

Среда обитания
водных биологических ресурсов
Диагноз и прогноз условий среды обитания гидробионтов

УДК 551.46.07:629.783 (269)

**Особенности сезонной динамики хлорофилла *a*
в связи с абсолютной динамической топографией
Антарктической части Атлантики**

Д.А. Чурин^{1,2}, С.Ю. Гулюгин¹

¹ Атлантический научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии (ФГБНУ «АтлантНИРО»), г. Калининград

² Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ФГБУН «ИО РАН»), г. Москва

E-mail: churind@atlantniro.ru

На основе анализа спутниковых данных по содержанию хлорофилла *a* в поверхностных водах за период 1997–2014 гг. получены ежемесячные среднемноголетние нормы распределения хлорофилла *a* по субширотным зонам пролива Дрейка и моря Скотия. Проанализирована сезонная динамика хлорофилла и её связь с данными по абсолютной динамической топографии (АДТ) морской поверхности. С учётом пространственного распределения были выделены области повышенной и пониженной концентрации хлорофилла *a* на рассматриваемой акватории. Показано, что области с повышенной концентрацией хлорофилла *a* лежат в определённых границах изолиний АДТ. В каждой из рассматриваемых зон были выделены точки, для которых выполнен анализ динамики среднегодового хода значений хлорофилла *a*. Установлено, что максимальное развитие хлорофилла *a* характерно для ноября в районе распространения субантарктической поверхностной водной массы и декабря для более южных районов моря Скотия со вторым пиком в феврале. Минимальные концентрации хлорофилла отмечаются в июле. В соответствии с международной классификацией получены уровни трофности субширотных зон моря Скотия на основе 17-летнего ряда данных.

Ключевые слова: хлорофилл *a*, дистанционное зондирование Земли, спутниковая альтиметрия, трофность природных водоёмов, Южный океан.

ВВЕДЕНИЕ

Антарктическая часть Атлантики (АчА) — один из наиболее продуктивных районов Мирового океана и традиционный район отечественного промысла и рыбохозяйственных исследований.

В настоящее время одним из наиболее актуальных направлений современных экологических исследований является изучение роли климатических тенденций в изменении продуктивности вод Мирового океана. При этом важ-

нейшим параметром при оценке продуктивности вод является концентрация фитопланктона. Долгое время для изучения сезонного развития фитопланктонных сообществ Южного океана использовались отрывочные данные судовых наблюдений [Биология океана, 1977 а, 1977 б]. Их использование было недостаточно для полноты описания сезонного цикла. Особенно это касается таких крупномасштабных районов, как Антарктическая часть Атлантики. В то же время дистанционное зондирование Земли из кос-

моса предоставляет уникальную возможность исследования сезонной динамики хлорофилла *a*. Наибольшее развитие этот метод получил с началом поступления данных спутника SeaStar в 1997 г., когда впервые был использован сканер цвета моря (спектрорадиометр) SeaWiFS (Sea viewing Wide Field Sensor), применявшийся для оценки поверхностного содержания хлорофилла *a* [Acker, 1994].

Для оценки качества спутниковых данных был выполнен ряд работ по выявлению степени корреляции между поверхностными значениями хлорофилла *a*, полученными контактным и дистанционным способами, а также поиск возможности восстановления данных по хлорофиллу в толще воды исходя из поверхностных значений. Например, получены уравнения зависимости между значениями хлорофилла *a* в поверхностном слое и первичной продукции, что позволяет в продукционных моделях делать пересчеты хлорофилла *a* в первичную продукцию [Александров, 2009]. Кроме того, найдены соотношения между значениями хлорофилла *a* в поверхностном слое и общим содержанием хлорофилла *a* в толще воды, что даёт возможность получить общее значение хлорофилла *a* в воде, зная его поверхностное содержание [Мордасова, 1987, 1989, 1991, 2014; Демидов 2007, 2011, 2012 а, 2012 б; Александров и др., 2009]. При сопоставлении спутниковых данных и данных судовых измерений поверхностного содержания хлорофилла *a* из проб воды, взятых с того же участка, была получена высокая степень корреляции, близкая или более 0,9 по разным работам [Демидов 2007, 2011, 2012 а, 2012 б; Holm-Hansen, 2004; Александров, 2009].

Ряд исследований посвящен анализу спутниковых данных, например, были рассмотрены спутниковые среднемесячные данные по хлорофиллу *a* массива SeaWiFS с 1997 г. по 2009 г. [Скрипалева, Шугаев, 2011]. В результате было установлено, что в открытых районах океана прослеживается связь пространственно-го распределения концентрации хлорофилла *a* (и его сезонного цикла) с крупномасштабной термохалинной структурой вод.

