

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

УДК 551.46.07:629.783 (269)

Сезонность вертикального распределения хлорофилла  
*a* в субширотных зонах Антарктической части Атлантики  
по данным прямых и дистанционных наблюдений

Д.А. Чурин<sup>1,2</sup>, С.Ю. Гулюгин<sup>1</sup>

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

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

E-mail: sergulyugin@atlantniro.ru

В статье рассматриваются результаты анализа 469 профилей хлорофилла *a*, полученные с профилирующих буёв международного проекта Biogeochemical-Argo с 7 мая 2015 г. по 14 мая 2018 г. в районе пролива Дрейка и открытой части моря Скотия между 53–65° ю. ш., 40–70° з. д. Профили приводились к стандартным горизонтам. Отмечено, что за рассматриваемый период стало возможным проследить динамику сезонных изменений концентрации хлорофилла *a* в четырёх субширотных зонах. В рассматриваемом районе наибольшего развития фитопланктон достигал в декабре, во Вторичной фронтальной зоне (ВФЗ) максимальные значения достигали 4,11 мг/м<sup>3</sup>, наиболее низкая концентрация хлорофилла наблюдалась в августе, тогда как наименьшие значения максимума также наблюдались ВФЗ и составляли 0,16 мг/м<sup>3</sup>. По характеру изменчивости профилей хлорофилла выделено сходство между зоной субантарктической поверхностной водной массы (САПВ) и Южной полярной фронтальной зоной (ЮПФЗ) и между Антарктической зоной (АЗ) и ВФЗ. В зонах САПВ и ЮПФЗ диапазон значений хлорофильного максимума в течение года был меньше (0,22–3,45 мг/м<sup>3</sup>), чем в южных районах, второй пик приходился на май. АЗ и ВФЗ имели схожие ярко выраженные сезонные отличия, значения содержания хлорофилла в зоне максимума колебались в пределах 0,09–8,02 мг/м<sup>3</sup>, второй пик наблюдался в феврале. Поверхностные максимумы наблюдались в 33,9% случаев, в основном в зимний период в зоне САПВ. Разница между поверхностными значениями и значениями в слое максимума в зимний период для всех зон составляла лишь 5–12%, в летний — в ЮПФЗ и АЗ доходила до 48%. Наблюдался тренд к уменьшению средней глубины максимума с февраля (37 м) к октябрю (15,5 м).

**Ключевые слова:** хлорофилл *a*, вертикальная структура, дрейфующие буи, BIO ARGO, сезонная изменчивость, Южный океан.

#### ВВЕДЕНИЕ

В последнее время вновь возник интерес к рыбохозяйственным исследованиям в традиционных районах отечественного промысла в Антарктической части Атлантики (АЧА).

Одним из базовых условий для прогнозирования промысла криля в этом районе является сбор данных по функционированию планктонных сообществ. Детализированные высокочастотные наблюдения вертикального профиля

биомассы фитопланктона в течение всего года до недавнего времени отсутствовали. Контактные данные, собираемые с борта судна, ограничиваются сроком экспедиций, как правило, достаточно коротким, тогда как развитие фитопланктона очень неоднородно в пространстве и длительно по времени. Спутниковое дистанционное наблюдение цвета воды в океане позволяет собирать значительный объём информации с огромной площади, но измеряет только концентрацию поверхностного фитопланктона. Нужно отметить, что при этом могут создаваться неполные карты из-за частого наличия облачного покрова, что особенно характерно для южных антарктических районов. Ещё одной проблемой при оценке концентраций хлорофилла является существование подповерхностных максимумов, что приводит к недооценке биомассы на основе расчётов по спутниковой информации [Comiso et al., 1993; Демидов и др., 2007, 2008, 2012б; Мордасова, 2014]. В связи с этим одним из самых удачных решений последних лет стала установка биооптических датчиков на свободноплавающие профилирующие буи проекта Biogeochemical-Argo (BGC-Argo), которые позволяют круглогодично собирать и дистанционно передавать океанологические данные.

Целью данной работы является выявление особенностей сезонной динамики вертикального распределения хлорофилла *a* в каждой из выделенных субширотных зон в районе пролива Дрейка и в открытой части моря Скотия на основании анализа наблюдений, полученных с буёв Argo за период 2015–2018 гг.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Основой для исследования послужили данные по вертикальному распределению хлорофилла *a*, полученные буями проекта Argo с 7 мая 2015 г. по 14 мая 2018 г. [Copernicus ..., 2018] (рис. 1). Всего проанализировано 469 профилей, полученных с 13 буёв (табл. 1). Периодичность получения данных с каждого буя составляла от 1 до 10 дней. При обработке данных профили были приведены к стандартным горизонтам.

Анализ проводился по ранее выделенным субширотным зонам моря Скотия, совпадающим для этого района с межфронтальными зонами [Бородин и др., 2014; Чурин и др., 2014; Чурин, 2017]. Район исследования был взят в границах 53–65° ю. ш., 40–70° з. д. Он в достаточной степени обеспечен длительными временными рядами, является важным для понимания процессов, происходящих в планктонных сообществах в зонах интенсивных переносов (рис. 1).

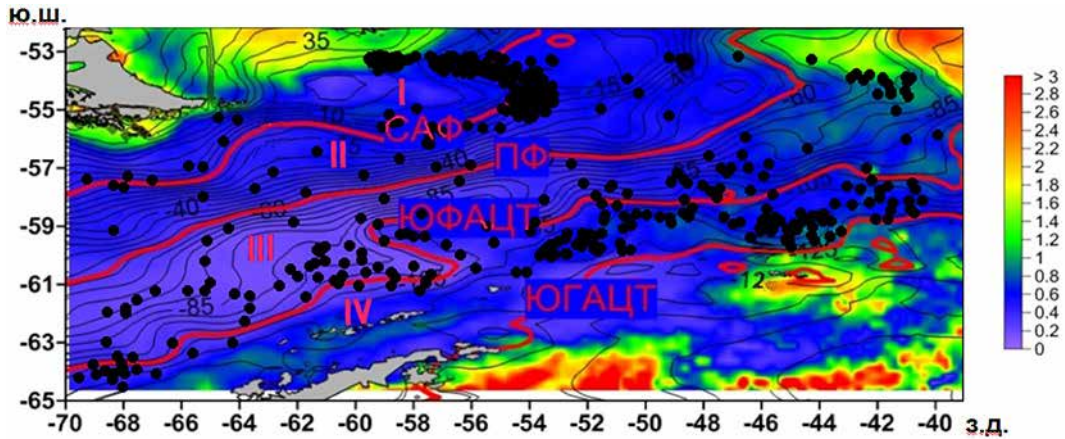
Обработка данных производилась стандартными статистическими методами.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

На большей части рассматриваемого района, охватывающего воды пролива Дрейка и открытой части моря Скотия, в течение всего года преобладают низкие концентрации хлорофилла *a* олиготрофного и мезотрофного типа (по спутниковым данным менее 0,5 мг/м<sup>3</sup>). Узкие участки с повышенной продуктивностью (по спутниковым данным до 2 мг/м<sup>3</sup>)

**Таблица 1.** Помесячное распределение станций в исследуемом районе за 2015–2018 гг. (шт.)

Зоны	Месяцы												Всего станций
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	
I (САПВ)	4	5	3	-	3	31	36	31	5	2	1	2	123
II (ЮПФЗ)	5	4	2	7	51	22	2	2	3	1	4	5	108
III (АЗ)	10	12	13	10	7	5	6	5	5	10	7	7	97
IV (ВФЗ)	18	14	15	14	14	9	12	7	5	15	8	10	141
Весь район	37	35	33	31	75	67	56	45	18	28	20	24	469



