

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(СПбГУ)
Институт наук о Земле

Никерина Надежда Васильевна
Выпускная квалификационная работа
**«ВЛИЯНИЕ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ВИХРЕЙ НА ПРОСТРАНСТВЕННО-
ВРЕМЕННУЮ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КОНЦЕНТРАЦИИ ХЛОРОФИЛЛА А В ВОДАХ
СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКИ»**

Основная образовательная программа магистратуры
«Физическая океанография и биопродуктивность океанов и морей (ФОБОС)»

Научный руководитель:
к.г.н. Башмачников Игорь Львович
Рецензент:
Директор / руководитель группы
климатических исследований
фонда "Нансен-центр"
к. ф-м. н. Бобылев Леонид Петрович

Содержание

Список сокращений и условных обозначений	3
Аннотация	4
Введение.....	5
1. Район исследования	6
1.1. Климат	7
1.2. Поверхностная циркуляция и водные массы	7
1.3. Биопродуктивность	8
2. Исходные данные.....	12
Концентрация хлорофилла а	12
Мезомасштабные вихри	12
3. Предварительная обработка спутниковых данных цвета океана.....	15
4. Результаты	17
Выводы.....	23
Список использованных источников	25
Приложение 1. Валидация спутниковых данных	27
Abstract	33

Список сокращений и условных обозначений

АСКО – абсолютная среднеквадратическая ошибка;

ВКР – выпускная квалификационная работа;

ДЗЗ – дистанционное зондирование Земли;

ПП – первичная продукция;

СКО – среднеквадратическое отклонение;

ARCT – Атлантическая Арктическая биогеографическая провинция;

BPLR – Бореальная Полярная биогеографическая провинция;

CCI OC – Climate Change Initiative Ocean Color;

$k_d(490)$ – коэффициент диффузного ослабления света с длиной волны 490 нм;

n – количество измерений;

R – радиус вихря;

SART – Субарктическая биогеографическая провинция;

sqrt(ЦСКО) – корень из центрированной среднеквадратической ошибки;

Ze_u – глубина эвфотического слоя;

Z_m – глубина верхнего перемешанного слоя.

Аннотация

Исследование заключается в выявлении закономерностей влияния мезомасштабных вихрей на поле распределения концентрации хлорофилла *a* в Норвежском море.

Материалами исследований послужили данные концентрации хлорофилла *a*, полученные с помощью спутниковых спектрорадиометров, а также данные распределения мезомасштабных вихрей, рассчитанные на основе результатов альтиметрической съемки. В ходе работ было произведено сравнение концентрации хлорофилла *a* внутри и вне вихрей. Для этого было выполнено осреднение ее значений: (а) в центрах вихрей в пределах окружностей с радиусами равными 0,5 радиусов вихрей (R); (б) внутри вихрей в пределах колец с внутренними и внешними радиусами 0,5 и $1R$ соответственно; (в) в непосредственной близости вихрей в пределах колец с радиусами 1 и $2R$; (г) в областях, условно не подверженных влиянию вихрей в пределах колец с радиусами 2 и $5R$.

Актуальность исследований обусловлена отсутствием информации о влиянии циклонических и антициклонических вихрей на динамику фитопланктона в субполярной северной Атлантике. Значения концентрации хлорофилла *a*, использованные в данной работе, могут служить показателем биомассы фитопланктона. Таким образом, закономерности в распределении концентрации хлорофилла *a* могут, с некоторыми допущениями, быть перенесены и на продуктивность первичного трофического звена в исследуемом регионе.

В работе приведены данные средних значений концентрации хлорофилла *a* внутри и вне вихрей в северной части Атлантического океана в теплый и холодный сезоны в период с 1998 по 2016 гг. Заключение содержит интерпретацию полученных результатов и основные гипотезы о закономерностях формирования поля концентрации хлорофилла *a* под воздействием циклонической и антициклонической мезомасштабной циркуляции.

Введение

Концентрация хлорофилла *a* является важнейшим показателем состояния морской экосистемы, а также служит показателем динамических и биохимических процессов в океане. Такая широкая область применения связана как с возможностями фиксировать динамические структуры в океане по визуальным изменениям цвета вод океана (концентрации фитопланктона), так и с наличием методик перехода от концентрации хлорофилла к суммарной биомассе фитопланктона, а также первичной биопродуктивности экосистемы, которые являются одними из главных показателей экологического состояния сообщества.

Этим объясняется необходимость подробнейшего изучения механизмов отклика концентрации хлорофилла на различные факторы морской среды. Одним из таких факторов является наличие вихрей (циклонов и антициклонов), которые через изменение температуры, солености, глубины перемешанного слоя и глубины залегания повышенных концентраций биогенных веществ влияют на биомассу и продуктивность сообщества фитопланктона.

Целью ВКР является выявление и описание вклада мезомасштабных вихрей в пространственно-временную изменчивость концентрации хлорофилла *a*, измеряемую по спутниковым данным.

Задачи ВКР:

- Описание пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла *a* в исследуемом регионе.
- Анализ пространственной изменчивости концентрации хлорофилла *a* внутри вихрей, а также формируемых вихрями аномалий концентрации хлорофилла.
- Выявление закономерностей влияния циклонических и антициклонических вихревых образований на распределение концентрации хлорофилла *a* в окрестности этих вихрей.

1. Район исследования

Исследуемый район располагается между $60 - 75^\circ$ с.ш. и 10° з.д. – 20° в.д. (рис. 1). В исследуемом регионе расположено Норвежское море и, частично, Гренландское море.

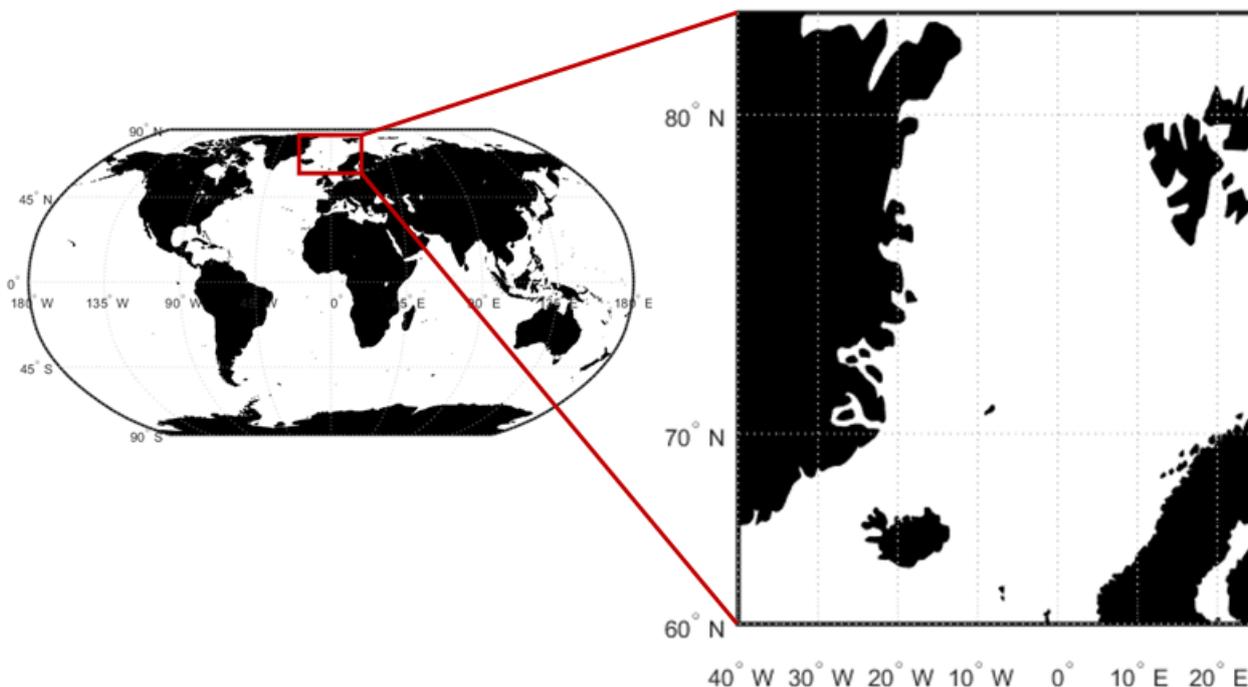


Рис. 1. Район исследований.

Граница между Атлантическим и Северным Ледовитым океанами, по разным классификациям проходит по району исследований различно. Согласно российской классификации (Макавеев и др., 2016) эта граница проходит от мыса Брустер на побережье о. Гренландия до мыса Рёйдинупюр на о. Исландия, по его побережью до мыса Герпир, затем через Фарерские о-ва к Шетландским о-вам и по 61° с.ш. до побережья Скандинавского п-ова. Согласно классификации Всемирной гидрографической организации (International Hydrographic Organization, 1953), часто используемой в западной научной литературе, Норвежское море считается частью северной Атлантики.

Норвежское море (максимальная глубина 5 527 м), отделено от Гренландского цепью хребтов – Исландским, Мона, а также хребтом Книповича, который смыкается на севере с хребтом Гаккеля (Волков и Гусев, 2015). В Норвежском море расположены две котловины – Норвежская (3 970 м) и Лофотенская (3 717 м). Ширина Скандинавского шельфа составляет порядка 50 – 100 км.

1.1. Климат

Климатические зоны с севера на юго-восток сменяются в следующем порядке: арктическая – субарктическая – умеренная. Среднегодовая температура поверхностного слоя воды изменяется от 0 до 5 °С, повышаясь с запада на восток. В зимние месяцы температура составляет от -1 до 3 °С. В летние месяцы отрицательные значения температуры сохраняются только далеко к западу от района исследований, вдоль побережья Гренландии, а на юго-востоке они повышаются до 9-10 °С.

Соленость поверхностных вод в составляет около 35 ‰, она достигает максимальных значений в южной части района несколько западнее побережья Скандинавского п-ова и понижается до 30 ‰ к западу от района исследований, вдоль побережья Гренландии.

Норвежское море зимой свободно от льда. Летом ледяной покров наблюдается севернее и западнее Шпицбергена, а также вдоль побережья Гренландии – до 50-200 км от берега. В зимний период эта полоса увеличивается до 150-400 км.

1.2. Поверхностная циркуляция и водные массы

Циркуляция вод в районе исследования определяется смешением теплых соленых атлантических вод, распространяющихся на север в восточном секторе акватории, с холодными распресненными водами Северного Ледовитого океана, распространяющихся на юг вдоль западной периферии акватории. В результате формируются несколько типов водных масс. Восточно-Гренландский тип формируется вдоль восточного побережья Гренландии и распространяется до западной границы Норвежского моря. Эти воды характеризуются низкими значениями температуры (от -1 до 1,3 °С) и солености (от 31,0 до 31,5 ‰). В самом Норвежском море на поверхности доминирует Атлантическая водная масса с положительными температурами (более 3°С) и соленостью 35 ‰. Эти воды, сильно разбавленные, в Гренландском море формируют промежуточную прослойку вод атлантического происхождения, которая имеет температуру около 1 °С и соленость 34,9 ‰. Глубинные и придонные воды несколько более холодные – температура составляет от 0,1 до 1 °С, соленость остается на уровне 35 ‰. Эти воды формируются в Гренландском море и проникают в глубинные слои Норвежского моря.

В районах контакта разных типов водных масс образуются фронты. Полярная фронтальная зона, положение которой приурочено к границе выноса льдов выделяется по температурному градиенту. Субполярная фронтальная зона образуется в результате взаимодействия теплых вод, приносимых Северным Атлантическим течением и вод,

выносимых из Арктики Восточно-Гренландским течением и приурочена к западной границе Норвежского моря.

1.3. Биопродуктивность

В пределах района исследований располагаются три экологические провинции, выделенные А. Лонгхюрстом (Longhurst, 2007): вдоль побережья Гренландии распространена Бореальная Полярная (BPLR), восточнее расположена Атлантическая Арктическая (ARCT), на юго-востоке региона находится Субарктическая (SART) (рис. 2).