По общим представлениям концентрация и пространственное распределение хлорофилла зависят от таких абиотических и биотических

факторов, как продолжительность светового дня в вегетативный период, сила ветрового воздействия, конвекция вод, расположение границы ледового покрова, концентрация растворённого в воде железа, интенсивность потребления фитопланктона. Еще одним фактором, который оказывает значительное влияние на распределение очагов хлорофилла и развитие фитопланктона, является воздействие мезомасштабных вихревых структур [Strass et al., 2002; Белоненко и др., 2010].

Периодически предпринимаются попытки выделения неких более-менее однотипных участков с отличительными гидрологическими и гидрохимическими свойствами [Масленников, 2003]. Для района Антарктической части Атлантики было выделено пять субширотных зон на основе информации по абсолютной динамической топографии и данных, полученных с поверхностных дрейфующих буев [Бородин и др., 2014; Чернышков и др., 2014; Чурин, 2017]. На основе кластерного анализа полей аномалий динамической топографии были выявлены 5 классов, различающихся по характеру изменчивости среднегодовых значений аномалий (рис. 1). Районы расположения классов в основном совпадают с циркуляционными системами и хорошо различаются по типу водных масс и интенсивности динамических процессов.

Основной целью данной работы стало выявление особенностей сезонной динамики хлорофилла *a* в каждой из выделенных зон за период 1997–2014 гг. с привязкой к высотам абсолютной динамической топографии океана.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основой для исследования послужили спутниковые данные по распределению хлорофилла *a* абсолютной динамической топографии и скоростям течений с сентября 1997 г. по декабрь 2014 г. Анализ проводился по выделенным ранее субширотным зонам моря Скотия [Чурин и др., 2014]. Данные по среднемесячному содержанию хлорофилла *a* на основе спутниковых измерений взяты с Copernicus Marine Service [<http://marine.copernicus.eu/>]. Шаг между узлами регулярной сетки координат составляет $0,25^{\circ}$ по широте и долготе. Всего были обработаны 21 тыс. узлов регулярной сеточной области. Район исследования ограни-

чен координатами 36–65° ю.ш., 20–70° з.д. (рис. 1).

В работе были использованы данные по абсолютной динамической топографии (АДТ, CLS-09) и скоростям течений, представленные в открытом доступе на сайте AVISO (Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data) [<http://www.aviso.oceanobs.com/en/>].

Для исследования сезонной динамики хлорофилла *a* были созданы карты среднемного-

летних месячных норм на основе данных за период 1997–2014 гг. В связи с различиями в интенсивности процессов развития фитопланктона на океанических участках и в неритических зонах внутри каждой субширотной зоны были выбраны реперные точки, в которых проводился анализ сезонного хода значений хлорофилла *a* (рис. 2).

Для оценки состояния вод по уровню трофности была использована классификация (таблица), которая обычно применяется для

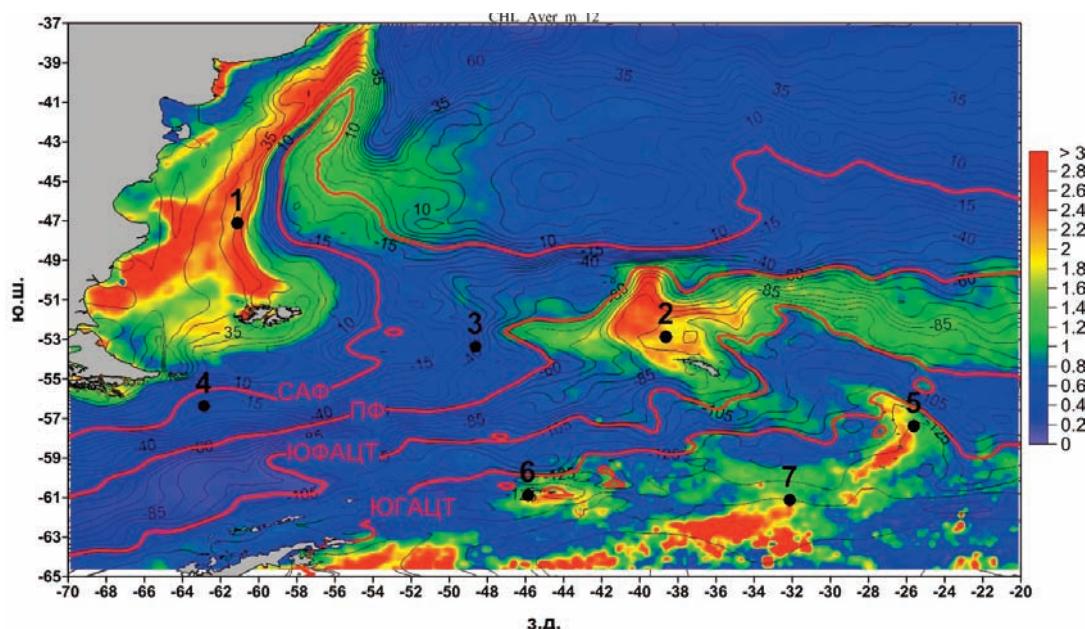


Рис. 1. Среднемноголетняя (1997–2014 гг.) месячная норма распределения хлорофилла *a* на поверхности моря в декабре (цветовая заливка, мг/м³). Изолиниями нанесены средние значения АДТ (см) для декабря, изолинии проведены через 5 см. Чёрными точками обозначены места, для которых проводился анализ внутригодового хода концентрации хлорофилла *a*. Расшифровки фронтов приведены в тексте

