

## ЭКОЛОГИЯ

УДК 581.132:574.583

**ВЕРТИКАЛЬНАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ПЕРВИЧНОЙ ПРОДУКЦИИ И ХЛОРОФИЛЛА *a* В ПРОЛИВЕ ДРЕЙКА В ВЕСЕННИЙ ПЕРИОД (ОКТАБРЬ—НОЯБРЬ)****А.Б. Демидов\*, С.А. Мошаров\*, В.И. Гагарин\*, И.В. Мошарова***(кафедра гидробиологии; e-mail: demspa@rambler.ru)*

По результатам двух экспедиций, проведенных в октябре—ноябре 2007 и 2008 гг., изучены вертикальные изменения первичной продукции (*PP*) и хлорофилла *a* (*Chl*) в проливе Дрейка. Отмечено разнообразие форм кривых вертикального распределения *Chl* в различных гидрологических зонах пролива. Антарктические воды в весенний период характеризовались хорошо выраженным глубинным максимумом *Chl* (DCM). Сделан вывод о необходимости учета DCM при разработке моделей первичной продукции Южного океана с целью оценки ее годовых величин.

**Ключевые слова:** *первичная продукция, хлорофилл *a*, вертикальное распределение, Южный океан.*

Исследования крупномасштабной изменчивости продукционных параметров фитопланктона и оценка уровня продуктивности отдельных регионов и всего Мирового океана в настоящее время осуществляется с использованием спутниковой информации о восходящем из приповерхностного слоя излучении и рассчитанной по этой характеристике концентрации хлорофилла *a* [1, 2]. В контексте экологических исследований эпипелагиали океана одной этой информации недостаточно, необходимы данные о вертикальном распределении хлорофилла *a* (*Chl*) и первичной продукции (*PP*).

В Южном океане, который определяется как акватория южнее Субантарктического фронта (САФ) [3], характер и сезонность вертикальной изменчивости *PP* и *Chl* изучена достаточно слабо. До сих пор в моделях расчета первичной продукции с вертикальным разрешением для Южного океана принимается упрощенная схема вертикального распределения *Chl*, предполагающая равномерное распределение в верхнем перемешанном слое и значительное уменьшение в более глубоких слоях водной толщи [4]. Предыдущими исследованиями, проведенными в летний период в южной части пролива, отмечен хорошо выраженный глубинный хлорофилльный максимум в слое 50—100 м [5, 6].

Целью настоящей работы являлось исследование вертикальной изменчивости *PP* и *Chl* на всей акватории пролива Дрейка календарной весной Южного полушария (октябрь—ноябрь).

**Материал и методы**

Исследования вертикальных изменений *PP* и *Chl* в ноябре 2007 г. (24-й рейс НИС “Академик Иоффе”) проводили на разрезе от о-ва Элефант до мыса Горн. В октябре—ноябре 2008 г. изучение мезомасштабной изменчивости этих показателей было выполнено на полигоне в районе Полярного фронта (ПФ) (25-й рейс НИС “Академик Сергей Вавилов”) (рис. 1). Принципы районирования исследованной акватории пролива Дрейка, согласно которому проводили систематизацию данных, обсуждались в ранее опубликованных работах [7—9].

Для определения содержания *Chl* на STD станциях пробы воды отбирали пластиковыми батометрами комплекса SBE-32 Carousel Water Sampler с 9—10 горизонтов верхнего 200-метрового слоя. Проба из поверхностного слоя на этих станциях отбиралась пластиковым ведром одновременно с замыканием батометров в верхнем 200-метровом слое. Исследование вертикального профиля *Chl* проводилось с пространственным разрешением приблизительно 90 (24-й рейс НИС “Академик Иоффе”) и 20 (25-й рейс НИС “Академик Сергей Вавилов”) морских миль. Кроме этого, на промежуточных станциях были взяты пробы воды с поверхности. Расстояния между такими станциями составляло 6—12 морских миль. Проба воды для определения первичной продукции отбиралась с поверхности один раз в сутки на станциях, проведенных в первую половину дня ближе к солнечной кульминации.

\* Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, г. Москва.