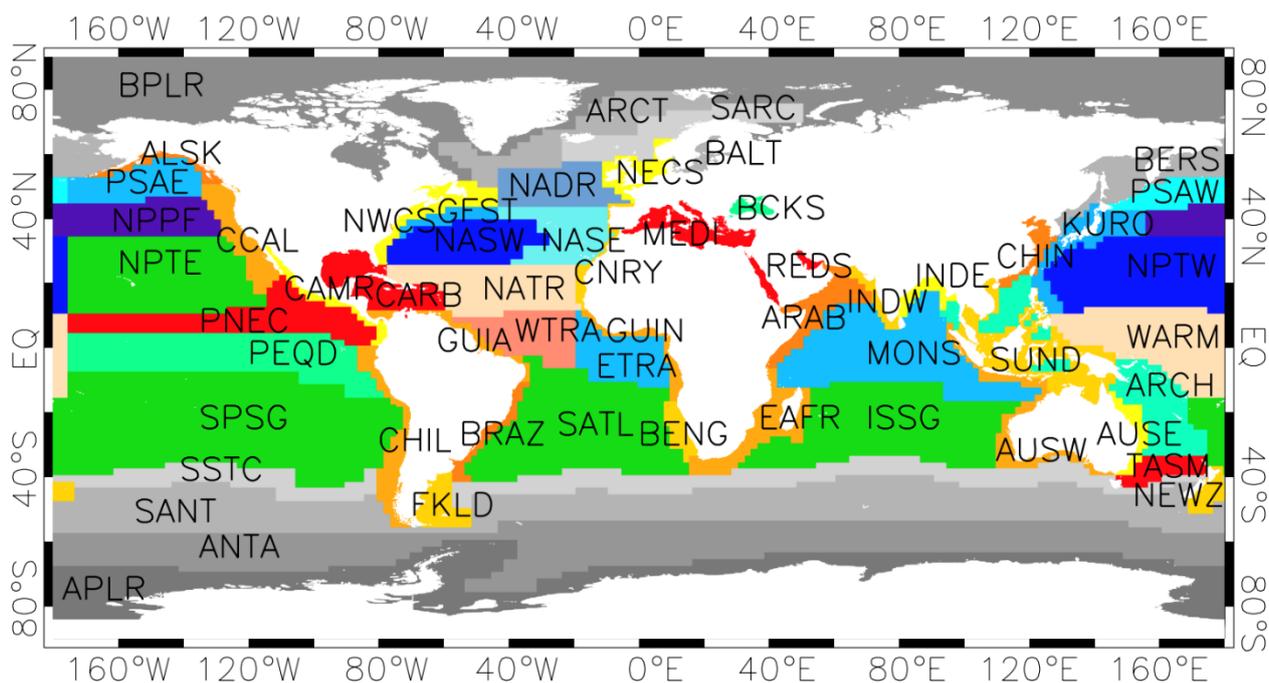


Рис. 2. Биогеографические провинции Мирового океана (Longhurst, 2007).

Бореальная Полярная провинция. Максимальные значения концентрации хлорофилла встречаются между 10%-ным уровнем освещенности и нижней границей эвфотического слоя (Z_{eu}), который обычно глубже, чем верхний перемешанный слой (Z_m). Эти максимумы превышают поверхностные значения концентрации примерно в шесть раз и составляют около $1,25 \text{ мг/м}^3$. Концентрация нитратов в перемешанном слое часто ниже предела их обнаружения, нитроклин совпадает с пикноклином (Harrison et al., 1987).

Первичная продукция (ПП) лимитируется освещенностью и зависит от количества поступающей солнечной радиации, которая, в свою очередь, лимитируется, в том числе, наличием ледяного покрова в северной и северо-западной части Гренландского моря. В открытых водах бореальной провинции эвфотический слой (Z_{eu}) глубже перемешанного слоя (Z_m), поэтому увеличение продуктивности при весеннем увеличении освещенности

очень быстрое (рис. 3). Концентрация хлорофилла повторяет линейное увеличение скорости ПП до пика в середине лета, затем также снижается, но после этого наблюдается второй пик в октябре. Этот факт обусловлен снижением скорости выедания фитопланктона, поскольку крупные растительные копеподы опускаются в нижележащие слои в июле-сентябре.

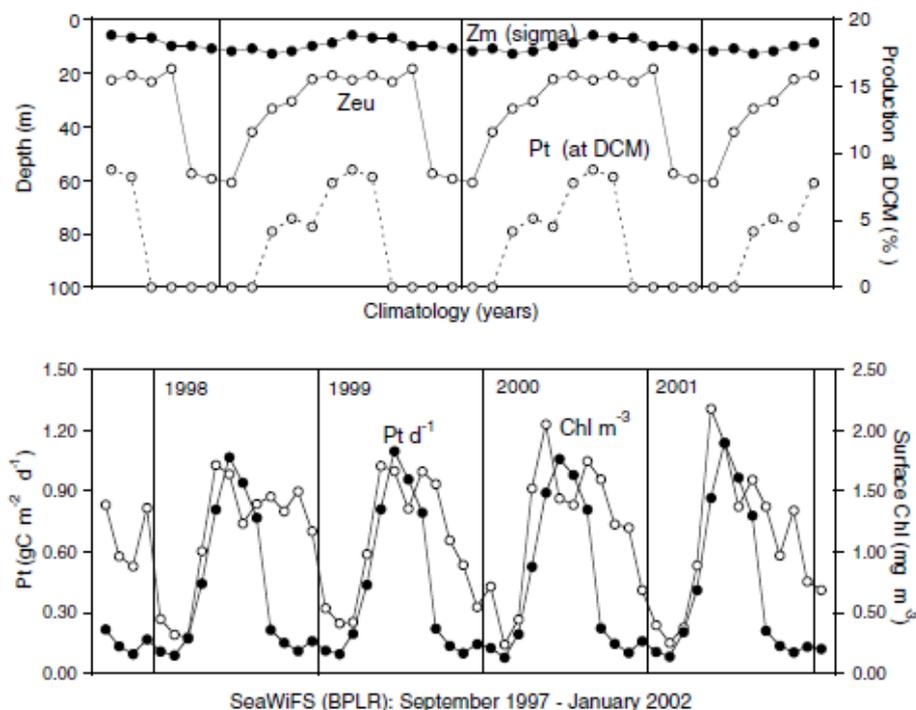


Рис. 3. BPLR: сезонные циклы характерных глубин смешанного слоя (Z_m) по данным Levitus и эвфотического слоя (Z_{eu}), рассчитанных по характеристическому освещению и архиву профилей хлорофилла a (сверху), а также сезонные циклы ПП и концентрации хлорофилла a (снизу) по данным SeaWiFS (Longhurst, 2007).

В фитопланктоне BPLR весной и осенью преобладают диатомовые водоросли, а летом доминируют виды, которые по их размерам можно отнести к пикопланктону (размер 0,2-2 мкм). В районе Исландии летнее цветение обусловлено, в основном, кокколитофорадами *Emiliana huxleyi* ежегодная ПП которой превышает 125 г C/m^2 (Holligan, 1981).

Атлантическая Арктическая провинция. Благодаря глубокому зимнему перемешиванию глубина эвфотического слоя Z_{eu} больше глубины перемешанного слоя Z_m большую часть года, за исключением короткого периода в летние месяцы (июль-сентябрь), когда солнечное излучение формирует сезонный термоклин (рис. 4).

Сезонное изменение ПП симметрично относительно пиковой скорости в середине лета, которая значительно выше, чем в высоких широтах южного полушария. Весеннее увеличение ПП является реакцией на изменение освещенности и уменьшение слоя Z_m , после июня на ПП влияет только уровень освещенности. Увеличение концентрации хлорофилла

повторяет изменения ПП до конца лета. Позднее вторичное накопление биомассы происходит в сентябре-октябре, оно является реакцией на миграцию гетеротрофных организмов в нижележащие слои.

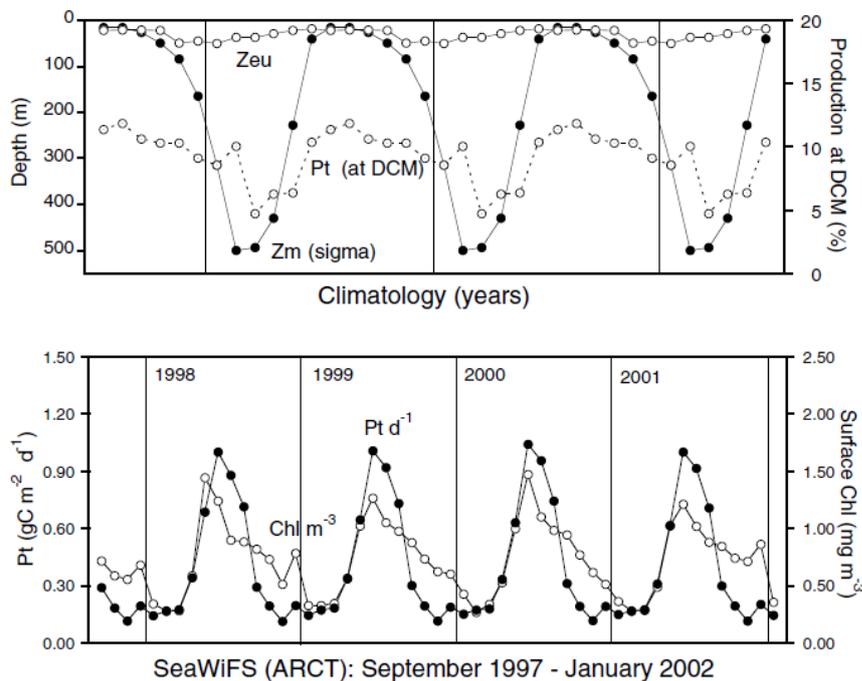


Рис. 4. ARCT: сезонные циклы характерных глубин смешанного слоя (Z_m) по данным Levitus и эвфотического слоя (Z_{eu}), рассчитанных по характеристическому освещению и архиву профилей хлорофилла a (сверху), а также сезонные циклы ПП и концентрации хлорофилла a (снизу) по данным SeaWiFS (Longhurst, 2007).

В марте во всей провинции наблюдаются низкие уровни концентрации хлорофилла на поверхности. В мае цветение распространяется вдоль побережья Гренландии, что обусловлено развитием стратификации приповерхностного слоя.

В июне цветение в Гренландском море занимает весь восточный круговорот. Начиная с июля, региональные особенности в области хлорофилла становятся более размытыми, и концентрация хлорофилла постепенно уменьшается.

В весеннем цветении преобладают диатомовые водоросли (*Chaetoceros*, *Nitzschia*, *Melosira*, *Navicula* и *Pleurosigma*), а также динофлагелляты. ПП в это время года составляет $<2 \text{ г C/m}^2$ в день (Smith et al., 1991). Пикопланктон здесь имеет гораздо меньшее распространение, чем в соседних более низких широтах.

Субарктическая провинция. Слой Z_m зимой достигает до глубины более 200м, вплоть до апреля, когда восстанавливается летняя термическая стратификация (рис. 5). Z_{eu} почти весь год меньше, чем Z_m , за исключением периода с июня по сентябрь. ПП в большей

степени реагирует на весеннее увеличение освещенности, чем на изменения Z_m . В осенний период ПП снижается из-за углубления Z_m . Позднее вторичное накопление биомассы происходит поздней осенью или в начале зимы, его можно интерпретировать как реакцию на миграцию гетеротрофных организмов в нижележащие слои.

На ранних стадиях цветения, в течение апреля и мая, концентрации хлорофилла составляет менее $0,25 \text{ мг/м}^3$, ее максимум характерен для глубин 150–200 м, что соответствует нижней границе перемешанного слоя. Минимальные значения концентрации нитратов соответствуют середине июля. Содержание хлорофилла остается относительно высоким в течение всего лета, обычно более $2,0 \text{ мг/м}^3$ (Brown, 1995).

Постепенно в течение лета глубокий максимум хлорофилла опускается и достигает верхней границы нитроклина. Очень высокие скорости оседания водорослевых клеток могут наблюдаться во время и сразу после весеннего цветения, особенно если в нем преобладает *Phaeocystis*. Это обуславливает широкое разнообразие бентосных организмов (Wassman et al., 1991).