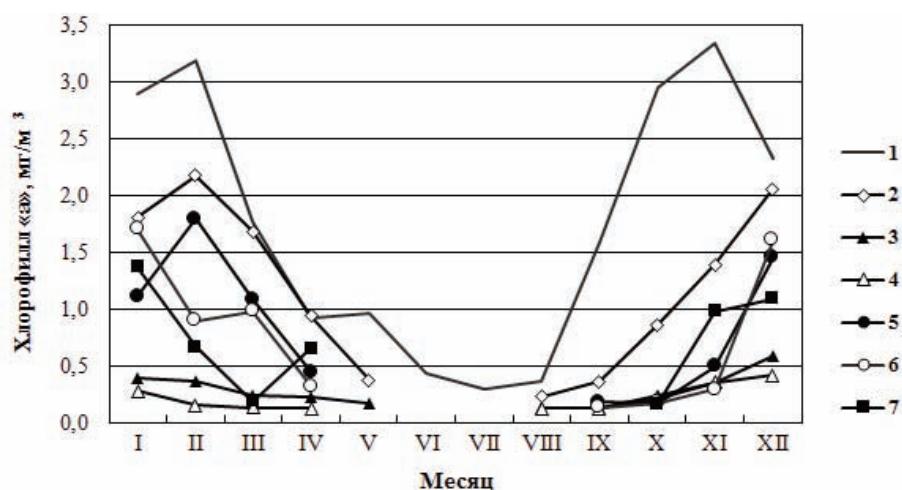


Рис. 2. Среднемноголетний (1997–2014 гг.) сезонный ход содержания хлорофилла *a* в поверхностном слое воды в реперных точках

Таблица. Оценка уровня трофности воды по концентрации хлорофилла *a* для спутниковых данных

Уровень трофности	Хлорофилл <i>a</i> , мг/м ³
Олиготрофный	<0,1
Мезотрофный	0,1–1
Эвтрофный	>1–8,5
Гипертрофный	>8,5

океанических районов, в т.ч. при анализе спутниковых данных по Южному океану [Биология моря, 1977 а, 1977 б; Antoine et al., 1996; Веденников и др., 2007; Демидов и др., 2007].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Субантарктическая поверхностная водная масса (САПВ) с юга ограничена Субантарктическим фронтом (САФ). Эти воды являются наиболее продуктивными в течение всего года в рассматриваемых районах. Установлено, что интенсивное развитие фитопланктона начинается в северо-западной части в сентябре, достигая наибольшего пространственного развития и максимальных значений ($3,3 \text{ мг/м}^3$) в ноябре (рис. 2). Эти значения соответствуют эвтрофному уровню. Минимальные значения отмечены с апреля по сентябрь и составляют $0,12 \text{ мг/м}^3$. Особенностью пространственного распределения хлорофилла *a* в рассматриваемом районе является нахождение области его повышенного содержания над Патагонским шельфом в пределах 20–45 см АДТ. Резкое снижение хлорофилла *a* до значений, близких к нулевым, отмечается в районе основной струи Фолклендского течения. Второй областью с повышенными значениями хлорофилла ($1,2 \text{ мг/м}^3$, эвтрофный уровень трофности) является район Аргентинской котловины на участке взаимодействия Фолклендского и Бразильского течений, где образуется вынос полей хлорофилла в открытый океан в восточном направлении. В районе пролива Дрейка наблюдаются пониженные мезотрофные значения хлорофилла *a* на протяжении всего года в пределах $0,2$ – $0,3 \text{ мг/м}^3$. Только в шельфовой зоне на глубинах более 150 м в период с сентября по март отмечаются более высокие значения хлорофилла *a*, в декабре в прибрежной зоне они могут

достигать 2 мг/м^3 . За пределами рассмотренных областей наблюдаются пониженные значения хлорофилла ($0,5 \text{ мг/м}^3$), тем не менее, относящиеся к мезотрофному уровню.

Область Южной полярной фронтальной зоны (ЮПФЗ) является районом максимального вихреобразования и наиболее высоких скоростей течения ($>50 \text{ см/с}$) в море Скотия. Однако по оценкам спутниковых данных здесь отмечены наиболее низкие поверхностные концентрации хлорофилла *a* среди всех рассматриваемых зон. Для декабряской нормы они не превышают $0,5 \text{ мг/м}^3$ в проливе Дрейка. Небольшая зона с повышенными концентрациями наблюдается в области выноса вод на северо-запад от о. Южная Георгия (до $0,9 \text{ мг/м}^3$). Вторая область с повышенными концентрациями (до $1,5 \text{ мг/м}^3$) отмечается в районе взаимодействия Фолклендского и Бразильского течений. В целом район распространения ЮПФЗ можно отнести к мезотрофному уровню продуктивности.