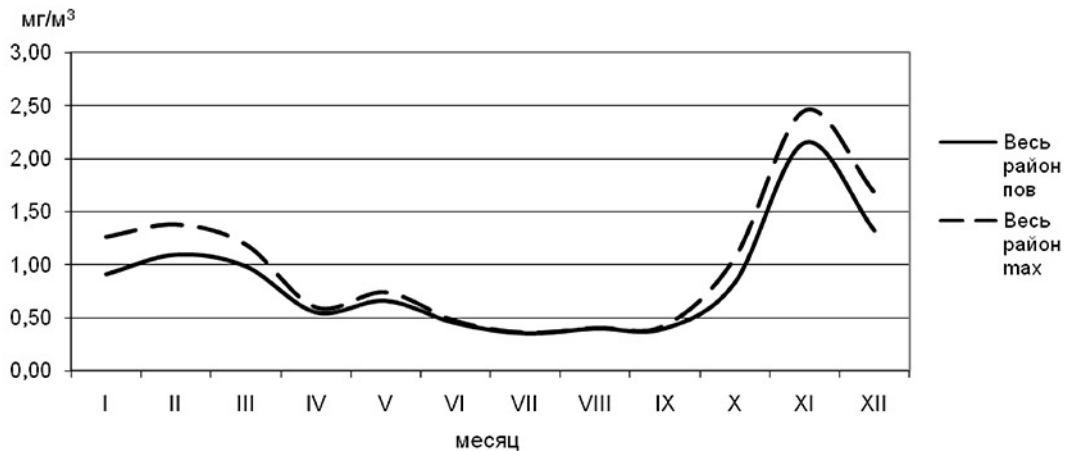
**Рис. 1.** Положение станций вертикального распределения хлорофилла *a* (чёрные точки). Цветной заливкой показана месячная норма распределения хлорофилла *a* на поверхности моря в декабре ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ), чёрными линиями отображены изолинии абсолютной динамической топографии (АДТ) [Чурин, Гулюгин, 2017]. Красными линиями показаны границы фронтов. Расшифровки фронтов приведены в тексте

сосредоточены вдоль шельфов Южной Америки и Антарктического полуострова [Чурин, Гулюгин, 2017]. Станции буёв Argo находились в четырёх из пяти выделенных здесь субширотных зон. Так как южнее Южной границы Антарктического циркумполярного течения (ЮГАЦТ) станции отсутствовали, то в данном исследовании эта зона не рассматривается.

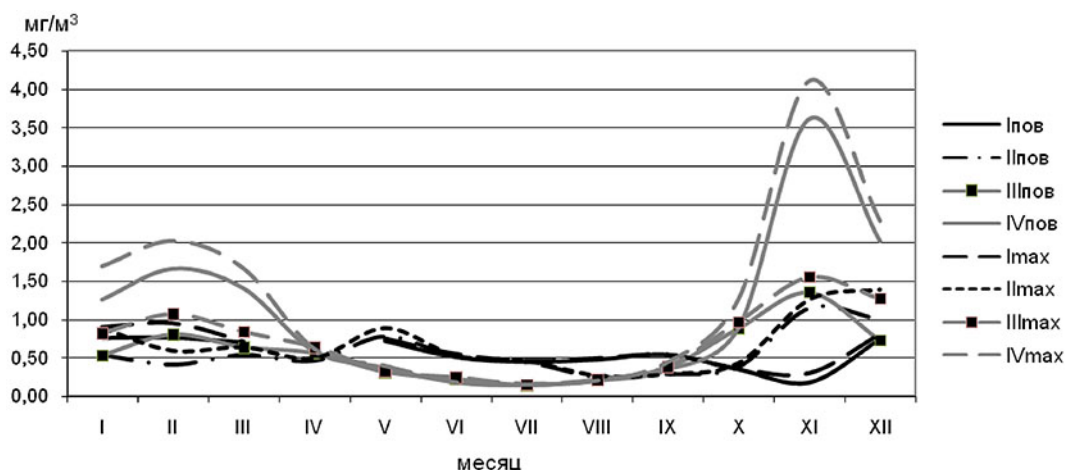
На обобщённых среднемесячных данных по поверхностным и максимальным значениям очень хорошо видна динамика развития планктонных сообществ этого региона (рис. 2). Несмотря на общие процессы, характерные для всего региона, в каждой из субширотных зон они имеют свои нюансы.

На графике среднемесячных поверхностных и максимальных значений хорошо выделяются две группы кривых (рис. 3). К первой группе относятся значения, полученные в I и II зонах. Эта группа характеризуется более плавным ходом каждой кривой в течение года и в период с января по октябрь не имеет значений, превышающих  $1 \text{ мг}/\text{м}^3$ . Вторая группа состоит из значений, полученных в III и IV зонах. Кривые этой группы показывают чётко выраженную сезонность и отличаются только величиной амплитуды в вегетативный период.

К первой зоне относятся воды субантарктической поверхностной водной массы (САПВ), которая с юга ограничивается Субантарктическим фронтом (САФ). Основ-



**Рис. 2.** Среднемесячные значения хлорофилла *a* на поверхности (сплошная линия) и максимума (прерывистая линия) по всему району



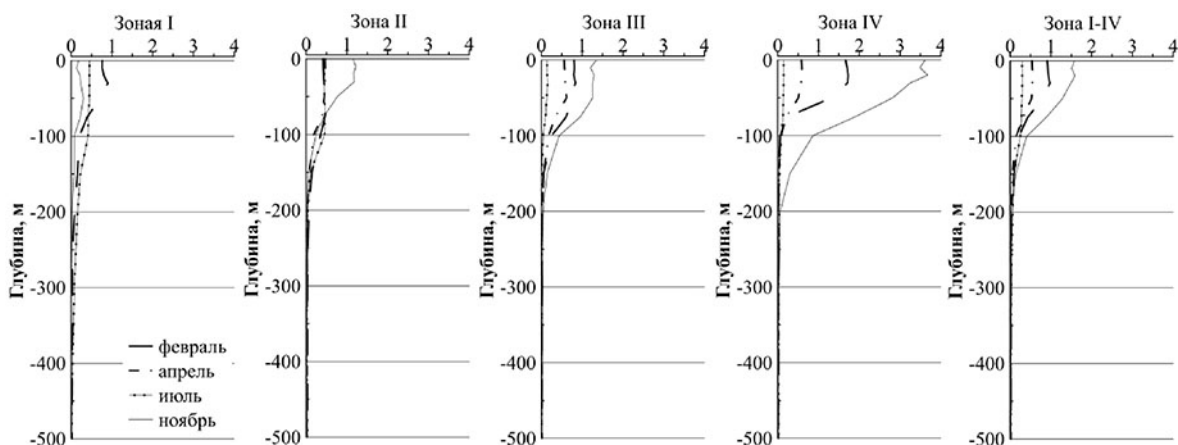
**Рис. 3.** Среднемесячные значения хлорофилла *a* на поверхности (сплошная линия) и максимума (прерывистая линия) по субширотным зонам

ные продуктивные районы лежат севернее рассматриваемой акватории в местах захода вод Фолклендского течения на южноамериканский шельф, так что станции в рассматриваемой части зоны в основном находились в низкопродуктивных мезотрофных водах, что и отразилось на полученных характеристиках (рис. 3–7, табл. 2). Данные за январь и частично февраль получены из района 55,3–57,4° ю. ш., 64–69° з. д., за все остальные месяцы, включая февраль, — из района 53,2–55,7° ю. ш., 53,7–60,0° з. д.