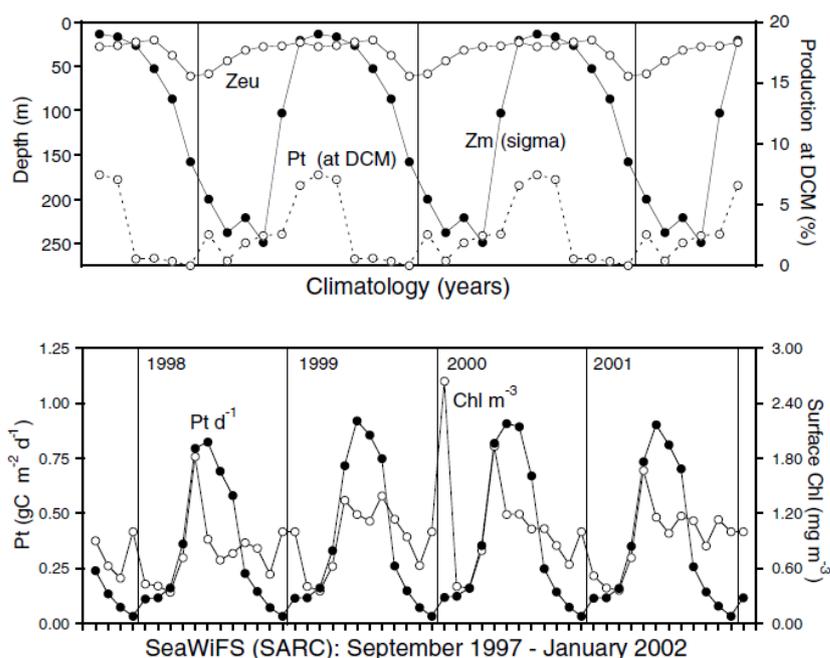


Рис. 5. SARC: сезонные циклы характерных глубин смешанного слоя (Z_m) по данным Levitus и эвфотического слоя (Zeu), рассчитанных по характеристическому освещению и архиву профилей хлорофилла *a* (сверху), а также сезонные циклы ПП и концентрации хлорофилла *a* (снизу) по данным SeaWiFS (Longhurst, 2007).

В видовом составе фитопланктона доминирует пикопланктон, а именно кокколитофориды. Зоопланктон представлен, в основном, копеподами (*Oithona spp.* 29%, *Acartia tonsa* 19%, *Calanus finmarchicus* 16%, *Metridia lucens* 14% и пр. (Williams and Robinson, 1973)). Часто встречаются особи эуфазид (*Thysanoessa longicaudata*).

2. Исходные данные

*Концентрация хлорофилла *a**

В работе были использованы массивы спутниковых данных концентрации хлорофилла *a* из базы данных Climate Change Initiative Ocean Color CCI OC (<http://www.esaoccolour-cci.org/>) версий 4.2 и 5.0. Эта база данных представляет собой объединённую информацию с четырёх спектрорадиометров (SeaWiFS, MODIS Aqua, MERIS Aqua и VIIRS). Уровень обработки данных – 3. Из той же базы данных были получены значения коэффициента диффузного ослабления фотосинтетически активной солнечной радиации с длиной волны 490 нм ($k_d(490)$, m^{-1}). Пространственное разрешение данных – 4×4 км; временная дискретность – 8 дней (версия 4.2) и 1 день (версия 5.0). Временной период – 1998-2019 гг. (22 года).

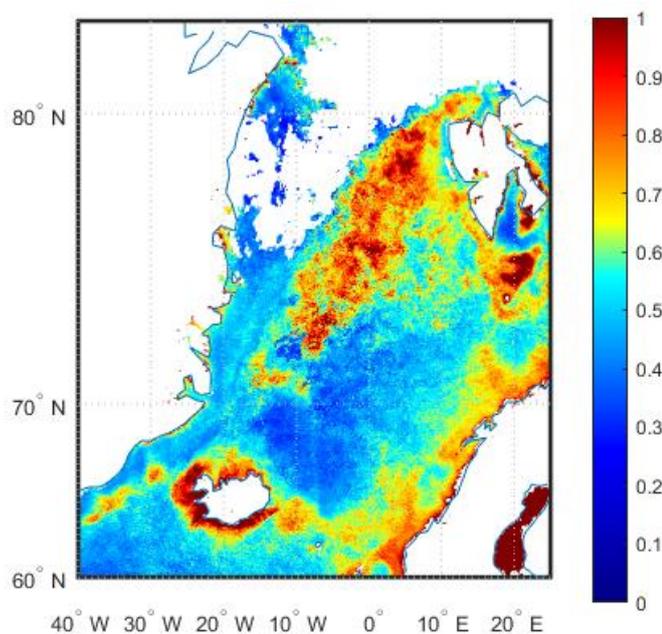


Рис. 6. Среднее пространственное распределение хлорофилла *a* (mg/m^3) за весь период (1998-2019 гг.).

Мезомасштабные вихри

Мезомасштабные вихревые структуры были идентифицированы с использованием спутниковых данных аномалий уровня из базы данных AVISO с временным разрешением 7 дней (Bashmachnikov et al., 2017). Пространственное разрешение составляет $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Временной период – 1993-2016 гг. (23 года). Для идентификации вихрей использован метод Nencioli et al. (2010), модифицированный Bashmachnikov et al. (2017). В рассматриваемый период выделено 95 321 вихрей, из которых 45 240 антициклонических образований и 50 081 циклонических.

Количество вихрей слабо зависит от сезона (рис. 7). Наибольшее число вихрей зафиксировано в январе и октябре, наименьшее – в декабре. На протяжении всех месяцев количество циклонов и антициклонов было примерно одинаково, при слабом преобладании циклонов. Наибольший радиус вихрей соответствует зимнему периоду, наименьший – летнему (рис. 8). Пиковая относительная завихренность (интенсивность) циклонов и антициклонов характеризуется синхронной внутригодовой изменчивостью с выраженным максимумом зимой и минимумом летом (рис. 9).

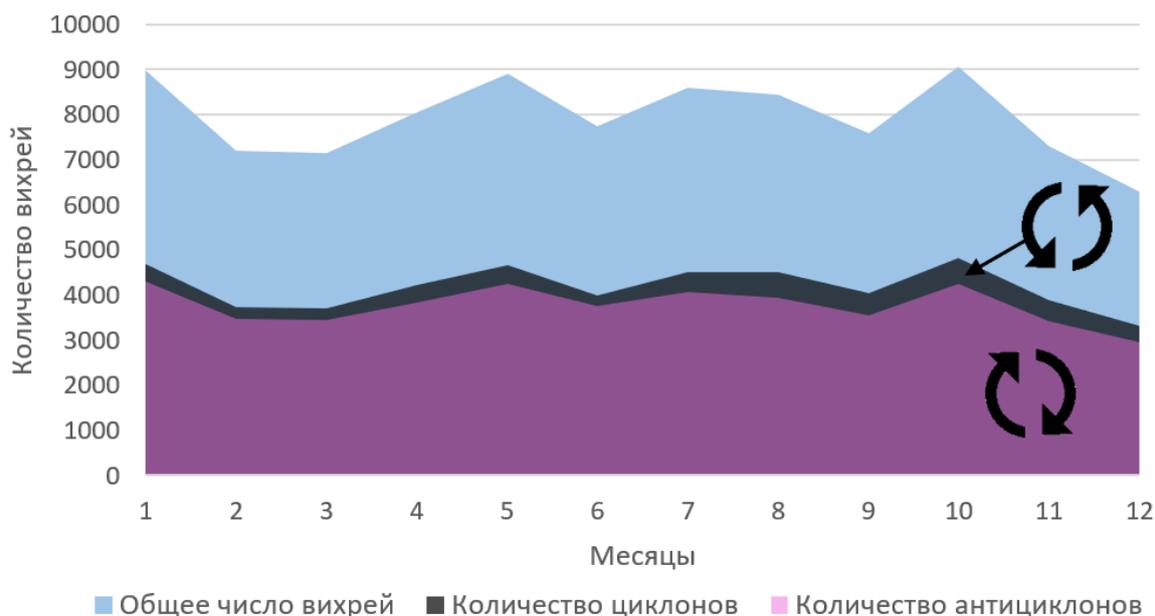


Рис. 7. Внутригодовое изменение количества вихрей.

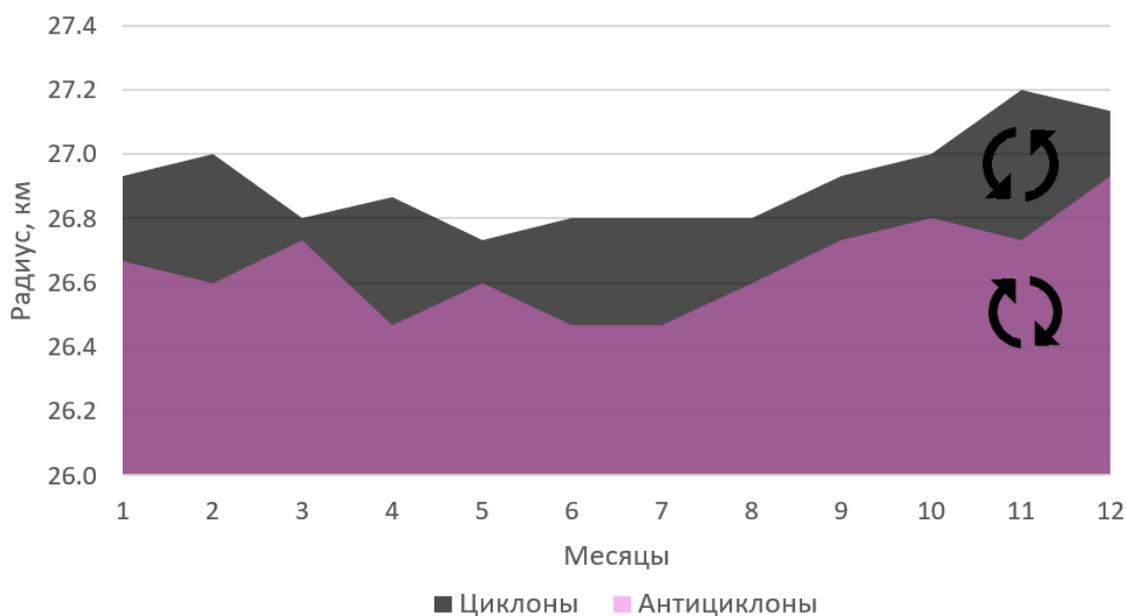


Рис. 8. Внутригодовое изменение радиуса вихрей.

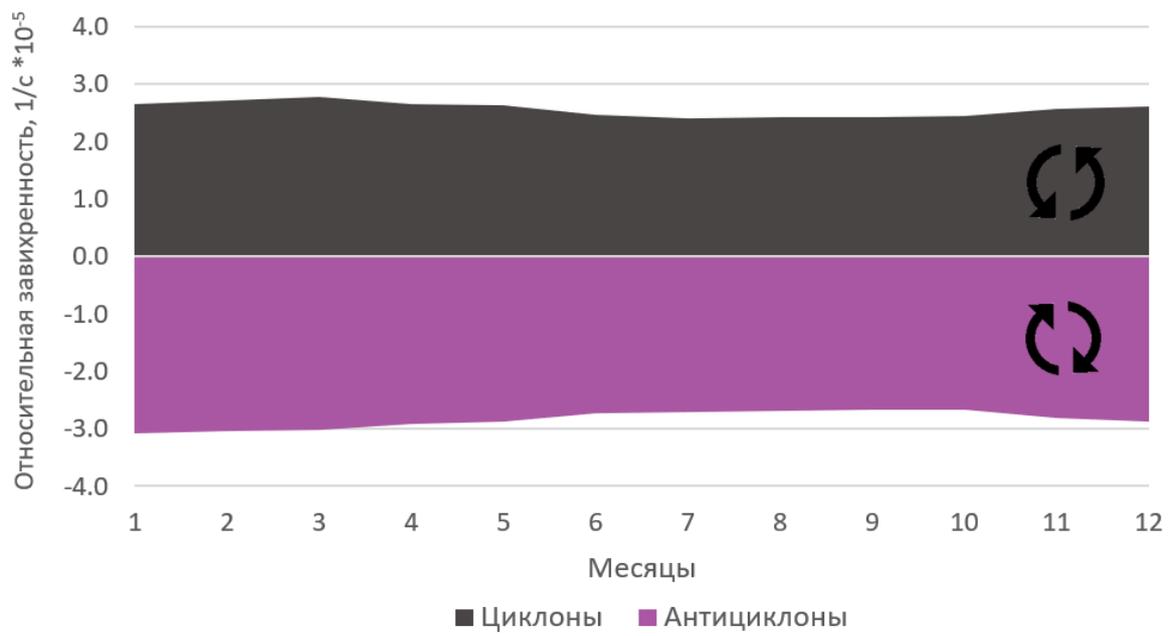


Рис. 9. Внутригодовое изменение относительной завихренности вихрей.