В северной части распространения Антарктической поверхностной водной массы (АПВ) между Полярным фронтом (ПФ) на севере и Южным фронтом Антарктического циркумполярного течения (ЮФАЦТ) на юге средние скорости течения, полученные по альтиметрическим данным, существенно меньше (17 см/с) чем в ЮПФЗ. Поверхностное содержание хлорофилла *a* в проливе Дрейка ниже, чем в области ЮПФЗ. Там находятся олиготрофные воды с концентрацией хлорофилла *a* в основном ниже $0,1 \text{ мг/м}^3$. Восточнее содержание хлорофилла постепенно повышается. Наибольшие концентрации характерны для участка, расположенного к северо-западу от о. Южная Георгия. Содержание хлорофилла *a* там сопоставимо со значениями на Патагонском шельфе и достигает $3,2 \text{ мг/м}^3$, что соответствует эвтрофному уровню. Далее на восток отмечается вынос богатых хлорофиллом *a* вод (с концентрацией до $1,3 \text{ мг/м}^3$) с потоками, связанными с ПФ и ЮФАЦТ. Важной особенностью является то, что наибольшие концентрации ограничены изолиниями 58,4 на севере и 102,5 см на юге в поле АДТ. За пределами этих уровней наблюдается резкое снижение хлорофилла *a*. Это может свидетельствовать о том, что данная область слабо пополняется за-

счёт выноса течениями из более южных районов и является особой акваторией продуцирования фитопланктона.

Район распространения АПВ между ЮФАЦТ и Южной границей АЦТ (ЮГАЦТ) некоторые авторы выделяют в особую Вторичную фронтальную зону (ВФЗ). Для данного района характерны наиболее низкие средние скорости течения (до 9 см/с) по данным спутниковой альtimетрии и умеренные значения содержания хлорофилла *a* в поверхностном слое. В приостровной области Южных Шетландских о-вов в среднем содержание хлорофилла *a* в декабре составляет 0,5–0,9 мг/м³, далее на восток значения понижаются до 0,5 мг/м³, что соответствует мезотрофному уровню. Севернее Южных Оркнейских о-вов повышенные концентрации хлорофилла наблюдаются в октябре–ноябре в пределах 1,0–1,3 мг/м³ на границе эвтрофного уровня. В декабре пятна с высоким содержанием фитопланктона смещаются на восток к Южным Сандвичевым о-вам. Повторное возникновение таких же повышенных значений севернее Южных Сандвичевых о-вов происходит в январе, но носит более слабо выраженный и краткосрочный характер. Район севернее Южных Сандвичевых о-вов четко вписывается в пределы 102,5 и 122,4 см АДТ и в течение всего года является мезотрофным с пониженными значениями концентрации хлорофилла до 0,7 мг/м³.

К югу от ЮГАЦТ располагаются смешанные воды морей Уэдделла и Скотия. В этой области также отмечаются наиболее низкие средние скорости течения (4 см/с) и наименее выраженное вихреобразование. В период с ноября по март эта зона характеризуется повышенными значениями хлорофилла *a* с эвтрофным уровнем. Максимального пространственного распространения области повышенных концентраций хлорофилла достигают в декабре после схода ледового покрова. В этот период наиболее высокие значения хлорофилла *a* наблюдаются в приостровных зонах Южных Сандвичевых (3,0 мг/м³), Южных Оркнейских о-вов (2,7 мг/м³) и на шельфе Антарктического п-ова (2,8 мг/м³). Последние очаги повышенной концентрации хлорофилла *a* (до 1,2 мг/м³) в районе северной части Южных Сандвичевых о-вов исчезают в мае.

Обсуждение

Современные представления о распределении хлорофилла указывают на то, что максимум содержания поверхностного хлорофилла в Субантарктике приходится на конец зимнего – начало весеннего периода [Демидов, 2010]. По нашим данным в этом районе развитие фитопланктонного сообщества, судя по динамике концентраций хлорофилла, начинается в сентябре, достигая наибольшего пространственного развития и максимальных значений (3,3 мг/м³) в ноябре. Характерной особенностью является наличие второго пика повышенных значений хлорофилла в феврале (3,1 мг/м³).

В большинстве рассматриваемых нами точек во всех субширотных зонах Антарктики наблюдаются два пика с максимальными концентрациями хлорофилла в сезонном ходе. Первый пик отмечается в декабре, второй — в феврале. Он может быть связан с уменьшением интенсивности потребления фитопланктона зоопланктоном. Особенно сильно второй пик выражен в районе о-ва Южная Георгия и Южных Сандвичевых о-вов.

