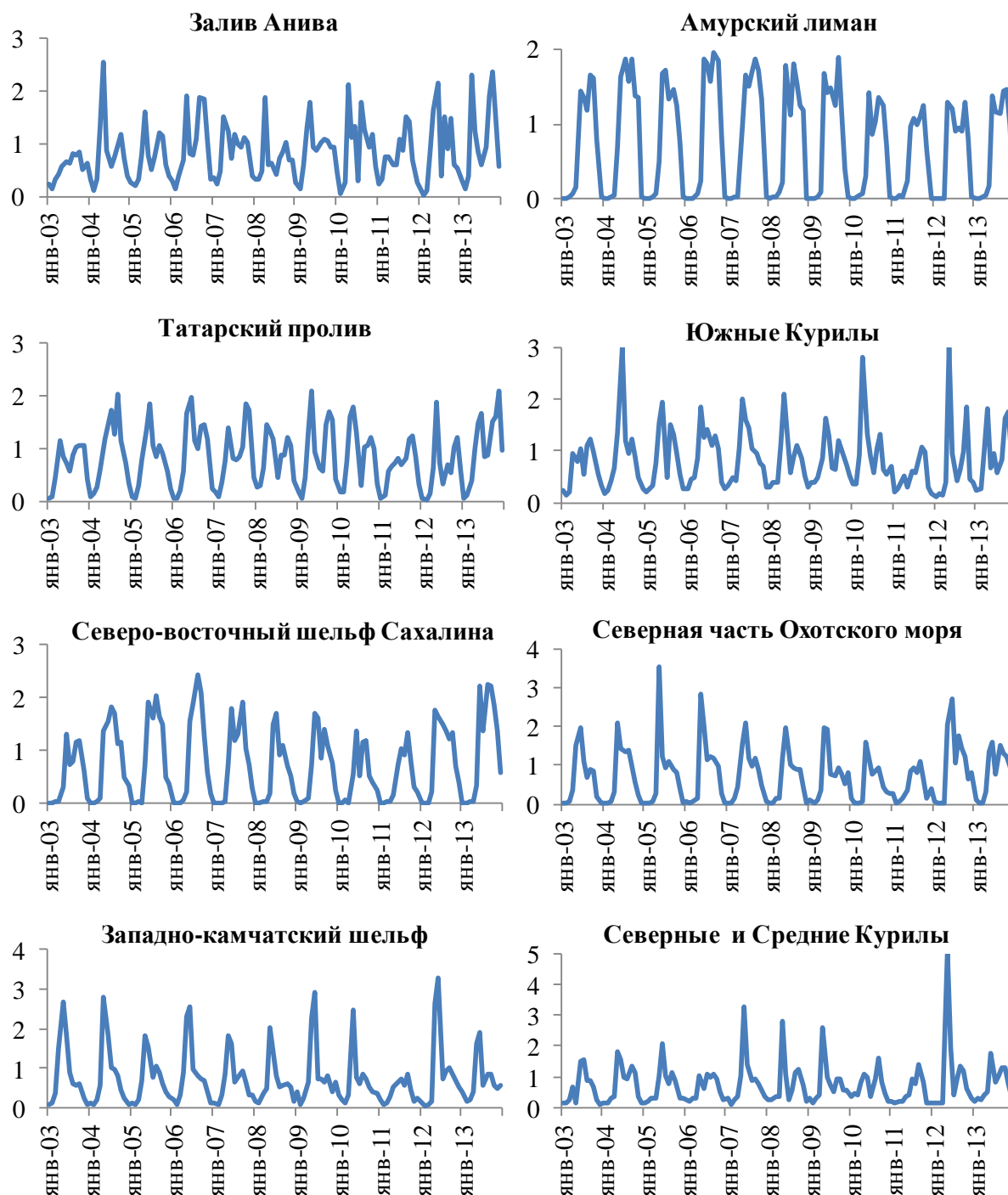


Рисунок 5. Амплитуды первых мод в отдельных районах изучаемой акватории

В течение года во всех рассматриваемых районах Охотского моря выделяются два сезонных пика повышения концентрации хлорофилла-*a* – весной и осенью. В юго-западной части Охотского моря, южной части

Татарского пролива и у западного побережья Камчатки активная фаза весеннего «цветения» фитопланктона протекает преимущественно в апреле–мае, а в северных акваториях она сдвигается на июнь. Активная фаза осеннего «цветения» происходит в сентябре–октябре.