3. Предварительная обработка спутниковых данных цвета океана

Расчеты производились с помощью программных комплексов MATLAB и QGIS.

Для исключения влияния случайных экстремально больших значений, являющихся следствием неправильной регистрации излучения спектрорадиометром или ошибок при обработке данных, была произведена фильтрация значений концентрации хлорофилла a и $k_d(490)$.

Распределение этих величин подчиняется логнормальному закону (McKinna et al., 2019), поэтому предварительно были вычислены значения натурального логарифма концентрации хлорофилла a и $k_d(490)$. Выбросами считались величины, отклоняющиеся от среднеголетних значений логарифмов величин более чем на четыре стандартных отклонения (СКО). При этом происходило сглаживание распределения СКО путем осреднения района 80×80 км в окрестности точки.

Средние за весь период наблюдений концентрации хлорофилла приведены на рис. 10.

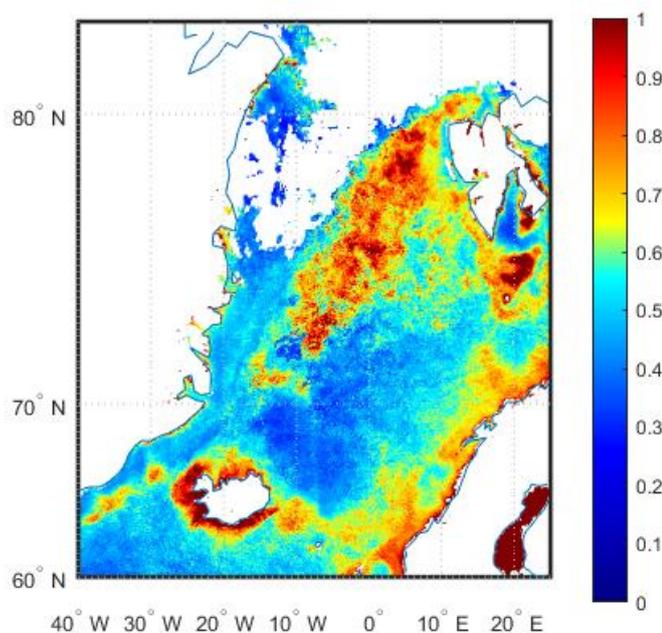


Рис. 10. Среднее пространственное распределение хлорофилла a (mg/m^3) за весь период (1998-2019 гг.).

Следующим этапом обработки данных было определение процентного соотношения количества данных каждого месяца от общего числа пикселей (рис. 11). Малое количество данных в январе, феврале и в период с октября по декабрь (менее 30% от общего числа пикселей) обусловили исключение этих месяцев из последующих расчетов.

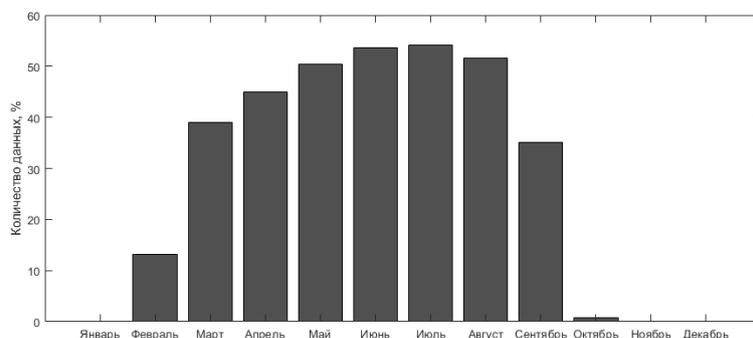


Рис. 11. Общее количество данных каждого месяца в процентах от общего числа пикселей.

Далее были произведены расчеты количества данных каждого года (рис. 12) и для различных сезонов каждого года (не приведено), которые показали достаточно однородный характер изменчивости от года к году. Межгодовая изменчивость концентрации хлорофилла *a* характеризуется слабым положительным трендом (рис. 13).

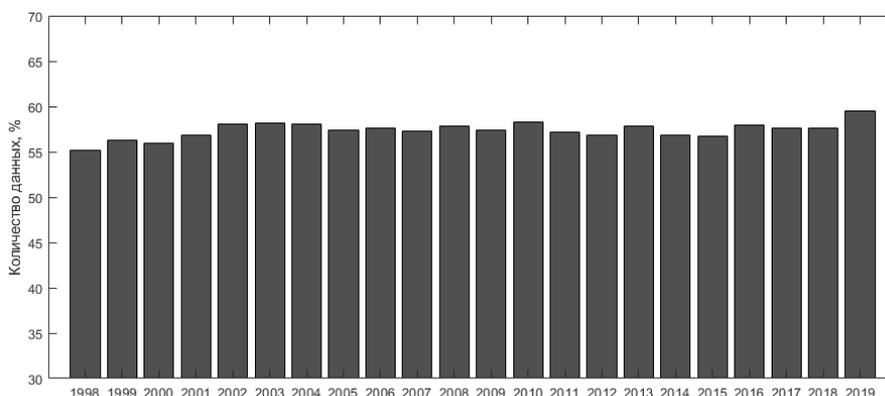


Рис. 12. Общее количество данных каждого года в процентах от общего числа пикселей.

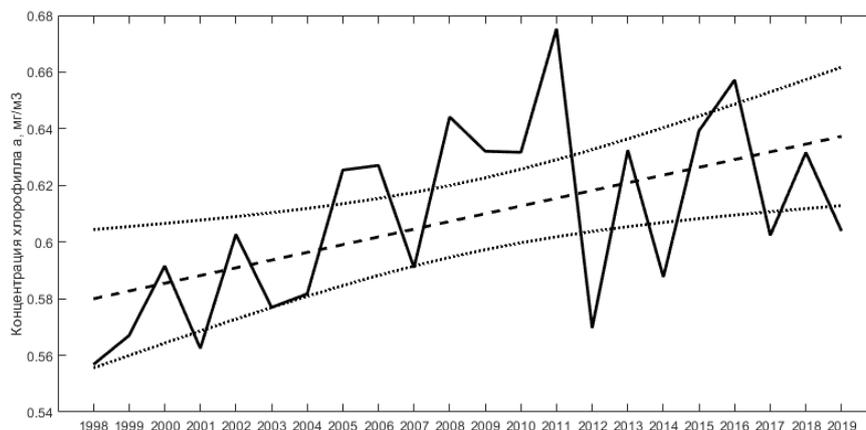


Рис. 13. Средняя по району межгодовая изменчивость концентрации хлорофилла *a* (мг/м³).
Уравнение линии тренда: $y = 0,0027x + 0,5773$, доверительный интервал $P=0,95$.

Для анализа достоверности значений концентрации хлорофилла *a*, рассчитанных на основе информации, полученной со спектрорадиометров в районе исследования, была произведена валидация спутниковых данных (Приложение 1).

4. Результаты

В работе был проведен анализ содержания хлорофилла в выделенных вихрях и вне их (фона). Значения концентрации хлорофилла (фон) в наибольшей степени определяется сезоном, широтой, полями ветра и переносом характеристик поверхностных вод течениями. Наличие и тип вихря формирует сравнительно малые аномалии концентрации хлорофилла (см. пример на рис. 14).

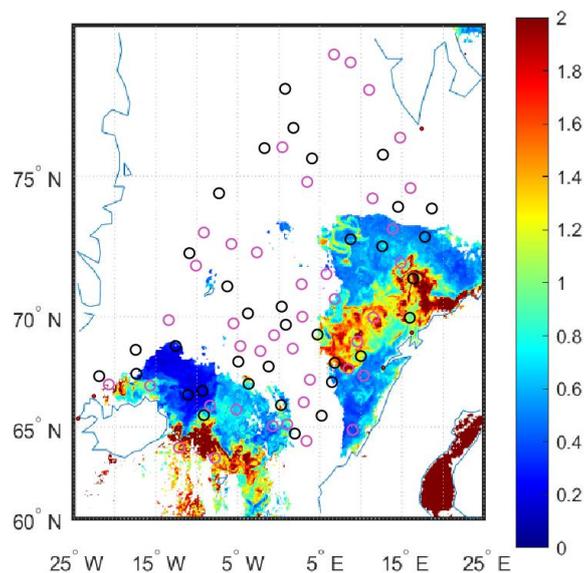


Рис. 14. Мезомасштабные вихри, зафиксированные в период с 13 по 19 августа и концентрация хлорофилла а 15 августа 2015 г.

Расчеты с использованием программного комплекса MATLAB показали преимущественное уменьшение концентрации хлорофилла *a* внутри как антициклонических, так и циклонических вихрей относительно фона. Было выделено два периода для анализа теплый (июль-август) и холодный (февраль-апрель). Остальные месяцы были исключены из расчетов либо в связи с интенсивной пространственно-временной изменчивостью процессов (май-июнь, сентябрь), влияющих на распределение хлорофилла и приводящих к высоким погрешностям в выделении влияния вихрей на распределение хлорофилла, либо в связи с недостатком данных концентрации хлорофилла из-за облачности (январь, октябрь – декабрь).

Сравнение осредненных значений внутри окружности с радиусом, равным половине радиуса вихря, и колец с внутренними и внешними радиусами 0,5 – 1, 1 – 2 и 2 – 5 радиусов вихрей позволили сделать вывод о том, что тип вихря оказывал сравнительно небольшое влияние на характер распределения концентрации хлорофилла (табл. 1 – 4, рис. 15).

Из таблиц 1 – 4 и рис. 15 видно, что, в среднем, вне вихрей концентрация хлорофилла выше, чем внутри них. Хотя эти различия довольно небольшие в среднем, в отдельных

вихрях разница весьма существенна. Однако если обратить внимание на межгодовую изменчивость средних разностей концентраций в теплый и холодный сезоны (рис. 16), то явную закономерность проследить сложно.

Помимо естественных причин, аномалии в центрах вихрей могли быть занижены по следующим причинам. Во-первых анализ производился по осредненным восьмидневным полям хлорофилла, что могло приводить к некоторой временно несостыковке расположения центров вихрей в недельных данных альтиметрии, а также искусственных аномалий в поле хлорофилла. Другой причиной может быть асимметричность и сложная форма вихревых структур, а также частые случаи расположения в непосредственной близости друг от друга, что определенно приводило к некоторому «размазыванию» значений. Третьей причиной может быть глубокое залегание максимума концентрации хлорофилла, не зафиксированное спутником, т.к. первая оптическая глубина (глубина, ограничивающая слой, о свойствах которого можно судить по данным со спутниковых спектрорадиометров) в районе исследований составляет всего 10 – 15 м.

Наибольшая разница между концентрацией внутри вихрей и вне, при достаточно высокой стабильности ее межгодовой изменчивости, была зафиксирована в теплый период в циклонах.