Еще одним региональным фактором, приводящим к вспышке численности фитопланктона, является отступление ледяного покрова в летний период. В это время на спутниковых снимках хорошо видна полоса повышенной концентрации хлорофилла на границе ледяного поля. Таким образом, сезонные различия в динамике развития фитопланктона для каждой из субширотных зон зависят от географического расположения рассматриваемого района и его удаленности от прибрежно-приостровной зоны.

Изолинии абсолютной динамической топографии отражают положения фронтальных зон АЧА, которые, в свою очередь, являются границами различных водных масс. Именно сочетание их особенностей и лимитирующих факторов в каждой из выделенных субширотных зон формирует сезонную динамику развития фитопланктонного сообщества.

Особенно чётко на картах среднемесячных норм проявляется зависимость конфигурации пятен хлорофилла от границ изолиний АДТ. Так, в районе распространения субантарктической водной массы области повышенных содержаний хлорофилла *a* над Патагонским шельфом находятся в пределах 20–45 см АДТ.

В северной части распространения Антарктической поверхностной водной массы в районе о-ва Южная Георгия наибольшие концентрации ограничены изолиниями 58,4 на севере и 102,5 см на юге в поле АДГ, тогда как за пределами этих уровней наблюдается резкое снижение хлорофилла *a*. Район севернее Южных Сандвичевых о-вов чётко вписывается в пределы 102,5–122,4 см АДГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе анализа спутниковых данных по содержанию хлорофилла *a* в поверхностных водах за период 1997–2014 гг. были получены ежемесячные среднемноголетние нормы распределения хлорофилла *a* по субширотным зонам пролива Дрейка и моря Скотия. С учётом пространственного распределения были выделены области повышенной и пониженной концентрации хлорофилла *a*. В каждой из рассматриваемых зон были выделены точки, для которых выполнен анализ динамики среднегодового хода значений хлорофилла *a*. Установлено, что максимальное развитие хлорофилла *a* характерно для ноября в районе распространения субантарктической поверхностной водной массы и декабря для более южных районов моря Скотия со вторым пиком в феврале. Минимальные концентрации хлорофилла отмечаются в июле. В соответствии с международной классификацией были получены уровни трофности для каждой из субширотных зон моря Скотия на основе 17-летнего ряда данных. Созданный каталог среднемноголетних месячных норм и базы данных АДГ и хлорофилла *a* могут быть использованы для анализа и прогнозирования распределения концентраций хлорофилла *a*, а так же в качестве исходных данных для производственных моделей и моделей, касающихся распределения концентраций криля.

Участие Д.А. Чурина в анализе данных и подготовке статьи поддержано грантом РФФИ 15-005-01312.

ЛИТЕРАТУРА

- Александров С.В. 2009. Использование хлорофилла для расчёта первичной продукции в водах Канарского апвеллинга и Атлантической части Антарктики // Промыслово-биологические исследования Атлантического океана в 2006–2007 гг. Т. 2. Океанические районы. Калининград: Изд-во АтлантНИРО. С. 45–55.
- Белоненко Т.В., Захарчук Е.А., Колдунов А.В., Смирнов К.Г., Старицын Д.К., Тихонова Н.А., Фукс В.Р. 2010. Опыт использования спутниковой информации для оценки и прогноза биологической и промысловой продуктивности различных районов Мирового океана // Вопросы промысловой океанологии. Вып. 7. № 1. С. 206–226.
- Бородин Е.В., Чурин Д.А., Чернышков П.П. 2014. Влияние динамики вод на биомассу и распределение биологических ресурсов пелагиали южных частей Атлантического и Тихого океанов // Вестник БФУ (Естественные науки). № 7. С. 142–154.
- Веденников В.И., Гагарин В.И., Демидов А.Б., Буренков В.И., Стунджас П.А. 2007. Распределение первичной продукции и хлорофилла в субтропических и тропических водах Атлантического океана осенью 2002 г. // Океанология. Т. 47. № 3. С. 418–431.
- Виноградов М.Е. (отв. ред.). 1977 а. Биологическая структура океана // Океанология. Биология океана. Т. 1. М.: Наука. 237 с.
- Виноградов М.Е. (отв. ред.). 1977 б. Биологическая продуктивность океана // Океанология. Биология океана. Т. 2. М.: Наука. 400 с.
- Демидов А.Б., Веденников В.И., Шеберстов С.В. 2007. Пространственно-временная изменчивость хлорофилла *a* в атлантическом и индийском секторах Южного океана в феврале–апреле 2000 г. по спутниковым и экспедиционным данным // Океанология. Т. 47. № 4. С. 546–558.
- Демидов А.Б., Веденников В.И., Гагарин В.И., Буренков В.И. 2008. Продукционные характеристики фитопланктона в восточных районах Атлантики и Атлантическом секторе Южного океана в октябрь–ноябре 2004 г. // Океанология. Т. 48. № 3. С. 396–410.
- Демидов А.Б., Гагарин В.И., Григорьев А.В. 2010. Сезонная изменчивость хлорофилла *a* на поверхности в проливе Дрейка // Океанология. Т. 50. № 3. С. 355–370.
- Демидов А.Б., Мошаров С.А., Романова Н.Д. 2011. Пространственная изменчивость первичной продукции и хлорофилла *a* в проливе Дрейка в весенний сезон // Океанология. Т. 51. № 2. С. 293–306.
- Демидов А.Б., Мошаров С.А., Гагарин В.И. 2012 а. Продукционные характеристики фитопланктона в Южной Атлантике в Атлантическом секторе Южного океана летом 2009–2010 гг. // Океанология. Т. 52. № 2. С. 226–238.
- Демидов А.Б., Мошаров С.А., Гагарин В.И., Мошарова И.В. 2012 б. Вертикальная изменчивость первичной продукции и хлорофилла *a* в проливе Дрейка в