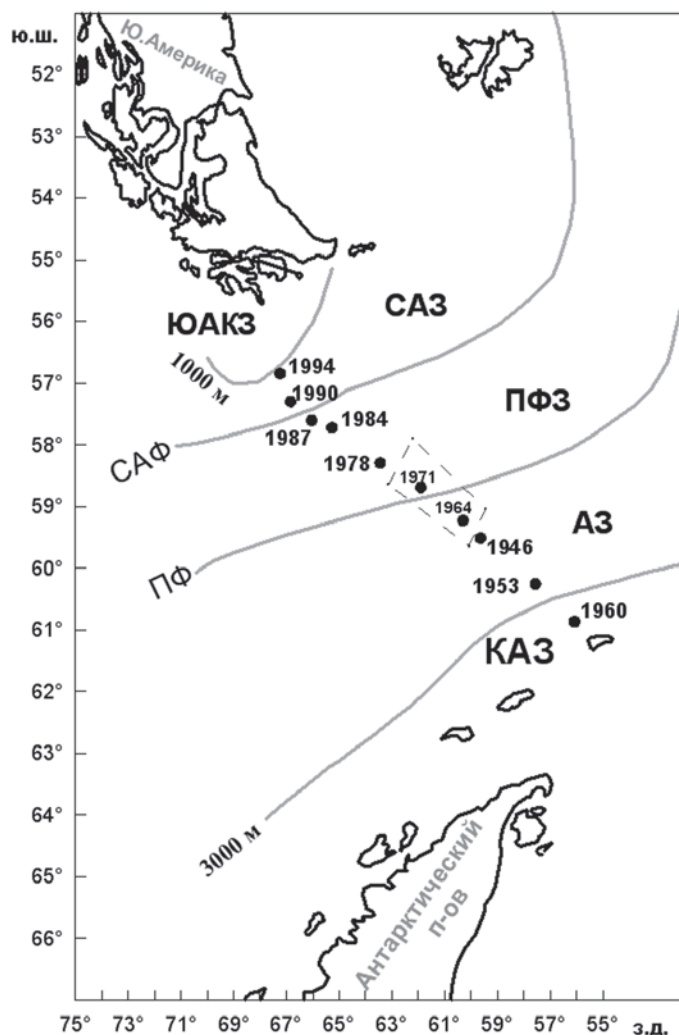


Рис. 1. Схема района исследований в проливе Дрейка: разрез в ноябре 2007 г. (кружки — станции с вертикальным профилем хлорофилла *a*) и полигон в октябре—ноябре 2008 г. (пунктирная граница). Сплошными линиями показаны границы между основными гидрологическими зонами. ЮАКЗ — Южно-Американская континентальная зона; САЗ — Субантарктическая зона; САФ — Субантарктический фронт; ПФЗ — Полярная фронтальная зона; ПФ — Полярный фронт; АЗ — Антарктическая зона; КАЗ — Континентальная антарктическая зона

Определение концентрации хлорофилла *a* в 24-м рейсе НИС “Академик Иоффе” проводили при помощи спектрофотометрического метода [10]. Схема обработки проб при использовании этого метода, применяемая в последних рейсах в Антарктику, описана ранее [11]. В 25-м рейсе НИС “Академик Сергей Вавилов” определение содержания *Chl* проводили флуориметрическим методом [12]. Проведенные ранее сравнения различных методов определения *Chl* в пробах природной воды, осадках и культурах водорослей показали в целом хорошее соответствие их результатов [13, 14]. Данные, полученные при использовании различных методов и схем опытов, могут быть применены для получения относительной картины пространственно-временной изменчивости *Chl* [15].

Для измерения первичной продукции в поверхностном слое использовались те же пробы, которые

отбирались для определения содержания *Chl*. Первичную продукцию на поверхности измеряли при помощи радиоуглеродной модификации скляночного метода [16]. Для определения продукции в столбе воды применяли модифицированный метод имитации световых условий [11].

В ноябре 2007 г. на разрезе через пролив Дрейка суммарная солнечная радиация измерялась пиранометром CNR-1 фирмы “Kipp and Zonen” (Германия). В октябре—ноябре 2008 г. надводную (*I*) и подповерхностную инсоляцию (*I*<sub>0</sub>) в диапазоне фотосинтетически активной радиации (ФАР) измеряли при помощи датчиков фирмы “Li-Cor” LI-190SA и LI-193SA соответственно.