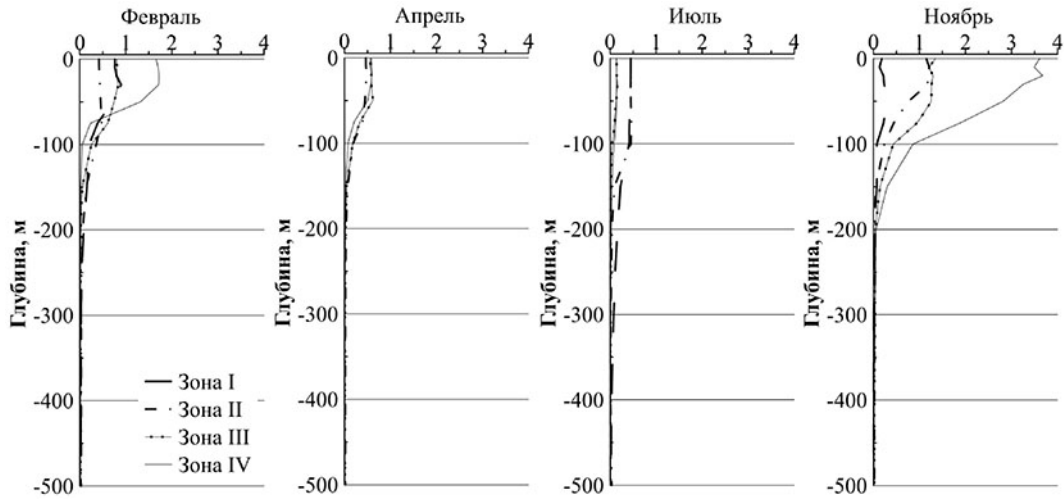
Как показывает помесечное распределение станций, в первой зоне наиболее хорошо обеспечен данными был зимний период (табл. 1). С мая по август почти все значения концентрации хлорофилла *a* как на поверхности, так

и в слое максимума находились в диапазоне от 0,2 до 1 мг/м<sup>3</sup> (см. рис. 3–5). Средний показатель на поверхности составлял 0,54 мг/м<sup>3</sup>, в слое максимума — 0,56 мг/м<sup>3</sup> (см. рис. 2). В связи с тем, что большинство максимумов были либо поверхностными (в 52–69% случаев), либо имели значения, близкие к поверхностным, то разница между поверхностными и максимальными значениями составляла не более 2–5% (табл. 2, см. рис. 6–7).

В отличие от тенденции в других районах, в первой зоне на участке 53–54° ю. ш., 55–58° з. д. в начале вегетативного сезона в октябре-ноябре среднемесячные значения хлорофилла *a* в слое максимума показывали снижение до 0,30–0,36 мг/м<sup>3</sup>, в поверхностном слое — до 0,18–0,35 мг/м<sup>3</sup>



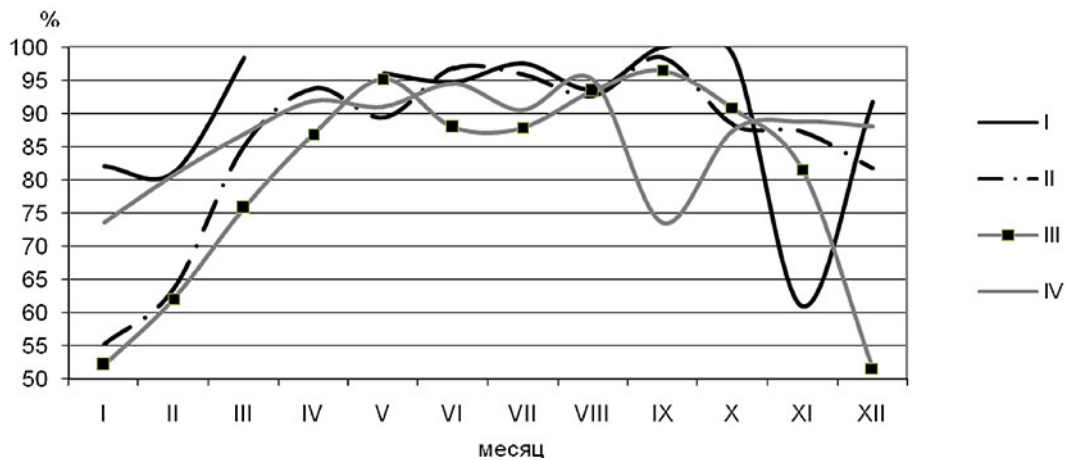
**Рис. 4.** Динамика профилей хлорофилла *a* по зонам. Значения усреднены за месяц по стандартным горизонтам (мг/м<sup>3</sup>)



**Рис. 5.** Динамика профилей хлорофилла *a* по месяцам. Значения усреднены за месяц по стандартным горизонтам ( $\text{мг}/\text{м}^3$ )

**Таблица 2.** Количество станций с поверхностным максимумом хлорофилла *a* (в %).  
За 100% принято количество станций в зоне в определённом месяце

Зона	Месяц												Весь год
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	
I	0,0	20,0	66,7	-	33,3	51,6	66,7	61,3	100,0	0,0	0,0	50,0	<b>56,1</b>
II	0,0	0,0	0,0	0,0	39,2	54,5	0,0	0,0	33,3	0,0	25,0	20,0	<b>32,4</b>
III	10,0	16,7	23,1	10,0	28,6	0,0	0,0	40,0	20,0	20,0	14,3	14,3	<b>16,5</b>
IV	22,2	42,9	33,3	21,4	7,1	33,3	16,7	14,3	0,0	60,0	25,0	30,0	<b>27,7</b>
<b>I–IV</b>	<b>13,5</b>	<b>25,7</b>	<b>30,3</b>	<b>12,9</b>	<b>32,0</b>	<b>46,3</b>	<b>46,4</b>	<b>48,9</b>	<b>38,9</b>	<b>39,3</b>	<b>20,0</b>	<b>25,0</b>	<b>33,9</b>