Таблица 1. Концентрация хлорофилла в циклонах в теплый период (июль – август)

Год	Концентрация хлорофилла, мг/м ³				Относительная завихренность	Радиус	Разница между	
	< 0.5 R	0.5 - 1 R	1 - 2 R	2 - 5 R			<0.5 и 1-2 R	<0.5 и 2-5 R
среднее	0.58	0.60	0.60	0.61			-0.02	-0.03
1998	0.53	0.55	0.52	0.46	2.51E-05	35.0	0.01	0.07
1999	0.49	0.50	0.52	0.56	1.63E-05	40.6	-0.03	-0.07
2000	0.57	0.65	0.63	0.60	1.75E-05	34.6	-0.06	-0.03
2001	0.69	0.71	0.68	0.67	2.29E-05	35.3	0.00	0.02
2002	0.57	0.57	0.60	0.63	2.71E-05	36.9	-0.03	-0.06
2003	0.59	0.60	0.64	0.63	2.28E-05	37.2	-0.05	-0.04
2004	0.54	0.55	0.56	0.61	1.99E-05	38.2	-0.03	-0.07
2005	0.61	0.61	0.64	0.66	2.49E-05	38.9	-0.03	-0.05
2006	0.62	0.61	0.49	0.60	1.85E-05	35.6	0.13	0.02
2007	0.61	0.60	0.62	0.66	2.20E-05	37.0	-0.02	-0.05
2008	0.56	0.58	0.61	0.59	2.09E-05	34.8	-0.05	-0.03
2009	0.63	0.66	0.64	0.61	2.49E-05	37.1	-0.01	0.03
2010	0.63	0.69	0.69	0.72	1.65E-05	34.9	-0.05	-0.08
2011	0.50	0.54	0.57	0.55	2.29E-05	34.5	-0.06	-0.04
2012	0.59	0.62	0.64	0.59	1.65E-05	37.0	-0.05	0.00
2013	0.63	0.65	0.66	0.69	2.11E-05	35.2	-0.03	-0.06
2014	0.59	0.60	0.63	0.62	2.98E-05	36.2	-0.04	-0.03
2015	0.55	0.55	0.58	0.61	2.13E-05	38.2	-0.03	-0.06
2016	0.48	0.48	0.50	0.53	2.06E-05	31.1	-0.02	-0.06

Таблица 2. Концентрация хлорофилла в антициклонах в теплый период (июль – август)

Год	Концентрация хлорофилла				Относительная завихренность	Радиус	Разница между	
	< 0.5 R	0.5 - 1 R	1 - 2 R	2 - 5 R			<0.5 и 1-2 R	<0.5 и 2-5 R
среднее	0.65	0.65	0.65	0.66			0.00	-0.01
1998	0.43	0.43	0.44	0.44	-2.35E-05	37.9	-0.00	-0.01
1999	0.73	0.76	0.80	0.77	-1.93E-05	39.3	-0.06	-0.04
2000	0.74	0.73	0.75	0.73	-2.11E-05	34.9	0.00	0.01
2001	0.74	0.74	0.73	0.71	-2.28E-05	34.6	0.01	0.03
2002	0.74	0.73	0.71	0.68	-2.35E-05	38.1	0.04	0.06
2003	0.63	0.62	0.62	0.57	-2.95E-05	36.0	0.00	0.06
2004	0.58	0.58	0.57	0.60	-1.96E-05	36.1	0.01	-0.02
2005	0.62	0.65	0.65	0.66	-2.89E-05	36.6	-0.03	-0.04
2006	0.59	0.54	0.57	0.67	-1.83E-05	36.0	0.02	-0.08
2007	0.74	0.68	0.69	0.66	-2.80E-05	39.6	0.05	0.08
2008	0.63	0.61	0.59	0.60	-2.52E-05	37.9	0.04	0.03
2009	0.67	0.67	0.68	0.68	-3.09E-05	36.6	-0.01	-0.02
2010	0.84	0.90	0.87	0.85	-1.84E-05	34.9	-0.04	-0.02
2011	0.56	0.55	0.56	0.57	-3.64E-05	33.9	0.00	-0.02
2012	0.57	0.57	0.56	0.61	-1.73E-05	38.2	0.01	-0.04
2013	0.71	0.78	0.74	0.74	-1.82E-05	34.1	-0.03	-0.03
2014	0.74	0.70	0.68	0.71	-1.72E-05	36.0	0.06	0.03
2015	0.59	0.58	0.60	0.64	-2.60E-05	36.0	-0.01	-0.06
2016	0.58	0.60	0.58	0.60	-1.43E-05	29.0	0.00	-0.02

Таблица 3. Концентрация хлорофилла в циклонах в холодный период (февраль - апрель)

Год	Концентрация хлорофилла				Относительная завихренность	Радиус	Разница между	
	< 0.5 R	0.5 - 1 R	1 - 2 R	2 - 5 R			<0.5 и 1-2 R	<0.5 и 2-5 R
среднее	0.42	0.41	0.42	0.43			0.00	-0.01
1998	0.43	0.45	0.44	0.45	1.88E-05	41.2	-0.01	-0.02
1999	0.33	0.33	0.35	0.35	1.54E-05	37.8	-0.01	-0.02
2000	0.33	0.32	0.32	0.33	1.60E-05	41.2	0.01	0.00
2001	0.38	0.39	0.41	0.43	2.00E-05	36.9	-0.04	-0.06
2002	0.37	0.36	0.38	0.41	2.45E-05	37.4	-0.01	-0.04
2003	0.55	0.56	0.56	0.58	1.83E-05	37.0	-0.01	-0.03
2004	0.58	0.56	0.55	0.57	2.84E-05	36.7	0.04	0.01
2005	0.43	0.42	0.41	0.41	2.46E-05	38.4	0.01	0.02
2006	0.46	0.48	0.48	0.50	2.31E-05	38.8	-0.02	-0.03
2007	0.33	0.32	0.31	0.32	1.31E-05	36.3	0.03	0.01
2008	0.39	0.42	0.45	0.46	1.75E-05	38.9	-0.05	-0.07
2009	0.40	0.39	0.40	0.44	1.95E-05	36.2	0.00	-0.04
2010	0.42	0.42	0.40	0.40	2.19E-05	35.9	0.02	0.03
2011	0.57	0.56	0.56	0.49	2.11E-05	38.3	0.01	0.09
2012	0.32	0.32	0.32	0.34	2.07E-05	40.3	0.01	-0.02
2013	0.32	0.29	0.32	0.39	1.18E-05	36.9	0.00	-0.06
2014	0.57	0.54	0.52	0.49	1.87E-05	38.5	0.05	0.08

Год	Концентрация хлорофилла				Относительная завихренность	Радиус	Разница между	
	< 0.5 R	0.5 - 1 R	1 - 2 R	2 - 5 R			<0.5 и 1-2 R	<0.5 и 2-5 R
2015	0.29	0.30	0.32	0.34	1.50E-05	34.7	-0.03	-0.05
2016	0.43	0.40	0.43	0.44	1.30E-05	34.0	0.00	-0.02

Таблица 4. Концентрация хлорофилла в антициклонах в холодный период (февраль - апрель)

Год	Концентрация хлорофилла				Относительная завихренность	Радиус	Разница между	
	< 0.5 R	0.5 - 1 R	1 - 2 R	2 - 5 R			<0.5 и 1-2 R	<0.5 и 2-5 R
среднее	0.38	0.39	0.39	0.40			-0.01	-0.02
1998	0.36	0.39	0.38	0.44	-2.08E-05	37.6	-0.02	-0.08
1999	0.34	0.34	0.35	0.32	-1.53E-05	39.3	-0.01	0.01
2000	0.36	0.38	0.40	0.43	-1.10E-05	39.7	-0.04	-0.07
2001	0.25	0.25	0.27	0.31	-1.18E-05	33.0	-0.02	-0.06
2002	0.37	0.37	0.37	0.39	-2.32E-05	37.8	-0.01	-0.02
2003	0.57	0.57	0.56	0.53	-2.09E-05	38.8	0.01	0.04
2004	0.49	0.49	0.48	0.48	-2.58E-05	36.4	0.01	0.00
2005	0.33	0.34	0.34	0.35	-2.68E-05	36.6	-0.01	-0.02
2006	0.43	0.42	0.39	0.39	-2.11E-05	38.8	0.04	0.04
2007	0.26	0.26	0.27	0.28	-1.32E-05	37.2	-0.01	-0.02
2008	0.49	0.51	0.51	0.51	-2.16E-05	34.7	-0.02	-0.02
2009	0.50	0.49	0.53	0.52	-1.79E-05	37.7	-0.04	-0.03
2010	0.32	0.31	0.30	0.33	-1.19E-05	35.7	0.02	-0.01
2011	0.38	0.38	0.39	0.43	-2.28E-05	37.2	0.00	-0.05
2012	0.33	0.32	0.31	0.31	-1.79E-05	36.0	0.01	0.01
2013	0.44	0.44	0.40	0.48	-1.39E-05	32.5	0.05	-0.04
2014	0.36	0.35	0.37	0.44	-1.29E-05	38.0	-0.01	-0.07
2015	0.36	0.38	0.39	0.31	-2.14E-05	38.4	-0.03	0.05
2016	0.33	0.33	0.34	0.35	-1.14E-05	33.3	-0.01	-0.01

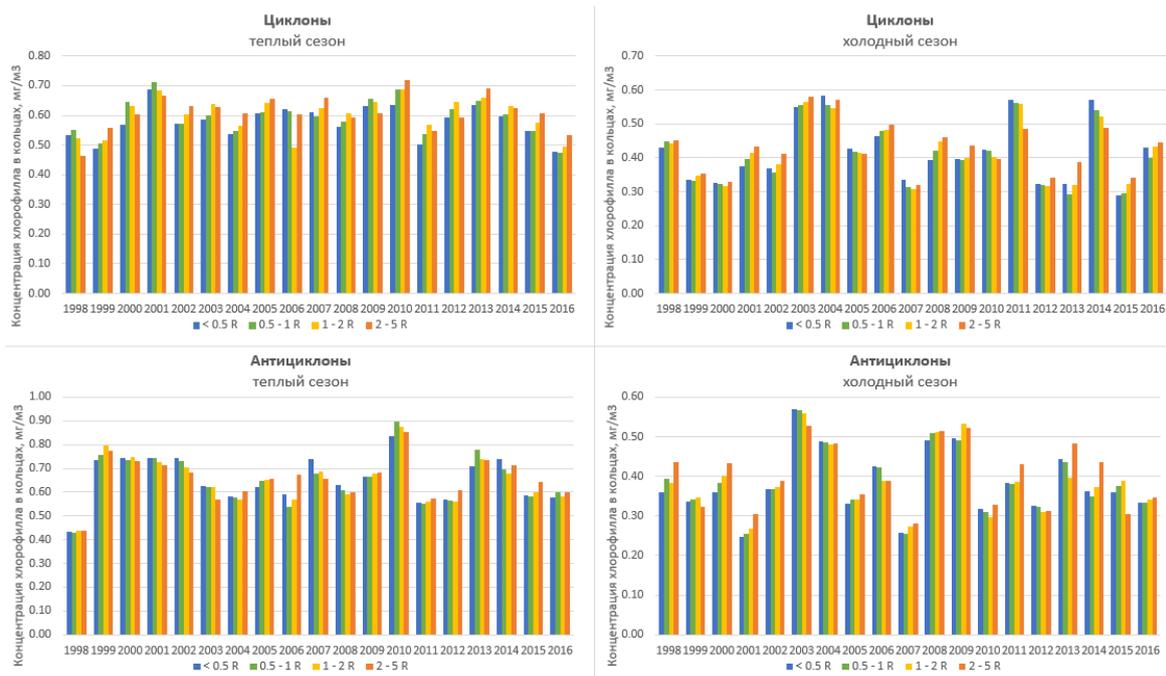


Рис. 15. Концентрация хлорофилла а внутри и вне вихрей.

На рисунках 15 и 16 прослеживается еще одна интересная особенность: пики разности концентраций в теплый и холодный сезоны находятся в противофазе. В годы, в которые обнаружены отрицательные аномалии концентрации хлорофилла внутри вихрей в теплый сезон, обычно наблюдаются положительные аномалии в холодный сезон, и наоборот.