### Результаты и обсуждение

**Ноябрь 2007 г. Вертикальные изменения содержания хлорофилла.** Кривые вертикального распределения *Chl* и условной плотности воды для различных гидрологических зон показаны на рис. 2 (глубина резкого увеличения плотности на графиках соответствует нижней границе верхнего перемешанного слоя). Для районов южнее ПФ (зоны КАЗ и АЗ) представлены вертикальные кривые *Chl* двух типов. Первый тип характеризуется в целом постоянным снижением содержания хлорофилла от поверхности до нижней границы исследованного слоя (200 м) с небольшим максимумом (отношение величин максимальной ( $Chl_{max}$ ) и поверхностной ( $Chl_0$ ) концентраций  $Chl_{max}/Chl_0 = 1,15–1,25$ ) на горизонтах 10–12 м (ст. 1960 и 1964). Второй тип кривых (ст. 1953) имеет глубинный максимум *Chl* (DCM) ( $Chl_{max}/Chl_0 = 1,59–2,27$ ) в верхнем перемешанном слое над пикноклином приблизительно на горизонте 75 м (рис. 2). Хорошо выраженным мы считали DCM при  $Chl_{max}/Chl_0 \geq 1,15$  [17].

На станциях, расположенных севернее ПФ в ПФЗ (ст. 1978, 1984), наблюдалась несколько отличная от АЗ картина (рис. 2). Ни на одной станции не был обнаружен DCM, а максимум хлорофилла был отмечен на поверхности или на горизонте 10 м. Отношение  $Chl_{max}/Chl_0$  при этом было невысоким и составило 1,18–1,43. На ст. 1984 и 1987, на которых отмечалось массовое развитие фитопланктона ( $Chl_0 = 0,80–1,63$  мг/м<sup>3</sup>),  $Chl_{max}$  зафиксирован в слое резкого сезонного пикноклина, сформировавшегося в относительно тихую, теплую погоду. В Субантарктике (САФ) на ст. 1994 DCM располагался над слоем пикноклина на горизонте 60 м (рис. 2). Степень выраженности DCM здесь была невысокой ( $Chl_{max}/Chl_0 = 1,07–1,32$ ).

Толщина слоя фотосинтеза ( $H_{ph}$ ) в 24-м рейсе НИС “Академик Иоффе” рассчитывалась по зависимости  $H_{ph}$  от  $Chl_0$ , выведенной нами по данным 19-го и 22-го рейсов НИС “Академик Сергей Вавилов”.