**Рис. 6.** Соотношение поверхностных и максимальных значений хлорофилла *a* (в % от максимума)

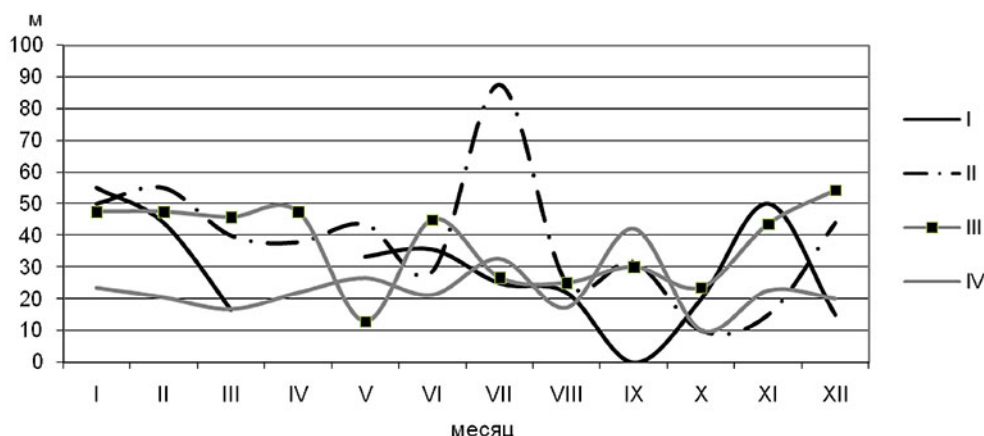


Рис. 7. Осреднённые за месяц глубины залегания максимума по субширотным зонам

(см. рис. 3–5). Вероятнее всего это связано с малым количеством станций и не является показательным (табл. 1). В декабре-феврале в поверхностном слое значения возрастают до  $0,74\text{--}0,76\text{ мг/м}^3$ , в слое максимума — до  $0,80\text{--}0,95\text{ мг/м}^3$ . В летний период максимумы наблюдались на разных стандартных горизонтах от поверхности до 50 м (см. рис. 4–6). Разница между поверхностными значениями и максимумами составляла в среднем 7% (см. рис. 6).

**Вторая зона.** Область Южной полярной фронтальной зоны (ЮПФЗ) характеризуется максимальным вихреобразованием и наиболее высокими скоростями течений ( $> 50\text{ см/с}$ ) в море Скотия. Согласно спутниковым значениям месячной нормы эта зона относится к водам мезотрофного типа, при этом наблюдается постепенное увеличение значений хлорофилла *a* в восточном направлении до  $1\text{ мг/м}^3$  [Чурин, Гулюгин, 2017].

По данным профилирующих буёв в зимние месяцы поверхностное и максимальное содержание хлорофилла *a* находилось в пределах  $0,2\text{--}0,7\text{ мг/м}^3$ , за исключением майских значений, когда они могли достигать  $1,4\text{ мг/м}^3$ . Средние поверхностные значения в этот период составляли  $0,49\text{ мг/м}^3$ , средние максимальные —  $0,53\text{ мг/м}^3$  (рис. 3). Самые низкие значения средних поверхностных и максимальных концентраций приходятся на август ( $0,26$  и  $0,27\text{ мг/м}^3$ , соответственно). Поверхностные максимумы встречались только в мае-июне и частота их встречаемости была 39,2% и 54,5%, соответственно (табл. 2). В другое

время максимумы наблюдались в слое от 20 до 100 м, средняя глубина залегания максимума —  $44,5\text{ м}$  (рис. 4–5, 7). Разница между поверхностными и максимальными значениями в среднем составляла 6% (рис. 6).

По данным буйковых станций начало весеннего цветения во II зоне приходится на октябрь и достигает пиковых значений в декабре (рис. 3). Максимальные и поверхностные значения в декабре имеют размах  $0,57\text{--}3,45$  и  $0,43\text{--}1,85\text{ мг/м}^3$ , соответственно, а средние их показатели —  $1,4$  и  $1,0\text{ мг/м}^3$ . Максимумы в поверхностном слое наблюдались в 20% случаев (табл. 2). В январе-феврале максимумы наблюдались только в слое 20–75 м (рис. 4–5). Средняя глубина залегания максимума увеличивалась с 10 м в октябре до 55 м в феврале (рис. 7). Разница между поверхностными и максимальными значениями увеличивалась с 9% в октябре и достигала максимального расхождения в 45% в январе, постепенно уменьшаясь до 5% в мае (рис. 6).

I и II зонах в мае наблюдался осенний пик, средние значения на поверхности достигали  $0,72$  и  $0,78\text{ мг/м}^3$ , в слое максимума —  $0,75$  и  $0,89\text{ мг/м}^3$ , соответственно.

**Третья (Антарктическая) зона** содержит воды Антарктической поверхностной водной массы (АПВ) и располагается между Полярным фронтом (ПФ) на севере и Южным фронтом Антарктического циркумполярного течения (ЮФАЦТ) на юге. Средние скорости течения здесь существенно меньше (до  $17\text{ см/с}$ ), чем во второй зоне. Согласно спутниковым данным среднемесячное значение



концентрации хлорофилла *a* показывает ту же тенденцию, что и во второй зоне, — увеличение в восточном направлении от олиготрофных показателей ( $< 0,1 \text{ мг/м}^3$ ) в проливе Дрейка до эвтрофных ( $1,3 \text{ мг/м}^3$ ) в неритической зоне о. Южная Георгия [Чурин, Гулюгин, 2017].

Станции в III зоне в течение годового цикла имели более-менее равномерное распределение по всей акватории (рис. 1). Скорее всего, именно это отличие от предыдущих двух зон способствовало лучшему представлению сезонной динамики (рис. 3). В зимний период самые низкие значения концентрации хлорофилла *a* приходились на июль и составляли  $0,14 \text{ мг/м}^3$  для поверхностных значений и  $0,16 \text{ мг/м}^3$  для максимальных значений. В целом, размах значений хлорофилла *a* в зимний период составлял  $0,1–0,5 \text{ мг/м}^3$  для максимума и  $0,08–0,5 \text{ мг/м}^3$  для поверхности. Глубина залегания максимума имела большой разброс от поверхности до 75 м, в июле-августе все максимумы были глубже 20 м (рис. 7). Частота встречаемости поверхностного максимума составляла от 0 до 40% за месяц (табл. 2). Тем не менее, в этот период наблюдались профили с большой глубиной развития и более-менее одинаковыми значениями, не превышающими  $0,5 \text{ мг/м}^3$  (рис. 4–5). Отличия поверхностных и максимальных значений в зимний период находились в пределах 5–12% (рис. 6).

Уже в августе начался рост значений хлорофилла *a*, который достиг своего максимального пика в ноябре. Во время пика средние значения на поверхности составляли  $1,35 \text{ мг/м}^3$  (размах  $0,41–2,50 \text{ мг/м}^3$ ), в зоне максимума —  $1,55 \text{ мг/м}^3$  (размах значений  $0,89–2,50 \text{ мг/м}^3$ ). Поверхностный максимум наблюдался только в 14,3% случаев (табл. 2). Преобладающая часть значений максимума (43%) находилась на стандартной глубине 75 м, среднее значение глубины залегания максимума составляло 43,6 м. Отличия между поверхностными и максимальными значениями составляли уже 18%. Наибольшая разница между значениями на поверхности и в слое максимума наблюдалась в декабре-январе и составляла 48%. Обнаруженные подповерхностные максимумы в это время находились преимущественно на глубинах 50–75 м, а поверхностные фактически отсутствовали.

В соответствии с опережением темпа роста численности фитопланктона над его выеданием зоопланктоном в феврале наблюдался второй пик. Он был почти в два раза ниже ноябрьского ( $0,8 \text{ мг/м}^3$  на поверхности и  $1,07 \text{ мг/м}^3$  в зоне максимальных значений).

**Четвертая (Вторичная фронтальная) зона** также содержит воды АПВ и располагается между ЮФАЦТ и ЮГАЦТ. Для данной зоны характерны наиболее низкие скорости течения (до 9 см/с). По спутниковым данным значения месячной нормы хлорофилла *a* соответствуют мезотрофному уровню в пределах  $0,5–1 \text{ мг/м}^3$ . При этом повышенные значения располагаются вблизи неритических зон Южных Шетландских и Южных Оркнейских о-вов [Чурин, Гулюгин, 2017].