- весенний период (октябрь-ноябрь) // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 16. Биология. № 4. С. 28–32.
- Демидов А.Б., Машаров С.А., Гагарин В.И. 2012 в. Меридиональная асимметричность первичного про-дуктирования в Атлантическом секторе Южного океана весной и летом // Океанология. Т. 52. № 5. С. 675–687.
- Масленников В.В. 2003. Климатические колебания и морская экосистема Антарктики. М.: Изд-во ВНИРО. 295 с.
- Мордасова Н.В. 1987. Исследования хлорофилла в юго-западной части Атлантического океана // Комплексные рыбохозяйственные исследования ВНИРО в Мировом океане. М.: ВНИРО. С. 79–95.
- Мордасова Н.В. 1989. Распределение хлорофилла в водах Атлантического сектора Антарктики // Океанология. Т. 29. Вып. 2. С. 286–293.
- Мордасова Н.В. 1991. Исследование хлорофилла в ЮПФЗ Атлантического океана с использованием погружающегося флуориметра «Акватрак» // Электрона Карлсберга в южной ГПФЗ: биологические аспекты существования и распределения. М.: ВНИРО. Т. 2. С. 5–12.
- Мордасова Н.В. 2014. Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // Среда обитания водных биологических ресурсов. Труды ВНИРО. Т. 152. М.: Изд-во ВНИРО. С. 41–56.
- Скрипалева Е.А., Шугаев А.В. 2011. Сезонная и межгодовая изменчивость концентрации хлорофилла *a* в Южном океане по спутниковым данным // Сб. «Системы контроля окружающей среды». Севастополь: НПЦ ЭКОСИ-Гидрофизика. Т. 16. С. 102–111.
- Чернышков П.П., Бородин Е.В., Чурин Д.А. 2014. Научное обеспечение возобновления российского рыболовства в южных частях Атлантического и Тихого океанов в современных условиях // Рыбное х-во. № 5. С. 8–13.
- Чурин Д.А. 2017. Мезомасштабная динамика вод в Антарктической части Атлантики и её влияние на распределение криля. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Калининград, БФУ им. И. Канта. 23 с.
- Acker J.G. 1994. The Heritage of SeaWiFS: A Retrospective of the CZCS NIMBUS Experiment Team (NET) Program. NASA Center for AeroSpace Information: Linthicum Heights. MD. V. 21. 44 p.
- Antoine D., Andr J.-M., Morel A. 1996. Oceanic primary production 2. Estimation at global scale from satellite (coastal zone color scanner) chlorophyll // Global Biogeochem. Cycles. V. 10. № 1. P. 57–69.
- Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO). Accessible via: <http://www.aviso.oceanobs.com/en/>. 01.03.2017.
- Copernicus — Marine environment monitoring service. Accessible via: <http://marine.copernicus.eu/>. 01.03.2017.
- Holm-Hansen O., Kahru M., Hewes C.D., Kawaguchi S., Kameda T., Sushin V.A., Krasovski I., Priddle J., Korb R., Hewitt R.P., Mitchell B.G. 2004. Temporal and spatial distribution of chlorophyll-a in surface waters of the Scotia Sea as determined by both shipboard measurements and satellite data // Deep-Sea Res. II. V. 51. P. 1323–1331.
- Strass V.H., Naveira Carabato A.C., Pollard R.T., Fisher H.I., Hense I., Allen J.T., Read J.F., Leach H., Smetacek V. 2002. Mesoscale frontal dynamics: shaping the environment of primary production in the Antarctic Circumpolar Current // Deep-Sea Res. II. V. 49. № 18. P. 3735–3769.
- REFERENCES**
- Aleksandrov S.V. 2009. Ispol'zovanie hlorofilla dlya rascheta pervichnoj produktsii v vodah Kanarskogo apvellinga i Atlanticheskoy chasti Antarktiki [Use of a chlorophyll for calculation of primary production in waters of the Canary upwelling and Atlantic part Antarctic] // Promyslovo-biologicheskie issledovaniya AtlantNIRO v 2006–2007 godah. T. 2: Okeanicheskie rajony. Kaliningrad: Izd-vo AtlantNIRO. S. 45–55.
- Belonenko T.V., Zaharchuk E.A., Koldunov A.V., Smirnov K.G., Staricyn D.K., Tihonova N.A., Fuks V.R. 2010. Opyt ispol'zovaniya sputnikovoj informacii dlya ocenki i prognoza biologicheskoy i promyslovoj produktivnosti razlichnyh rajonov Mirovogo okeana [Experience of use of satellite information for an assessment and the forecast of biological and trade efficiency of various regions of the World Ocean] // Voprosy promyslovoj okeanologii. Vyp. 7. № 1. S. 206–226.
- Borodin E.V., Churin D.A., Chernyshkov P.P. 2014. Vliyanie dinamiki vod na biomassu i raspredelenie biologicheskikh resursov pelagialy yuzhnyh chastej Atlanticheskogo i Tihogo okeanov [Influence of dynamics of waters on biomass and distribution of biological resources of a pelagiala of the southern parts Atlantic and Silent Oceans] // Vestnik BFU (Estestvennye nauki). № 7. S. 142–154.
- Vedernikov V.I., Gagarin V.I., Demidov A.B., Burenkov V.I., Stunzhas P.A. 2007. Raspredelenie pervichnoj produktsii i hlorofilla v subtropicheskikh i tropicheskikh vodah Atlanticheskogo okeana osen'yu 2002 g. [Primary Production and Chlorophyll in Subtropical and Tropical Waters of the Atlantic Ocean in Autumn of 2002] // Okeanologiya. Т. 47. № 3. С. 418–431.
- Vinogradov M.E. (otv. red.). 1977 a. Biologicheskaya struktura okeana [Biological structure ocean] // Okeanologiya. Biologiya okeana. Т. 1. М.: Nauka. 237 s.
- Vinogradov M.E. (otv. red.). 1977 б. Biologicheskaya produktivnost' okeana [Biological productivity of the ocean] // Okeanologiya. Biologiya okeana. Т. 2. М.: Nauka. 400 s.