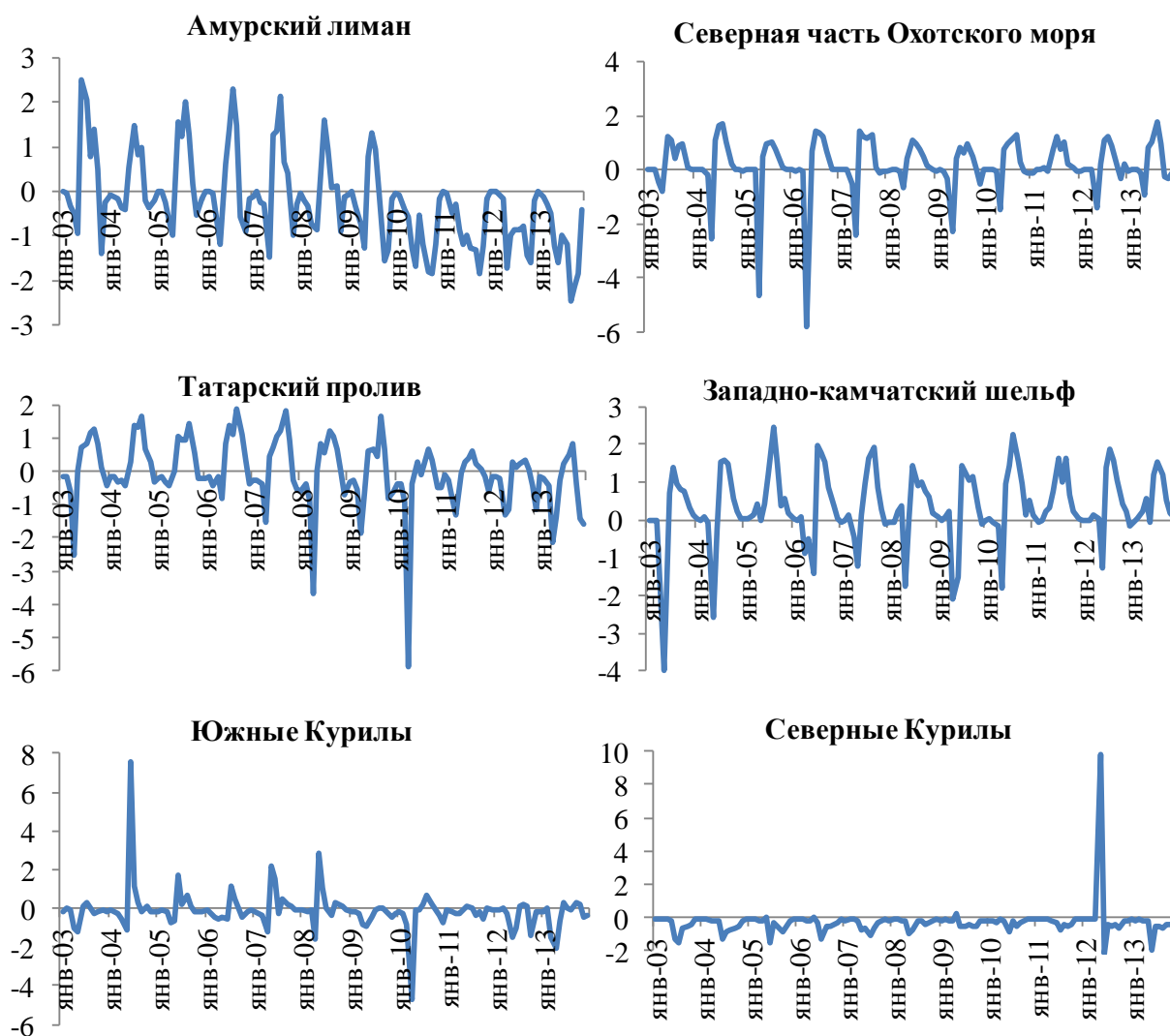


Рисунок 6. Амплитуды второй моды в отдельных районах изучаемой акватории

Максимальный весенний пик наиболее ярко выражен в северной части Охотского моря, у западного побережья Камчатки и в районе северных Курильских островов. В районах с сильным присутствием речного стока, например, в Амурском лимане и у северо-восточного побережья Сахалина, зачастую интенсивность осеннего «цветения» выше, чем весеннего.

Амплитуды вторых мод имеют четко выраженную сезонную структуру. Однако начиная с 2010 г. в различных районах Охотского моря и в Татарском

проливе ее сезонный ход претерпевает некоторые изменения (см. рис. 6). В частности, в западной части Охотского моря в летний период наблюдается уменьшение концентрации хлорофилла-*a*. В то же время в восточной части Охотского моря таких изменений не отмечается.