Согласно данным буйковых станций Argo кривая значений хлорофилла *a* повторяет кривую III зоны, но амплитуды значений в вегетативный период носят более выраженный характер (рис. 3). В зимний период средние поверхностные ( $0,14–0,37 \text{ мг/м}^3$ ) и максимальные ( $0,16–0,40 \text{ мг/м}^3$ ) значения хлорофилла *a* не сильно отличаются от значений в III зоне ( $0,14–0,31$  и  $0,16–0,33 \text{ мг/м}^3$ ). В это время наблюдается широкое разнообразие глубин залегания хлорофилльного максимума, но поверхностные максимумы встретились только в 7,1–33,3% случаев. Форма и значения профиля почти совпадают с данными III зоны (рис. 4–5). Разница между поверхностными и максимальными значениями составляла 5–10% (рис. 6).

В период максимального цветения в ноябре в IV зоне наблюдались самые большие средние значения пика хлорофилла *a* ( $4,11 (1,28–7,03) \text{ мг/м}^3$  для слоя максимума и  $3,61 (1,28–6,78) \text{ мг/м}^3$  для поверхностных значений) (рис. 3). Глубина залегания максимума в вегетативный период могла быть самой разнообразной, средние значения лежали в пределах 10–20 м (рис. 4–5, 7). Поверхностные максимумы в декабре наблюдались только в 25% случаев (табл. 2). Разница между поверхностными значениями и максимумом хлорофилла *a* в ноябре-декабре в среднем составляла 11–12%. Наиболее сильные различия между средними поверхностными значениями и средними максимумами наблюдались в январе и сентябре и составили 24% (рис. 6).

### Обсуждение

Как уже давно выявлено, характер вертикального распределения фитопланктона обуславливается, в первую очередь, сезонной изменчивостью поступающей солнечной радиации [Воронина, 1977]. Изменение длительности светового периода, прогрев или охлаждение вод запускают процессы перемешивания слоёв, образования или таяния льда, в свою очередь формирующие стратификацию воды за счёт изменения её плотности. Все эти сезонные изменения, происходящие в рассматриваемом районе, хорошо отражены в годовой динамике кривых хлорофилльных профилей (рис. 4–5). Начиная с апреля толщина трофогенного слоя постепенно увеличивается во время зимней конвекции, достигая максимальных глубин (до 150 м) в августе. В этот период основным лимитирующим фактором является свет. Считается, что в зимний период значения содержания хлорофилла по всей толще за счёт перемешивания носят более-менее однородный характер, среднемесячные величины имеют минимальные значения, а хлорофилльные максимумы могут располагаться по всей толще воды [Воронина, 1977; Демидов и др., 2012; Мордасова, 2014]. В нашем случае наблюдения показывают, что поверхностные максимумы в зимний период встречались чаще, чем в остальные сезоны, и наблюдались почти в половине случаев (46–50%) (табл. 3). В зо-

нальном выражении поверхностные максимумы чаще встречались в первой зоне (табл. 4), составляя в июне-августе 52–67% наблюдений (табл. 2). Различия между поверхностными и максимальными значениями незначительны и, согласно наблюдениям, в среднем значения максимума больше всего на 4–12%. Большая часть значений содержания хлорофилла по всей толще воды относилась к олиготрофному и мезотрофному уровню и не превышала 0,5 мг/м<sup>3</sup>.

Весной происходит быстрый переход к неравномерному распределению фитопланктона, связанный с увеличением устойчивости вод

**Таблица 4.** Частота (количество станций в %) встречаемости максимумов по зонам на стандартных глубинах. За 100% принято количество станций в зоне

Стандартный горизонт, м	Зона				
	I	II	III	IV	I–IV
0	57	32	16	28	<b>34</b>
10	0,8	1,9	8,2	16	<b>7,3</b>
20	3,3	10	16	19	<b>12</b>
30	5,8	6,5	12	14	<b>9,9</b>
50	15	17	19	20	<b>18</b>
75	8,3	21	24	2,8	<b>13</b>
100	6,6	11	4,1	–	<b>5,1</b>
150	3,3	–	–	–	<b>0,9</b>

**Таблица 3.** Годовая динамика частоты встречаемости максимумов на стандартных глубинах (в %). За 100% принято кол-во станций за месяц

Стандартный горизонт, м	Месяц												
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь-декабрь
0	14	26	30	13	32	46	47	50	39	39	20	25	<b>34</b>
10	11	9	3	10	8	1	4	7	6	21	15	4	<b>7</b>
20	22	14	27	23	8	3	9	9	11	14	20	8	<b>12</b>
30	8	9	6	16	7	7	11	9	6	14	10	25	<b>10</b>
50	24	17	15	26	16	22	9	11	33	7	20	21	<b>18</b>
75	19	20	15	10	19	12	7	11	6	4	15	8	<b>13</b>
100	3	3	3	3	11	4	11	2	0	0	0	8	<b>5</b>
150	0	3	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	<b>1</b>



и формированием сезонного скачка плотности, на который приходится максимум численности организмов [Семина, 1977]. Согласно наблюдениям, начало формирования осенне-летней стратификации в исследуемом районе происходит в октябре, что отражается на изменении глубины трофогенного слоя (рис. 4–5). При этом средние значения хлорофилльного максимума для IV зоны находятся на глубине 50 м. Предполагается, что максимум на такой глубине обусловлен высокой концентрацией растворённого железа в опустившейся холодной поверхностной антарктической водной массе, сформированной в зимний период [Holm-Hansen, Hewes 2004; Arrigo et al., 2008; Демидов, 2007, 2012]. Нарастание количества водорослей начинается в сентябре, достигая максимума в ноябре в период резкого увеличения устойчивости поверхностного слоя. Второй максимум, связанный с уменьшением выедания зоопланктоном фитопланктона, наблюдался в I и III–IV зонах в феврале. Далее в апреле в I–II зонах наблюдался осенний минимум, в мае — второй максимум, в два раза меньше ноябрьского. В летний период средние значения хлорофилльных максимумов в I–III зонах в основном лежали в слое 45–55 м, тогда как в IV зоне чаще встречались значения на горизонтах 20–25 м. Наибольшие значения разницы между средними показателями максимальных и поверхностных величин хлорофилла в тёплый период могли достигать в I зоне в ноябре 39%, во II–III зонах в декабре 48%, в IV зоне в декабре 26%. Учитывая, что спутниковые данные обычно занижают поверхностные значения [Arrigo, van Dijken, 2004; Dierssen, Smith, 2000; Garcia et al., 2005; Korb et al., 2004; Mitchell, Holm-Hansen, 1991; Демидов и др., 2010, 2012б; Мордасова, 2014], недооценка спутниковых данных при перерасчётах на трофогенный слой в этот период оказывается слишком существенной.

Рассматриваемые зоны можно разделить на две группы по обилию хлорофилла и типам кривых. В I и II зонах присутствуют невысокие значения (менее 0,5 мг/м<sup>3</sup>) и амплитуда сезонной динамики выражена слабее. В зонах III и IV наблюдается чёткий сезонный ход концентраций хлорофилла с ярко выраженными пиками. Различия между кривыми

III и IV зоны заключаются только в величине амплитуды.