- Demidov A.B., Vedernikov V.I., Sheberstov S.V. 2007. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' hlorofilla *a* v atlanticheskem i indijskom sektorah Yuzhnogo okeana v fevrale-aprele 2000 g. po sputnikovym i ehkspedicionnym dannym [Spatial and Temporal Distribution of Chlorophyll «*a*» in the Atlantic and Indian Sectors of the Southern Ocean from February to April 2000 as Determined by Both Shipboard Measurements and Satellite Data] // Okeanologiya. T. 47. № 4. S. 546–558.
- Demidov A.B., Vedernikov V.I., Gagarin V.I., Burenkov V.I. 2008. Produktionnye harakteristiki fitoplanktona v vostochnykh rajonakh Atlantiki i Atlanticheskem sektore Yuzhnogo okeana v oktyabre-noyabre 2004 g. [Phytoplankton Production Features in the Eastern Atlantic Regions and Atlantic Sector of the Southern Ocean in October–November 2004] // Okeanologiya. T. 48. № 3. S. 396–410.
- Demidov A.B., Gagarin V.I., Grigor'ev A.V. 2010. Sezon-naya izmenchivost' hlorofilla «*a*» na poverhnosti v prolive Drejka [Seasonal Variability of Surface Chlorophyll «*a*» in the Drake Passage] // Okeanologiya. T. 50. № 3. S. 355–370.
- Demidov A.B., Mosharov S.A., Romanova N.D. 2011. Prostranstvennaya izmenchivost' pervichnoj produkci i hlorofilla «*a*» v prolive Drejka v vesennij sezona [Spatial Variability of Primary Production and Chlorophyll «*a*» in the Drake Passage in Austral Spring] // Okeanologiya. T. 51. № 2. S. 293–306.
- Demidov A.B., Mosharov S.A., Gagarin V.I. 2012 a. Producionnye harakteristiki fitoplanktona v Yuzhnoj Atlantike v Atlanticheskem sektore Yuzhnogo okeana letom 2009–2010 gg. [Phytoplankton Production Characteristics in the Southern Atlantic and Atlantic Sector of the Southern Ocean in Austral Summer 2009–2010] // Okeanologiya. T. 52. № 2. S. 226–238.
- Demidov A.B., Mosharov S.A., Gagarin V.I., Mosharova I.V. 2012 b. Vertikal'naya izmenchivost' pervichnoj produkci i hlorofilla *a* v prolive Drejka v vesennij period (oktyabr'-noyabr') [Vertical variability of primary production and chlorophyll *a* in the Drake Passage in Austral spring (October–November)] // Vestn. Mosk.un-t. Ser. 16. Biologiya. № 4. S. 28–32.
- Demidov A.B., Mosharov S.A., Gagarin V.I. 2012 v. Meridional'naya asimmetrichnost' pervichnogo producirovaniya v Atlanticheskem sektore Yuzhnogo okeana vesnoj i letom [Meridional Asymmetric Distribution of Primary Productivity in the Atlantic Sector of the Southern Ocean in Austral Spring and Summer] // Okeanologiya. T. 52. № 5. S. 675–687.
- Maslenikov V.V. 2003. Klimaticheskie kolebaniya i morskaya ehkosistema Antarktiki [Climatic fluctuations and marine ecosystem Antarctic]. M.: Izd-vo VNIRO. 295 s.
- Mordasova N.V. 1987. Issledovaniya hlorofilla v yugo-zapadnoj chasti Atlanticheskogo okeana [Chlorophyll researches in a southwest part of the Atlantic Ocean] // Kompleksnye rybohozyajstvennye issledovaniya VNIRO v Mirovom okeane. M.: VNIRO. S. 79–95.
- Mordasova N.V. 1989. Raspredelenie hlorofilla v vodah Atlanticheskogo sektora Antarktiki [Distribution of a chlorophyll in waters of the Atlantic sector of Antarctic] // Okeanologiya. T. 29. Vyp. 2. S. 286–293.
- Mordasova N.V. 1991. Issledovanie hlorofilla v YUPFZ Atlanticheskogo okeana s ispol'zovaniem pogruzhaemogo fluorimetra «Akvatraka» [A chlorophyll research in YuPFZ of the Atlantic Ocean with use of the immersed Akvatraka] // Ehlektrona Karlsberga v yuzhnoj PFZ: biologicheskie aspekty sushchestvovaniya i raspredeleniya. M.: VNIRO. T. 2. S. 5–12.
- Mordasova N.V. 2014. Kosvennaya ocenka produktivnosti vod po soderzhaniju hlorofilla [Indirect Estimation of Water Productivity by the Chlorophyll Content] // Sreda obitaniya vodnyh biologicheskikh resursov. Trudy VNIRO. T. 152. M.: Izd-vo VNIRO. S. 41–56.
- Skripaleva E.A., Shugaev A.V. 2011. Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' koncentracii hlorofilla *a* v Yuzhnom okeane po sputnikovym dannym [Seasonal and interannual variability of concentration of a chlorophyll «*a*» in the Southern ocean according to satellite data] // Cb. Sistemy kontrolya okruzhayushchej sredy. Sevastopol': NPC EHKOSI-Gidrofizika. T. 16. S. 102–111.
- Chernyshkov P.P., Borodin E.V., Churin D.A. 2014. Nauchnoe obespechenie vozobnovleniya rossijskogo rybolovstva v yuzhnyh chastyah Atlanticheskogo i Tihogo okeanov v sovremennyh usloviyah [Scientific substantiation for resumption of Russian fishing in the Antarctic waters of the Atlantic Ocean and South Pacific] // Rybnoe h-vo, № 5. S. 8–13.
- Churin D.A. 2017. Mezomasshtabnaya dinamika vod v Antarkticheskoy chasti Atlantiki i ee vliyanie na raspredelenie krilya [Mesoscale dynamics of waters in the Antarctic part of Atlantic and its influence on distribution of a krill]. Avtoref. diss. ... kand. geogr. nauk. Kaliningrad: BFU im. I. Kanta. 23 s.