В работе С. Ю. Глебовой [2014] было подчеркнуто, что на рубеже 2010-х годов над Дальним Востоком произошли циркуляционные изменения в атмосфере, приведшие к увеличению южного переноса и ослаблению северного. Следствием смещения центров действия атмосферы стали уменьшение общей интенсивности циклонов и аномально высокая температура поверхности воды в Охотском море [Глебова, 2014]. Таким образом, изменения атмосферной циркуляции и термического режима вод могли стать причиной снижения интенсивности процессов фотосинтеза в западной части Охотского моря.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. В результате сравнения спутниковых и судовых данных о концентрации хлорофилла-*a* на акватории Охотского моря показано, что дистанционные наблюдения в полной мере отражают сезонную и межгодовую динамику концентрации хлорофилла-*a*. Систематических различий между спутниковыми и судовыми измерениями концентрации хлорофилла-*a* на акватории Охотского моря не обнаружено.

2. По многолетним спутниковым наблюдениям на поверхности Охотского моря и прилегающих акваторий выделены два сезонных пика активной фотосинтетической деятельности – весной и осенью. В период весеннего «цветения» фитопланктона концентрация хлорофилла-*a* достигала своего максимального внутригодового значения, показывая при этом значительные межгодовые колебания. Вариации осеннего максимума, как правило, более слабые, но в то же время более устойчивые.

3. Зоны массового развития фитопланктона приурочены к районам весеннего таяния льда, речного стока (особенно велико влияние р. Амур),

некоторым апвеллингам и зонам фронтальных разделов на границе основных течений. Данные факторы объясняют высокую интенсивность продуцирования фитопланктона в регионе. В течение всего года слабая фотосинтетическая деятельность отмечалась в центральной части Охотского моря и южной части Татарского пролива. В зонах ямского, ионо-кашеваровского и среднекурильского апвеллингов активных процессов фотосинтеза по спутниковым данным не наблюдалось.

4. При анализе факторов, обуславливающих изменчивость концентрации хлорофилла-*a*, определены сезонные фазы развития фитопланктона. Зимой биогенные элементы находятся в воде в количестве, достаточном для развития микроводорослей, которое, тем не менее, тормозится низкой температурой воды. Таяние льда и повышение температуры поверхности воды до оптимума вызывают лавинообразное «цветение» фитопланктона в шельфовых районах Охотского моря. Летом на большей части его акватории образуется термоклин, который препятствует доступу биогенных элементов с глубины. Активные процессы фотосинтеза в этот период времени локализуются преимущественно в районах речного стока. Осеннее повышение концентрации хлорофилла-*a* обусловлено возрастанием содержания биогенных веществ в поверхностном слое как в результате рециклинга, так и при разрушении термоклина.

5. Выявлены региональные особенности пространственной и временной изменчивости концентрации хлорофилла-*a* в различных районах Охотского моря. В юго-западной части Охотского моря, южной части Татарского и у западного побережья Камчатки активная фаза весеннего «цветения» фитопланктона протекает преимущественно в апреле–мае, а в северных акваториях сдвигается на июнь. В районах интенсивного речного стока, и особенно в зонах проникновения модифицированных амурских вод, осеннее «цветение» микроводорослей может быть более обильным, чем весеннее.

6. В начале 2010-х годов в западной части Охотского моря и Татарском проливе отмечено изменение сезонной динамики концентрации хлорофилла-*a* в

летний период по сравнению с предыдущим десятилетием, что, вероятно, стало следствием изменения климатических условий над акваторией Охотского моря.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях из перечня ВАК

1. *Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В., Гаврина Л.Ю.* Сезонные вариации концентрации хлорофилла-*a* за 2001–2004 гг. в проливе Лаперуза по спутниковым и судовым измерениям // Исследование Земли из космоса. – 2006. – № 3. – С. 15–30.

2. *Цхай Ж.Р.* Анализ сезонных вариаций концентрации хлорофилла-*a* методом естественных ортогональных функций в Охотском море по спутниковым данным // Исследование Земли из космоса. – 2007. – № 6. – С. 37–45.

3. *Цхай Ж.Р., Хен Г.В.* Сравнение спутниковых и судовых данных о концентрации хлорофилла-*a* в Охотском море и прилегающей акватории // Исследование Земли из космоса. – 2016. – № 1–2. – С. 187–198.

4. *Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В., Частиков В.Н.* Аномальное распространение стока реки Амур в Охотском море в 2013 г. // Исследование Земли из космоса. – 2016. – № 3. – С. 84–88.

Статьи, опубликованные в других журналах и сборниках

5. *Цхай Ж.Р.* Анализ сезонной изменчивости концентрации хлорофилла-*a* в Амурском лимане и сопредельных водах методом естественных ортогональных функций по спутниковым данным системы TeraScan за 2001–2004 гг. // Чтения памяти В.Я. Леванидова. – 2005. – Вып. 3. – С. 183–191.

6. *Гаврина Л.Ю., Цхай Ж.Р., Шевченко Г.В.* Сезонная изменчивость концентрации хлорофилла А в проливе Лаперуза по спутниковым и судовым измерениям // Тр. СахНИРО. – 2005. – Т. 7. – С. 156 – 178.

Опубликованы также девять тезисов докладов на конференциях.