Наблюдения, выполненные в I и II зонах, в отличие от более близких к Антарктическому полуострову и Южным Оркнейским о-вам III и IV зон, сезонно и пространственно располагались менее равномерно и больше характеризовали малопродуктивный участок в открытых водах моря Скотия (53–57 ю. ш., 53–60 з. д.). Как уже указывалось в других работах [Демидов, 2010; Чурин, Гулюгин, 2014], в исследуемом районе наблюдается увеличение продуктивности с севера на юг. Более высокая продуктивность IV зоны обусловлена как наличием неритических зон Антарктического полуострова и Южных Оркнейских о-вов, так и кромкой льда в открытой части.

Схожие картины вертикального распределения, уровней сезонных значений концентраций хлорофилла и изменения значений в сторону увеличения в южном направлении отмечают и другие исследователи Южного океана, например, при экспедиционных работах в проливе Дрейка [Демидов и др., 2008, 2009, 2010, 2011; 2012 а, 2012 б, 2012 в; Brandini et al., 2000, Mikaelyan, Belyaeva, 1995; Holm-Hansen et al., 1997, 2004 и пр.]. В данное время считается, что лимитирующими факторами для развития фитопланктона в Субантарктике являются низкие концентрации биогенных веществ (в частности, железа и кремния), а в Антарктической части — низкий уровень освещённости в пределах глубокого верхнего перемешанного слоя, формирующегося вследствие интенсивной температурной конвекции и ветрового воздействия [Демидов др., 2010].

В характере сезонной изменчивости в рассматриваемом районе чаще всего указывались основной пик в декабре и второй осенний пик в марте, но отмечались и другие вариации в зависимости от состояния года [Mandelli, 1967; Pedros-Alio et al., 1967; El Sayed, 1968; El Sayed et al., 1968; Воронина, 1977; Семина, 1977; Sommer, Stabel, 1986; Longhurst, 1995; Brandini et al., 2000; Moore, Abbot, 2000; Демидов и др., 2010, 2011 и пр.]. В нашей предыдущей работе [Чурин, Гулюгин, 2017] месячные нормы за 17 лет, сделанные по спутниковым данным, показали первый пик в декабре (кроме I зоны, где пик наблюдался в ноябре),

а второй — в феврале. Возможно, полученная в 2015–2018 гг. динамика хода сезонных значений является особенностью этих лет.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты анализа 469 профилей хлорофилла *a*, полученных с 13 буёв Argo за период 2015–2018 гг. в районе 53–65° ю. ш., 40–70° з. д. в 4-х субширотных зонах в районе пролива Дрейка и открытой части моря Скотия, показали, что каждая из зон имеет ряд особенностей сезонной динамики вертикального распределения хлорофилла *a*.

Согласно распределению станций кривая значений для I и II зон больше характеризует локальный участок в пределах 53–57 ю. ш., 53–60 з. д. Данные по III и IV зонам имели более равномерное распределение по акватории.

Рассматриваемые зоны можно разделить на две группы. К первой можно отнести I и II зоны, характеризующиеся высокими скоростями течений, низким содержанием хлорофилла (большую часть года значения менее 0,5 мг/м<sup>3</sup>) и небольшой амплитудой сезонных значений. Максимальные значения наблюдались в ноябре, дополнительный максимум — в мае. Некоторые отклонения от общего сезонного хода значений содержания хлорофилла в ноябре-декабре в I зоне и в феврале во II зоне можно объяснить недостаточной обеспеченностью данных (1–2 станции в месяц). Около половины станций в течение года имели поверхностные максимумы. Различия между поверхностными и глубинными максимальными значениями были в пределах 5–12%. Наблюдался тренд к повышению средней глубины максимума от января-февраля (55 м) к октябрю (10 м).

Второй группе, состоящей из III и IV зон, свойственны более низкие скорости течений. Характеризуется она чётко выраженными пиками сезонного хода. Первый самый высокий пик развития приходится на ноябрь, второй пик наблюдается в феврале. Минимальные значения содержания хлорофилла *a* приходятся на июль. Большую часть времени года профили имеют подповерхностный максимум, разница между средними величинами поверхностных и глубинных максимальных значений в зимний сезон сохраняется на уровне 8–12%, а в летнее время может достигать 48%. Наблюдался

тренд к повышению средней глубины максимума от января-февраля (47,5 м) к октябрю (10



В направлении с севера на юг от I к IV зоне среднегодовые значения содержания хлорофилла увеличиваются в 2,2 раза. В осенне-летний период в ноябре в IV зоне среднее значение максимума выше, чем в I зоне, в 13 раз, на поверхности — в 20 раз. В зимний период в августе наблюдается обратное явление. Средние значения в зоне хлорофильного максимума в I зоне в 2,9 раза больше, чем в IV, на поверхности — в 3,1 раза.

Подтверждается тот факт, что сезонные различия в динамике развития фитопланктона для каждой из субширотных зон зависят от географического положения рассматриваемого района и его удалённости от прибрежно-приостровной зоны. Показано, что в наблюдаемый период сроки наступления пиков отличались от общепринятых со смещением на месяц ранее.

Работа над статьёй поддержана грантом РФФИ 18–05–00283а и частично темой № 0149–2018–0027 Президиума РАН.

### ЛИТЕРАТУРА

- Бородин Е.В., Чуринов 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.
- Воронина Н.М. 1977. Сообщества умеренных и холодных вод южного полушария // Океанология. Биология океана. Т. 2. Биологическая продуктивность океана. М.: Наука. С. 68–90.
- Демидов А.Б., Ведерников 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., Ведерников В.И., Гагарин В.И., Буренков В.И. 2008. Продукционные характеристики фитопланктона в восточных районах Атлантики и Атлантическом секторе Южного океана в октябре-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 первич-