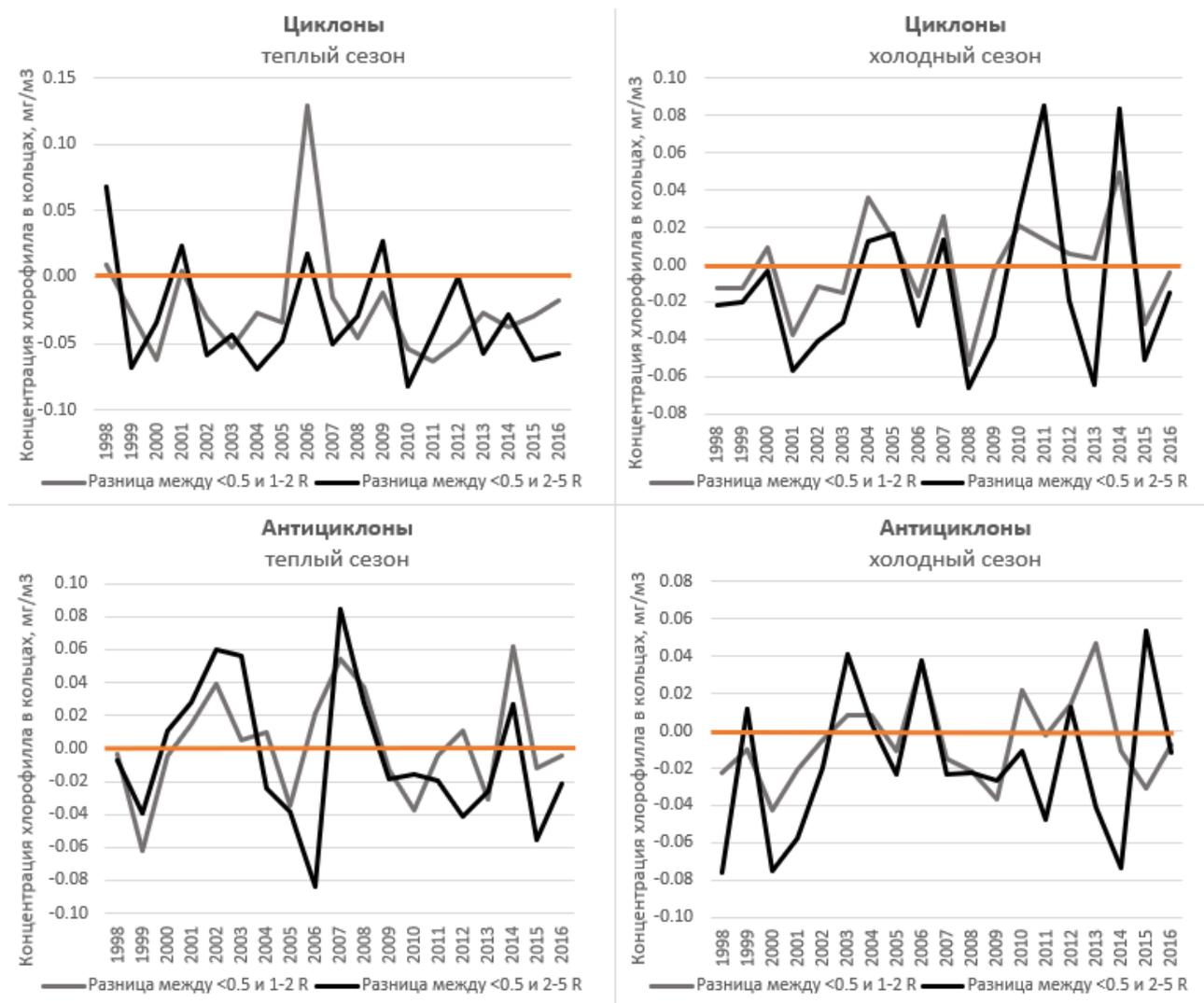


Рис. 16. Аномалии концентрации хлорофилла *a* в центре вихрей относительно периферии вихрей, а также в центре вихрей и областью вне вихрей (фоном).

Значения коэффициентов корреляции (рассчитаны по формуле 1), представленные в таблице 5, подтверждают наличие такой обратной зависимости между концентрацией хлорофилла в различные сезоны одного и того же года. Можно предположить, что это связано с изменчивостью глубины перемешанного слоя зимой. Интенсивное перемешивание зимой ведет к заглублению пикноклина, что, при больших зимних глубинах верхнего перемешанного слоя (100 – 200 м и более) приводит к уменьшению содержания планктона в поверхностном слое, регистрируемом спутником. Одновременно ожидается уменьшение ПП за счет длительного пребывания планктонных организмов вне фотического слоя.

При этом более глубокое перемешивание ведет к насыщению верхнего слоя биогенами, которые начинают играть критическую роль в повышении ПП (и концентрации планктона) в верхнем перемешанном слое летом. В этот период глубина перемешанного слоя всегда меньше глубины фотического слоя.

В таблице 5 также приведены коэффициенты корреляции между аномалиями хлорофилла (относительно фона) в центрах циклонов и в центрах антициклонов, в теплый и холодный сезоны. Хотя явной связи не наблюдается (во всех случаях значения коэффициентов не являются значимыми при $\alpha = 0,05$), но положительные значения позволяют предположить, что в вихрях обоих знаков изменчивость концентрации хлорофилла от года к году, в целом, происходит согласованно, во всяком случае в холодный сезон.

Таблица 5. Коэффициенты корреляции аномалий концентрации хлорофилла a относительно фона внутри и вне циклонов и антициклонов в теплый и холодный сезоны

Корреляция между разностью концентраций внутри и вне:	<0,5R – 1-2R	<0,5R – 2-5R
циклонов в теплый и холодный сезоны	-0.24	-0.23
антициклонов в теплый и холодный сезоны	-0.11	-0.35
циклонов и антициклонов в теплый сезон	0.14	-0.08
циклонов и антициклонов в холодный сезон	0.21	-0.31

$$Correl(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Выводы

В рамках выпускной квалификационной работы выполнены обработка и анализ больших массивов спутниковых данных концентрации хлорофилла *a*, и проанализировано влияние вихрей на распределение концентрации хлорофилла *a* в Норвежском море.

Сравнивались концентрации хлорофилла в ядре вихря, на его периферии и в окружающем океане (фон). По характеру сезонной изменчивости хлорофилла были выделены теплый и холодный сезоны, каждый из которых анализировался отдельно.

Средние аномалии концентрации хлорофилла в ядре вихрей были довольно слабые для обоих сезонов. Отчасти это могло быть следствием использования 8-дневных данных, ошибок определения центров вихрей в спутниковой альтиметрии, а также отличием концентраций хлорофилла, зафиксированных спутником, от его реальных концентраций, средних по перемешанному слою.

Несмотря на вышеперечисленное, представляется возможным выявить следующие характерные тенденции в пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла *a* под влиянием вихрей в Норвежском море:

- Выявлено, что концентрация хлорофилла в Норвежском море, в среднем, в ядрах вихрей ниже, чем на периферии вихрей или в фоновом поле. Данная особенность систематически наблюдалась ранее в также в разных морях Северо-Европейского бассейна (Lobanova, Bashmachnikov, 2019), а также северной части Тихого океана (Xu et al., 2019). Аналогично результатам этой дипломной работы, авторы свидетельствуют о том, что при типичном увеличении концентрации хлорофилла от центров к периферии вихрей, такая структура наблюдается не всегда. Проанализировав большое число вихрей, Xu et al. (2019) пришли к выводу, что основной причиной формирования «колец» повышенной концентрации хлорофилла вокруг вихрей (как циклонов, так и антициклонов), является захват вихревыми структурами окружающих вод, которые содержат повышенные концентрации хлорофилла.
- Выявлено, что наибольшая разница между концентрацией внутри и вне вихрей Норвежского моря наблюдается циклонах в теплый период. Причины этого пока не ясны, требуется дальнейший анализ с привлечением натурных данных.
- Выявлено, что полученные выше аномалии концентрации в вихрях в теплый и холодный сезоны года имеет обратную зависимость. Предположительно это связано с межгодовой изменчивостью глубины перемешанного слоя зимой: при больших глубинах перемешанного слоя зимой наблюдается меньшие

концентрации хлорофилла за счет размывания концентрации по большему слою, а летом – большие концентрации за счет более активного подъема биогенов зимой. Увеличение количества биогенов ведет к большей пятнистости фоновой концентрации хлорофилла, что приводит к более частому захвату аномалий хлорофилла периферией вихревых образований.

- Полученные в работе гипотезы нуждаются в дальнейшей их верификации путем привлечения натуральных данных.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Bashmachnikov, I. L., Kozlov, I. E., Petrenko, L. A., Glok, N. I., & Wekerle, C. (2020). Eddies in the North Greenland Sea and Fram Strait from satellite altimetry, SAR and high-resolution model data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125, e2019JC015832, 2020, 26 p.
2. Brown, C. W. Global distribution of coccolithophore blooms / *Oceanography* – 1995 – No.8, P. 59–60.
3. Chai T., Draxler R. R. Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature. *Geoscientific Model Development*, 2014, Vol. 7(3), P. 1247-1250
4. Climate Change Initiative home page. European Space Agency. - 2020. URL: <http://www.esaoceancolour-cci.org/>
5. Ellis, D.V. Arctic benthos of North America / *Nature (Lond.)* - (1959) – No.184, P. 79–80.
6. Harrison, W.G., et al. Depth profiles of plankton, particulate matter and microbial activity in the eastern Canadian arctic during summer / *Polar Biol* – 1987 – No.7, P. 208–224.
7. Holligan, P.M. Biological implications of fronts on the northwest European shelf / *Phil. Trans. R. Soc. London (A)* – 1981 – No.302, P. 547–562.
8. International Hydrographic Organization. *Limits of Oceans and Seas*. 1953
9. Lobanova P., Bashmachnikov I. Chlorophyll-a anomalies in cyclones and anticyclones in the Nordic Seas // *Living Planet Symposium*, 13-17 may 2019, Milan, Italy.
10. Lobanova P., Tilstone G.H., Bashmachnikov I., Brotas V. Accuracy assessment of primary production models with and without photoinhibition using Ocean-Colour Climate Change Initiative data in the north east Atlantic Ocean // *Remote Sensing*, 2018, 10(7), 1116.
11. Longhurst A. *Ecological Geography of the Sea* / Academic Press - 2007 – 542 p. McKinna L.I.W., Cetinić I.C., Chase A.P., Werdell P.J. Approach for Propagating Radiometric Data Uncertainties Through NASA Ocean Color Algorithms. *Frontiers in Earth Science*, 2019, Vol. 7, 176 p.
12. McKinna L.I.W., Cetinić I.C., Chase A.P., Werdell P.J. Approach for Propagating Radiometric Data Uncertainties Through NASA Ocean Color Algorithms. *Frontiers in Earth Science*, 2019, Vol. 7, 176 p.
13. Nencioli, F., Dong, C., Dickey, T., Washburn, L., & McWilliams, J. C. A vector geometry-based eddy detection algorithm and its application to a high-resolution

- numerical model product and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(3), 564–579.
14. Richter, C. Regional and seasonal variability in the vertical distribution of mesozooplankton in the Greenland Sea / *Ber. Polarforsch.* – 1994 – No.154, P.1–87.
 15. Smith, W.O., et al. Importance of Phaeocystis blooms in the high-latitude ocean carbon cycle / *Nature (Lond)* – 1991 – No.352, P. 514–516.
 16. Thorson, G. Benthos. *A Treatise on Marine Ecology and Palaeoecology* / (Mem. Geol. Soc. Am.) – 1957 – P. 461–534.
 17. Xu G., Dong C., Liu Y., Gaube P., Yang J. Chlorophyll Rings around Ocean Eddies in the North Pacific / *Scientific reports* – 2019 – 8 p.
 18. Wassman, P., et al. Patterns of production and sedimentation in the boreal and polar Northeast Atlantic / *Polar Biol.* – 1991 – No.10, P. 209–228.
 19. Волков В. А., Гусев Е. А. Северный Ледовитый океан // Большая российская энциклопедия. Том 29. Москва, 2015, стр. 634-639.
 20. Лобанова П.В. Спутниковые алгоритмы оценки первичной продукции в водах с различными океанологическими условиями: на примере Северо-Восточной Атлантики и Японского моря: диссертация ... кандидата географических наук: 25.00.28. - Санкт-Петербург, 2017. - 389 с.
 21. Маккавеев П. Н., Лимонов А. Ф. и др. Атлантический океан // Большая российская энциклопедия. Электронная версия (2016) Режим доступа: <https://bigenc.ru/geography/text/3360351/>. Дата обращения: 16.04.2020.

Приложение 1. Валидация спутниковых данных

Анализ достоверности значений концентрации хлорофилла *a*, рассчитанных по данным спектрорадиометра, производился путем сравнения результатов спутниковых и *in situ* наблюдений.

Станции натуральных измерений, для которых доступны данные единовременных спутниковых результатов измерений, с распределением по сезонам отображены на рисунке 17. Распределение станций судовых измерений за весь исследуемый период тяготеет к южной части исследуемого района.