Поступила в редакцию 11.08.2017 г.
Принята после рецензии 22.11.2017 г.

Aspects of dynamics of chlorophyll-a in relation to the absolute dynamic topography of the Antarctic part of the Atlantic

D.A. Churin^{1, 2}, S.Yu. Gulyugin¹

¹Atlantic Fisheries Research Institute (FSBSI «AtlantNIRO»), Kaliningrad

²P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS (FSBIS «SIO RAS»), Moscow

Monthly average annual norms of chlorophyll-a distribution at the sublatitudinal zones of the Drake Passage and the Scotia Sea were obtained on the basis of the satellite data analysis on the content of chlorophyll-a in surface waters during the period 1997–2014. Correlation between seasonal dynamics of chlorophyll-a and the heights of the absolute dynamic topography (ADT) was analyzed. Taking into account the spatial distribution, the regions of high and low concentration of chlorophyll-a were allocated. It is determined that the areas with an increased concentration of chlorophyll-a are limited the boundaries of ADT isolines. In each of these areas the points for analysis of the dynamics of chlorophyll-a average speed values were marked. It is established that the maximum development of chlorophyll-a occurs in November in the area of distribution of the subantarctic surface water mass, and in December it occurs in the southern part of the Scotia sea with its second peak in February. The minimum concentration of chlorophyll-a is observed in July. In accordance with international classification, trophic levels of sublatitudinal zones of the Scotia Sea based on the 17-year data series were obtained.

Keywords: chlorophyll-a, remote sensing of the Earth, satellite altimetry, trophic classifications, Southern Ocean.