- ной 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-т. Сер. 16. Биология*. № 4. С. 28–32.
- Демидов А.Б., Мошаров С.А., Гагарин В.И. 2012 в. Меридиональная асимметричность первичного продуцирования в Атлантическом секторе Южного океана весной и летом // *Океанология*. Т. 52. № 5. С. 675–687.
- Мордасова Н.В. 2014. Косвенная оценка продуктивности вод по содержанию хлорофилла // *Труды ВНИРО*. Т. 152. С. 41–56.
- Семина Г.И. 1977. Фитопланктон // *Океанология. Биология океана*. Т. 1. Биологическая структура океана. М.: Наука. С. 117–124.
- Чурин Д.А. 2017. Мезомасштабная динамика вод в Антарктической части Атлантики и ее влияние на распределение криля. Автореф. дисс. ... канд. геогр. наук. Калининград, БФУ им. И. Канта. 23 с.
- Чурин Д.А., Гулюгин С.Ю. 2017. Особенности сезонной динамики хлорофилла *a* в связи с абсолютной динамической топографией Антарктической части Атлантики // *Труды ВНИРО*. Т. 169. С. 117–125.
- Arrigo K.R., van Dijken G.L., Bushinsky S. 2008. Primary production in the Southern Ocean, 1997–2006 // *J. Geophys. Res.* Vol. 113. C08004, doi:10.1029/2007JC004551.
- Arrigo K.R., van Dijken G.L. 2004. Annual changes in sea ice, chlorophyll *a*, and primary production in the Ross Sea, Antarctica // *Deep-Sea Res. II*. V. 51. № 1–3. P. 117–138.
- Brandini F.P., Boltovskoy A.P., Piola A., Kocmur S., Rottgers R., Abreu P.C., Lopes R.M. 2000. Multiannual trends in fronts and distribution of nutrients and chlorophyll in the southwestern Atlantic (30°–62°S) // *Deep-Sea Res. I*. Vol. 47. N6. P. 1015–1033.
- Comiso J.C., Mc. Clain C.R., Sullivan C.W. et al. 1993. Coastal Zone Color Scanner pigment concentration in the Southern Ocean and relationships to geophysical surface features // *J. Geophys. Res.* V. 98. P. 2419–2451.
- Dierssen H.M., Smith R. 2000. Biooptical properties and remote sensing ocean color algorithms for Antarctic Peninsula waters // *J. Geophys. Res.* V. 105. № C11. P. 26301–26312.
- El Sayed S.Z. 1968. On the productivity of the Southwest Atlantic ocean and the waters west of the Antarctic peninsula // *Antar. Res. Ser. Biology of the Antarctic Seas* / Eds. Llano G.A., Schmitt W.L. AGU, Washington, V. 3. P. 15–47.
- El-Sayed S.Z., Mandelli E.F., Sugimura Y. 1964. Primary organic production in the Drake Passage and Bransfield Strait // *Antar. Res. Ser. Biology of the Antarctic Seas* / Ed. Lee M.O. AGU, Washington, V. 1. P. 1–11.
- Garcia C.A.E., Garcia V.M.T., McClain C.R. 2005. Evaluation of SeaWiFS chlorophyll algorithms in the Southwestern Atlantic and Southern Oceans // *Remote Sensing of Environment*. V. 95. № 1. P. 125–137.
- Holm-Hansen I., Hewes N.D. 2004. Deep chlorophyll *a* maxima (DCMs) in Antarctic waters. I. Relationship between DSMs and the physical, chemical, and optical conditions in the upper water column // *Polar Biology*. Vol. 27. N11. P. 699–710.
- Holm-Hansen I., Hewes N.D., Villafane V.E., Helbling E.W., Silva N., Amos T. 1997. Distribution of phytoplankton and nutrients in the area around Elephant Island, Antarctica // *Polar Biology*. Vol. 18. N2. P. 145–153.
- Holm-Hansen O., Mitchell G.B. 1991. Spatial and temporal distribution of phytoplankton and primary production in the western Bransfield Strait region // *Deep-Sea Res.* V. 38. № 8–9A. P. 961–980.
- Korb R.E., Whitehouse M.J., Ward P. 2004. SeaWiFS in the Southern ocean: spatial and temporal variability in phytoplankton biomass around South Georgia // *Deep-Sea Res. II*. V. 51. № 1–2. P. 99–116.
- Longhurst A. 1995. Seasonal cycles of pelagic production and consumption // *Prog. Oceanogr.* V. 36. № 2. P. 77–167.
- Mandelli E.F. 1967. Enhanced photosynthetic assimilation ratios in Antarctic Polar Front (Convergence) diatoms // *Limnol. and Oceanogr.* V. 12. № 3. P. 484–491.
- Mikaelyan A.S., Belyaeva G.A. 1995. Chlorophyll *a* content in cells of Antarctic phytoplankton // *Polar Biology*. Vol. 15. N6. P. 437–445.
- Mitchell G.B., Holm-Hansen O. 1991. Biooptical properties of Antarctic Peninsula waters: Differentiation from temperate ocean models // *Deep-Sea Res. I*. V. 38. P. 1009–1028.
- Moore J.K., Abbott M.R. 2000. Phytoplankton chlorophyll distribution and primary production in the Southern Ocean // *J. Geophys. Res.* V. 105. No. C12. P. 28709–28722.
- Pedros-Alio C., Calderon-Paz J., Guixa N., Navarrete A., Vaqué D. 1996. Microbial plankton across Drake Passage // *Polar Biology*. V. 16. № 8. P. 613–622.
- Sommer U., Stabel H.H. 1986. Near surface nutrient and phytoplankton distribution in the Drake Passage during early December // *Polar Biology*. V. 5. № 2. P. 107–110.
- Copernicus Marine environment monitoring service. Доступно через: <http://marine.copernicus.eu/>. 01.08.2018 г.

Поступила в редакцию 18.10.2018 г.  
Принята после рецензии 24.10.2018 г.

**Aquatic biological resources**  
Diagnosis and forecasting of habitat conditions of hydrobio

**Seasonality of the vertical distribution of chlorophyll-a  
in the sublatitudinal zones of the Antarctic part of the  
Atlantic according to direct and remote sensing data**

*D.A. Churin<sup>1,2</sup>, S. Yu. Gulyugin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Atlantic Fisheries Research Institute (FSBSI «AtlantNIRO»), Kaliningrad

<sup>2</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences (FSBIS «SIO RAS»), Moscow

The article discusses the results of the analysis of 469 chlorophyll a profiles obtained from the buoys of the project Biogeochemical-Argo from May 7, 2015 to May 14, 2018 in the Drake Passage and the open part of the Scotia Sea between 53–65° S, 40–70° W. Profiles led to standard horizons. It was noted that during the period under review it became possible to trace the dynamics of seasonal changes in the concentration of chlorophyll-a in four sublatitudinal zones. In the area under consideration, phytoplankton reached its highest development in December, in the SFZ (Secondary frontal zone) the maximum values reached 4.11 mg / m<sup>3</sup>, the lowest concentration of chlorophyll-a was observed in August, while the lowest values of the maximum were also observed in the SFZ and were 0.16 mg/m<sup>3</sup>. According to the dynamics of the variability of the curves of chlorophyll values, the similarity between the SASM (sub-antarctic surface water mass) and SPFZ (South polar frontal zone) zones and between AZ (Antarctic zone) and SFZ is highlighted. In the areas of SASM and SPFZ, the range of values of the chlorophyll-a maximum during the year was less (0.22–3.45 mg/m<sup>3</sup>) than in the southern regions, the second peak was in May. AZ and SFZ had similar pronounced seasonal differences, the values of chlorophyll content in the maximum zone ranged from 0.09–8.02 mg/m<sup>3</sup>, the second peak was observed in February. Surface maxima were observed in 33.9% of cases, mainly in the winter period in the area of the SASM. The difference between the surface values and the values in the layer of the maximum in the winter period for all zones was 5–12%, in the summer period in the SASM and AZ reached 48%. As a trend, an increase in the average maximum depth from February (37 m) to October (15.5 m) was observed.

**Keywords:** Chlorophyll a, vertical structure, drifting buoys, BIO ARGO, seasonal variability, Southern Ocean.

**REFERENCES**

*Borodin E.V., Churin D.A., Chernyshkov P.P.* 2014. Vliyanie dinamiki vod na biomassu i raspredelenie biologicheskikh resursov pelagiali yuzhnykh 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.  
*Voronina N.M.* 1977. Soobshchestva umerennykh i holodnykh vod yuzhnogo polushariya [Communities of temperate and cold waters of the southern hemisphere] // Okeanologiya. Biologiya okeana. T. 2. Biologicheskaya produktivnost' okeana. M.: Nauka. 68–90.