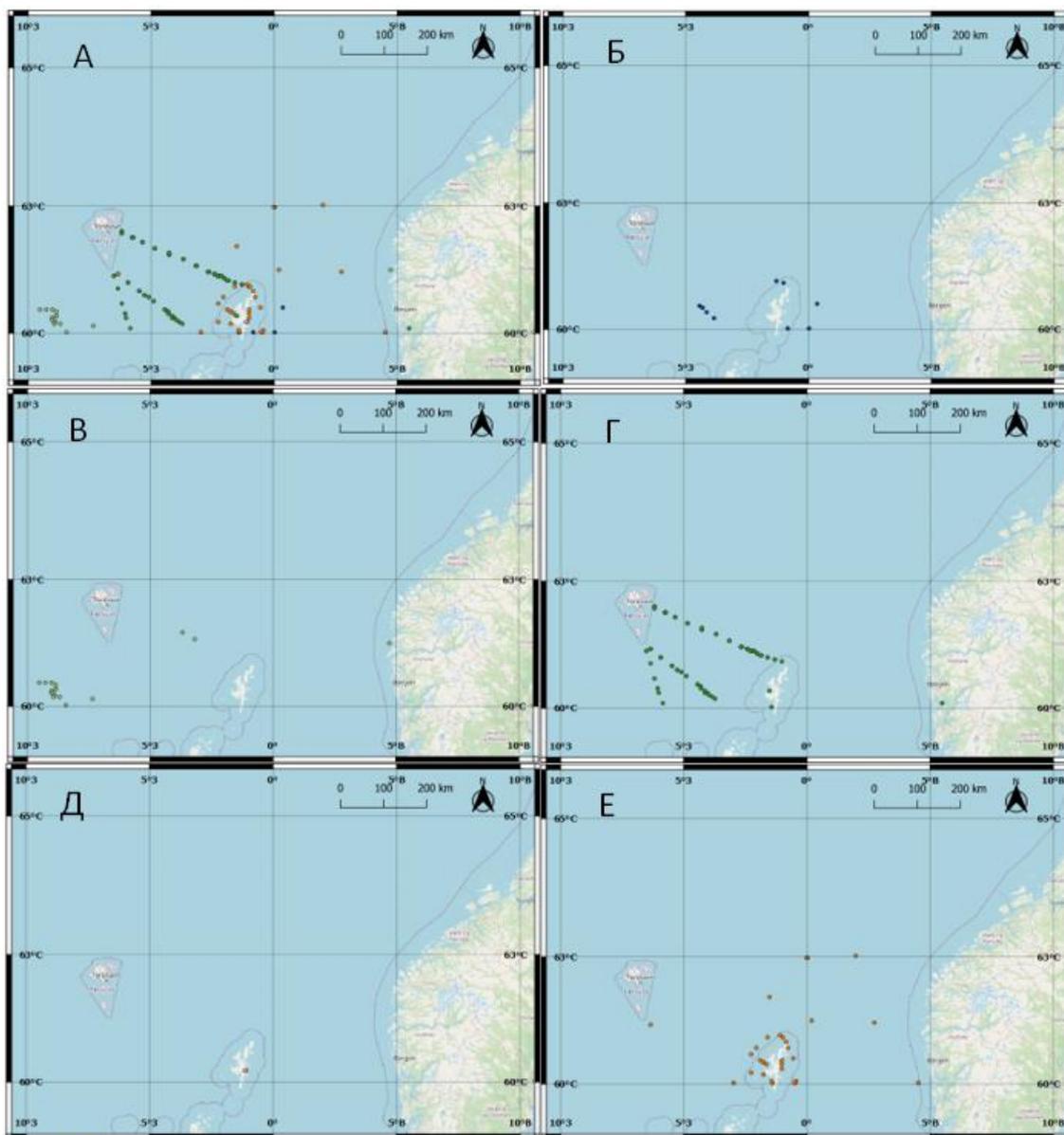


Рис. 17. Станции судовых измерений концентрации хлорофилла *a*, которым соответствуют одновременные спутниковые измерения.

A – за весь период наблюдений, *Б* – в зимний период (октябрь-февраль), *В* – в период ранней весны (март-апрель), *Г* – в период поздней весны (май-июнь), *Д* – в летний период (июль), *Е* – в осенний период (август-сентябрь).

Выбор количества и продолжительности сезонов обоснован внутригодовыми изменениями концентрации хлорофилла *a* (рис. 18). В апреле начинается интенсификация водного цветения, пик которого приходится на май. В некоторые годы присутствует второй пик, приходящийся на август или сентябрь (Лобанова, 2017), обусловленный снижением скорости выедания фитопланктона из-за сезонной миграции гетеротрофных организмов в более глубокие слои (Longhurst, 2007).

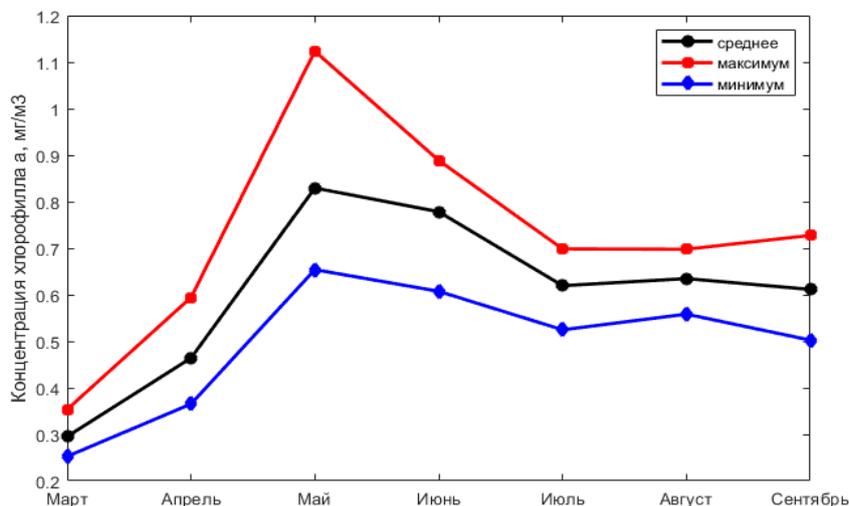


Рис. 18. Внутригодовая изменчивость концентрации хлорофилла *a*.

Особенности внутригодового хода изменения концентрации хлорофилла в каждый отдельный год и при многолетнем осреднении позволяют выделить следующие сезоны:

1. зима (октябрь – февраль);
2. ранняя весна (март – апрель);
3. поздняя весна (май – июнь);
4. лето (июль);
5. осень (август – сентябрь).

На диаграмме рассеяния судовых данных и данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) наблюдается ряд точек, выбивающихся из общей картины (рис. 19). Эти точки соответствуют различным годам и сезонам и, скорее всего, их положение объясняется неравномерностью очагов распространения фитопланктона и не полным временным совпадением судовых и ДЗЗ измерений.

В таблице 6 приведены значения коэффициента корреляции (формула 1) рядов данных спутниковых и судовых наблюдений. Наилучшее совпадение наблюдается поздней весной.

$$Correl(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}} \quad 1)$$

Таблица 6. Коэффициент корреляции натуральных и спутниковых данных

Временной период	Коэффициент корреляции
Весь период	0.35
Зимой	-0.26
Ранней весной	0.34
Поздней весной	0.51
Летом	0.14
Осенью	0.19

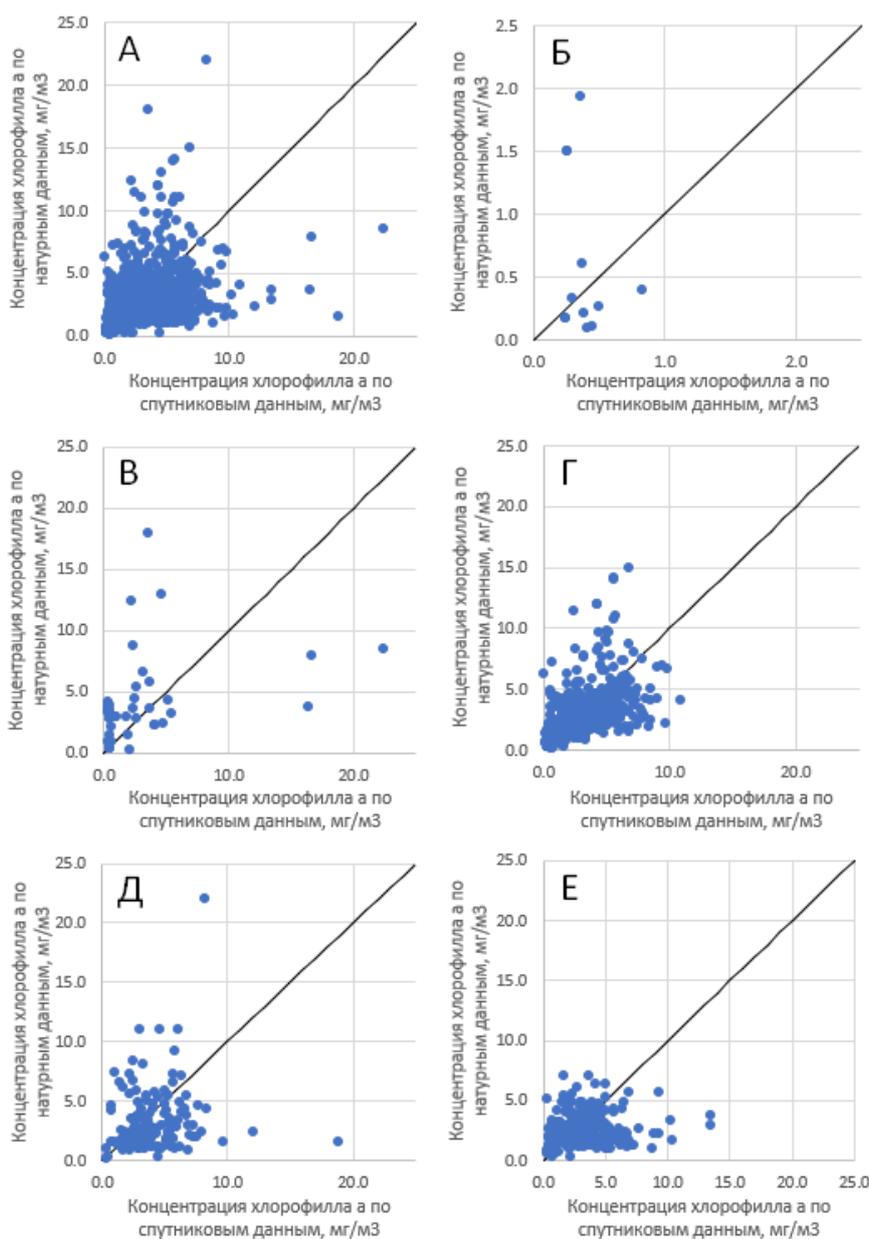


Рис. 19. Диаграмма рассеяния спутниковых и *in situ* значений концентрации хлорофилла а в слое до первой оптической глубины (10 м). Сплошная линия – равенство спутниковых и *in situ* значений.

А – за весь период наблюдений, $n=964$, Б – в зимний период (октябрь-февраль) $n = 12$, В – в период ранней весны (март-апрель) $n = 44$, Г – в период поздней весны (май-июнь) $n = 396$, Д – в летний период (июль) $n = 154$, Е – в осенний период (август-сентябрь) $n = 355$.