- Demidov A.B., Vedernikov V.I., Sheberstov S.V.* 2007. Prostranstvenno-vremennaya izmenchivost' hlorofilla *a* v atlanticheskom i indijskom sektorah Yuzhnogo okeana v fevrale-aprele 2000 g. po sputnikovym i ehkspeditsionnym 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. Produkcionnye karakteristiki fitoplanktona v vostochnyh rajonah Atlantiki i Atlanticheskoy sektore Yuzhnogo okeana v oktyabre-noyabre 2004 g. [Phytoplankton Productional 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. Sezonnaya 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 produkcii i hlorofilla *a* v prolive Drejka v vesennij sezon [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. Produkcionnye karakteristiki fitoplanktona v YUzhnoj Atlantike v Atlanticheskoy 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 produkcii 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 produkcirovaniya v Atlanticheskoy 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.
- Mordasova N.V.* 2014. Kosvennaya ocenka produktivnosti vod po sodержaniyu hlorofilla [Indirect Estimation of Water Productivity by the Chlorophyll Content] // *Trudy VNIRO*. T. 152. S. 41–56.
- Semina G.I.* 1977. Fitoplankton [Phytoplankton] // *Okeanologiya. Biologiya okeana*. T. 1. Biologicheskaya struktura okeana. M.: Nauka. S. 117–124.
- Churin D.A., Borodin E.V., Chernyshkov P.P.* 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 kh-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.
- Churin D.A., Gulyugin S. Yu.* 2017. Aspects of dynamics of chlorophyll-*a* in relation to the absolute dynamic topography of the Antarctic part of the Atlantic // *Trudy VNIRO*. T. 169. S. 117–125.
- Arrigo K.R., van Dijken G.L., Bushinsky S.* 2008. Primary production in the Southern Ocean, 1997–2006 // *J. Geophys. Res.* Vol. 113. C08004, doi:10.1029/2007JC004551.
- Arrigo K.R., van Dijken G.L.* 2004. Annual changes in sea ice, chlorophyll *a*, and primary production in the Ross Sea, Antarctica // *Deep-Sea Res. II*. V. 51. № 1–3. P. 117–138.
- Brandini F.P., Boltovskoy A.P., Piola A., Kocmur S., Rottgers R., Abreu P.C., Lopes R.M.* 2000. Multiannual trends in fronts and distribution of nutrients and chlorophyll in the southwestern Atlantic (30°–62°S) // *Deep-Sea Res. I*. Vol. 47. № 6. P. 1015–1033.
- Comiso J.C., Mc. Clain C.R., Sullivan C.W. et al.* 1993. Coastal Zone Color Scanner pigment concentration in the Southern Ocean and relationships to geophysical surface features // *J. Geophys. Res.* V. 98. P. 2419–2451.
- Dierssen H.M., Smith R.* 2000. Biooptical properties and remote sensing ocean color algorithms for Antarctic Peninsula waters // *J. Geophys. Res.* V. 105. № C11. P. 26301–26312.
- El Sayed S.Z.* 1968. On the productivity of the Southwest Atlantic ocean and the waters west of the Antarctic peninsula // *Antar. Res. Ser. Biology of the Antarctic Seas* / Eds. Llano G.A., Schmitt W.L. AGU, Washington, V. 3. P. 15–47.
- El Sayed S.Z., Mandelli E.F., Sugimura Y.* 1964. Primary organic production in the Drake Passage and Bransfield Strait // *Antar. Res. Ser. Biology of the*

- Antarctic Seas / Ed. Lee M.O. AGU, Washington, V. 1. P. 1–11.
- Garcia C.A.E., Garcia V.M.T., McClain C.R. 2005. Evaluation of SeaWiFS chlorophyll algorithms in the Southwestern Atlantic and Southern Oceans // Remote Sensing of Environment. V. 95. № 1. P. 125–137.
- Holm-Hansen I., Hewes N.D. 2004. Deep chlorophyll à maxima (DCMs) in Antarctic waters. I. Relationship between DSMs and the physical, chemical, and optical conditions in the upper water column // Polar Biology. Vol. 27. N11. P. 699–710.
- Holm-Hansen I., Hewes N.D., Villafane V.E., Helbling E.W., Silva N., Amos T. 1997. Distribution of phytoplankton and nutrients in the area around Elephant Island, Antarctica // Polar Biology. Vol. 18. N2. P. 145–153.
- Holm-Hansen O., Mitchell G.B. 1991. Spatial and temporal distribution of phytoplankton and primary production in the western Bransfield Strait region // Deep-Sea Res. V. 38. № 8–9A. P. 961–980.
- Korb R.E., Whitehouse M.J., Ward P. 2004. SeaWiFS in the Southern ocean: spatial and temporal variability in phytoplankton biomass around South Georgia // Deep-Sea Res. II. V. 51. № 1–2. P. 99–116.
- Longhurst A. 1995. Seasonal cycles of pelagic production and consumption // Prog. Oceanogr. V. 36. № 2. P. 77–167.
- Mandelli E.F. 1967. Enhanced photosynthetic assimilation ratios in Antarctic Polar Front (Convergence) diatoms // Limnol. and Oceanogr. V. 12. № 3. P. 484–491.
- Mikaelyan A.S., Belyaeva G.A. 1995. Chlorophyll a content in cells of Antarctic phytoplankton // Polar Biology. Vol. 15. N6. P. 437–445.
- Mitchell G.B., Holm-Hansen O. 1991. Biooptical properties of Antarctic Peninsula waters: Differentiation from temperate ocean models // Deep-Sea Res. I. V. 38. P. 1009–1028.
- Moore J.K., Abbott M.R. 2000. Phytoplankton chlorophyll distribution and primary production in the Southern Ocean // J. Geophys. Res. V. 105. No. C12. P. 28709–28722.
- Pedros-Alio C., Calderon-Paz J., Guixa N., Navarrete A., Vaqué D. 1996. Microbial plankton across Drake Passage // Polar Biology. V. 16. № 8. P. 613–622.
- Sommer U., Stabel H.H. 1986. Near surface nutrient and phytoplankton distribution in the Drake Passage during early December // Polar Biology. V. 5. № 2. P. 107–110.
- Copernicus Marine environment monitoring service. Accessible via: <http://marine.copernicus.eu/>. 01.08.2018.

#### TABLE CAPTIONS

**Table 1.** Monthly distribution of stations in the study area for 2015–2018

**Table 2.** The number of stations with a surface maximum of chlorophyll a (in %). 100% taken the number of stations in the zone in a particular month

**Table 3.** Annual dynamics of the frequency of occurrence of the maxima at standard depths (in %). 100% accepted number of stations per month

**Table 4.** The frequency of occurrence of maxima by zones at standard depths (in %). 100% accepted number of stations in the zone

#### FIGURE CAPTIONS

**Fig. 1.** Position of the stations of the vertical distribution of chlorophyll a (black point). The color distribution shows the monthly rate of distribution of chlorophyll-a at the sea surface in December ( $\text{mg} / \text{m}^3$ ), the black lines indicate the ADT isolines [Churin, Gulyugin, 2017]. Red lines show the fronts. Decoding fronts are given in the text

**Fig. 2.** Monthly mean values of chlorophyll-a on the surface (solid line) and maximum (dashed line) throughout the region

**Fig. 3.** Monthly mean values of chlorophyll a on the surface (solid line) and maximum (dashed line) in sub-latitude zones

**Fig. 4.** Dynamics of chlorophyll-a profiles by zones. Monthly averaged values over standard horizons ( $\text{mg} / \text{m}^3$ )

**Fig. 5.** Dynamics of chlorophyll-a profiles by months. Monthly averaged values over standard horizons ( $\text{mg} / \text{m}^3$ )

**Fig. 6.** The ratio of surface and maximum values of chlorophyll a (in% of maximum)

**Fig. 7.** Monthly averaged depths of maximum over sub-latitude zones