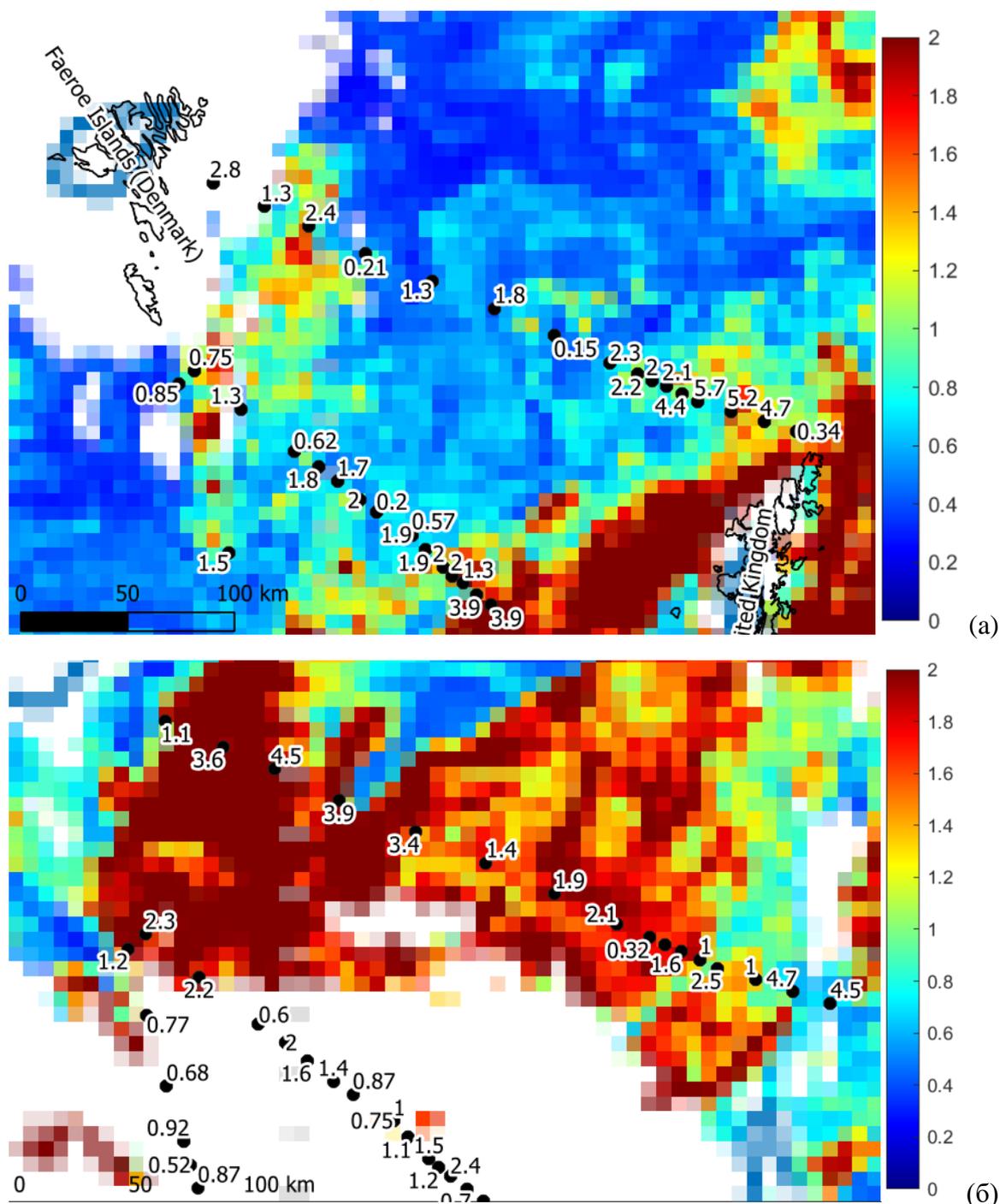
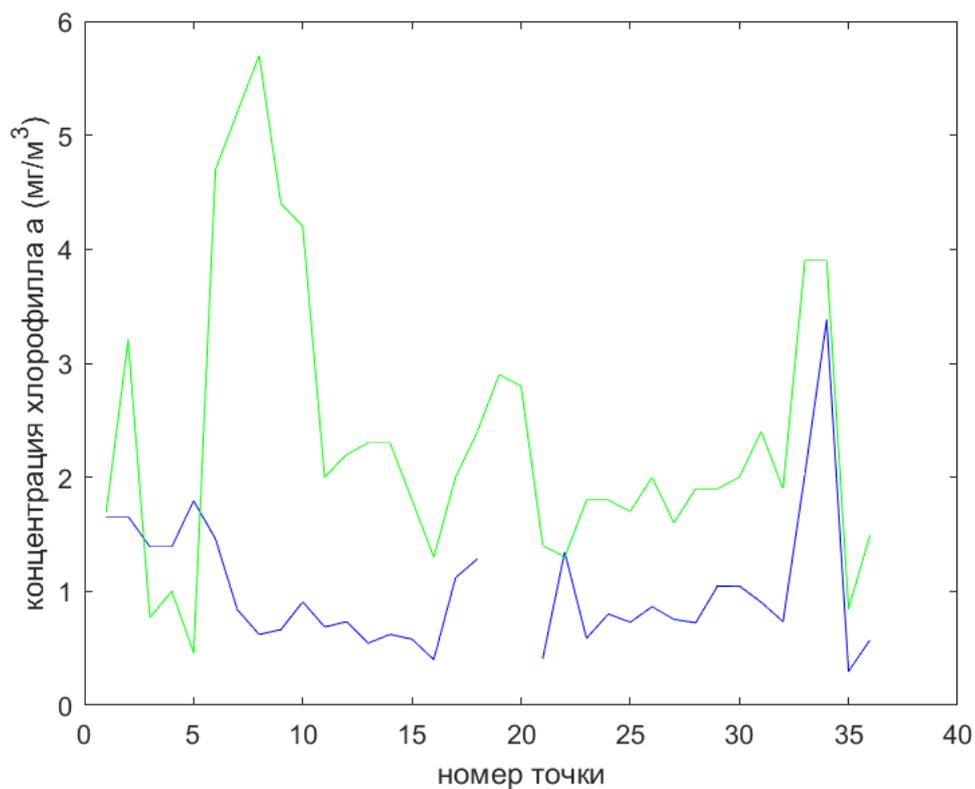


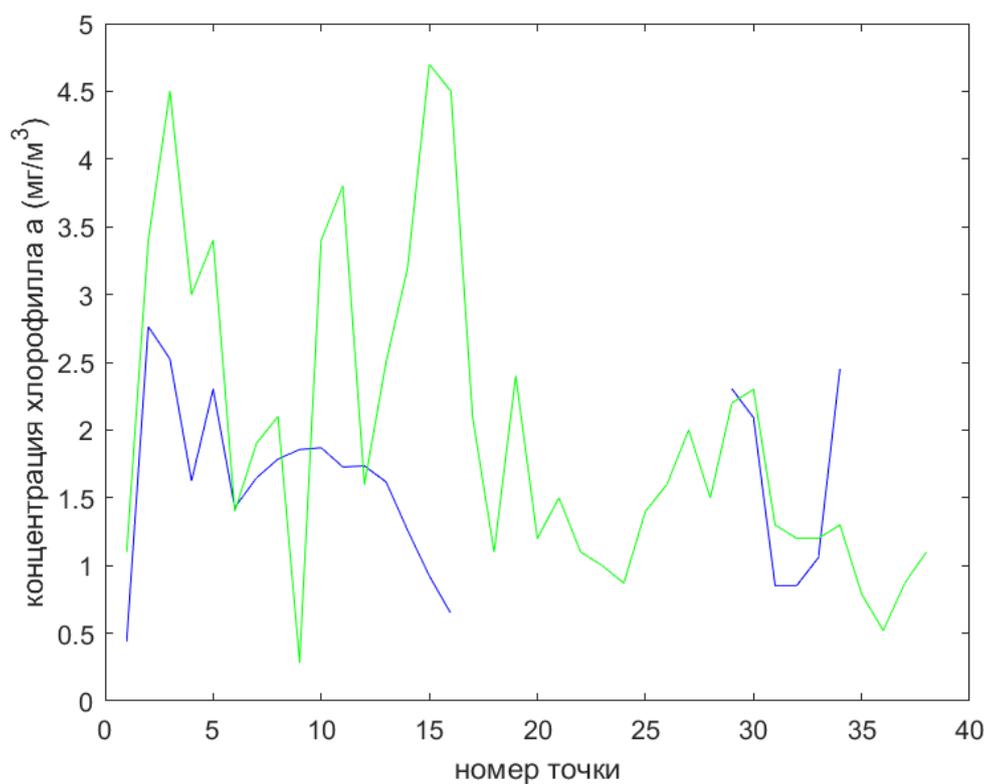
Рис. 20. Пример сравнения концентраций хлорофилла по спутниковым и судовым данным (mg/m^3). цвет – концентрация хлорофилла а по спутниковым данным; цифровые значения около точек – концентрация хлорофилла а по судовым данным. (а) снимок за 17.05.2010 и судовые данные за 12 – 29.05.2010; (б) снимок за 09.05.2011 и судовые данные за 13 – 19.05.2011.

Изменение в пространстве результатов натуральных и спутниковых измерений имеет схожий характер (рис. 20, 21). Концентрация хлорофилла, рассчитанная по данным ДЗЗ, почти во всех точках ниже, чем полученная по результатам измерений *in situ*. Это объясняется преимущественным отбором проб с глубины 5 м, в то время как первая оптическая глубина (слой, о свойствах которого можно судить по данным спутниковых

спектрорадиометров) составляет около 10 м (1/к_d). В результате среднее по слою значение оказывается несколько ниже зарегистрированного в одной точке с судна.



(а)



(б)

Рис. 21. Концентрация хлорофилла а по результатам спутниковых (синий) и судовых (зеленый) измерений 17.05.2010 (а) и 09.05.2011 (б) вдоль профилей на рис. 10.

Для рядов результатов судовых и спутниковых измерений были рассчитаны абсолютная среднеквадратическая ошибка и корень из центрированной среднеквадратической ошибки (АСКО и sqrt(ЦСКО) соответственно) по формулам 2 и 3 (Chai et al., 2014), в которых X^E – эмпирически измеренная величина, X^S – величина, полученная на основе данных ДЗЗ.

$$АСКО = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i^E - X_i^S)^2} \quad (2)$$

$$\text{sqrt(ЦСКО)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(X_i^E - \bar{X}^E) - (X_i^S - \bar{X}^S)]^2} \quad (3)$$

Таблица 7. Абсолютная среднеквадратическая ошибка, корень из центрированной среднеквадратической ошибки (АСКО и sqrt(ЦСКО)) и среднеквадратическое отклонение (СКО) рядов судовых и спутниковых измерений

Характеристика	Значение
АСКО	2,63
sqrt(ЦСКО)	2,81
СКО спут	2,37
СКО суд	2,20
СКО общ	2,29

Получившиеся значения величин АСКО и sqrt(ЦСКО) примерно равны среднеквадратическому отклонению полей хлорофилла (табл. 7). Это говорит о довольно существенном различии результатов спутниковых и натуральных данных.

Таким образом, результаты сравнения натуральных и спутниковых данных концентрации хлорофилла, говорят о том, что к спутниковым данным в районе исследований надо относиться с некоторой долей осторожности. При этом высокая пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла является одной из причин наблюдаемых различий мгновенных натуральных наблюдений и композитных 8-дневных карт спутниковых карт.

Результаты показывают, что спутниковые данные дают несколько заниженные средние концентрации хлорофилла и интенсивность его пространственной изменчивости, но позволяют правильно оценивать общие тенденции пространственно-временной изменчивости концентрации хлорофилла.

Abstract

The paper consists in identifying the regularities of the influence of mesoscale eddies on the distribution field of chlorophyll *a* concentration in the Norwegian Sea.

As research materials are used data on chlorophyll concentration from satellite spectroradiometers, as well as data on the distribution of mesoscale eddies calculated on altimetry data. Data processing consisted of comparing chlorophyll concentration inside and outside the vortices. For this, its values were averaged: (a) at the centers of vortices within circles with radii equal to 0.5 vortex radii (R); (b) inside vortices within rings with inner and outer radii of 0.5 and $1R$; (c) in the immediate vicinity of vortices within rings with radii 1 and $2R$; (d) in areas that are conventionally not affected by vortices within rings with radii 2 and $5R$.

The relevance of research is due to the lack of information on the influence of cyclonic and anticyclonic eddies on the dynamics of phytoplankton in the subpolar North Atlantic. The values of chlorophyll *a* concentration used in this work can serve as an indicator of phytoplankton biomass. Thus, the regularities in the distribution of chlorophyll *a* concentration can, with some assumptions, be transferred to the productivity of the primary trophic link in the studied region.

The paper presents data on average values of chlorophyll *a* concentration inside and outside eddies in the North Atlantic Ocean during warm and cold seasons from 1998 to 2016. The conclusion contains an interpretation of the results obtained and the main hypotheses about the regularities of the formation of the chlorophyll *a* concentration field under the influence of cyclonic and anticyclonic mesoscale circulation.