**Октябрь—ноябрь 2008 г. Вертикальные изменения продукционных показателей фитопланктона.** Гидроло-

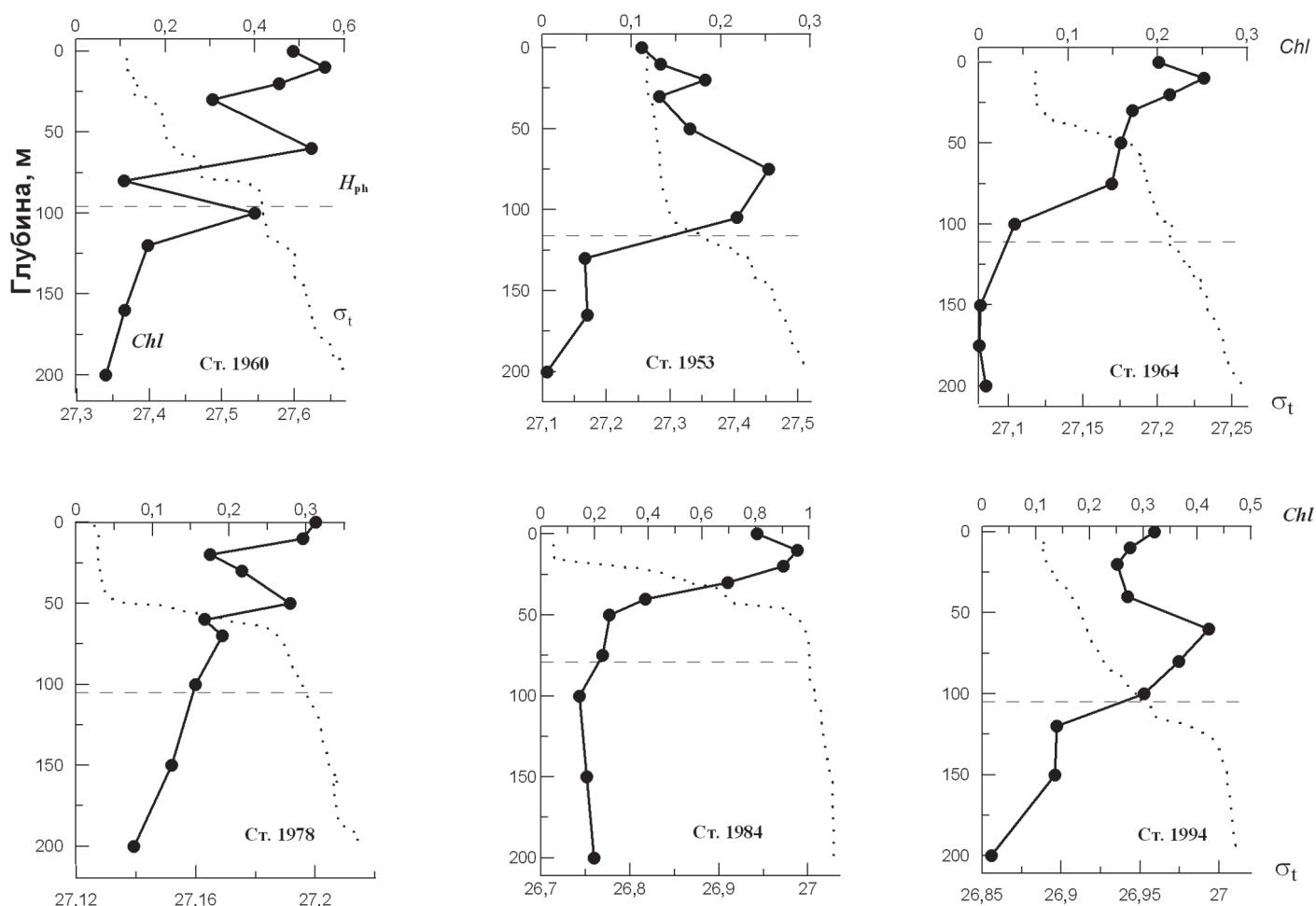


Рис. 2. Вертикальное распределение хлорофилла *a* (*Chl*, мг/м³) и плотности воды ( $\sigma_t$ , кг/м³) в ноябре 2007 г. на станциях в гидрологических зонах КАЗ (ст. 1960), АЗ (ст. 1953, 1964), ПФЗ (ст. 1978, 1984) и САЗ (ст. 1994).  $H_{ph}$  — граница слоя фотосинтеза. Другие условные обозначения см. на рис. 1

гический полигон в проливе Дрейка ( $\sim 50 \times 110$  морских миль), работы на котором проводились с 23 октября по 3 ноября, был расположен в районе ПФ и сопровождающего этот фронт Южного полярного течения (ЮПТ). За северную границу ПФ было принято положение изотермы (потенциальная температура)  $2^\circ\text{C}$  на глубине 200 м. Как и в предыдущих исследованиях [7], ПФ считался границей между АЗ и ПФЗ. Таким образом, район ЮПТ включен нами в Антарктическую зону.

Вертикальное распределение *Chl* в восточной, центральной и западной частях полигона показано на рис. 3. К его характерным особенностям можно отнести равномерное распределение в верхнем перемешанном слое или формирование слабо выраженного максимума (или максимумов) в верхних или средних слоях эвфотической зоны. На всех проведенных станциях отмечалось быстрое падение с глубиной концентрации хлорофилла в слое пикноклина и отсутствие ярко выраженного DCM на нижних горизонтах зоны фотосинтеза.

Величины  $Chl_{max}$  превышали значения  $Chl_0$  на всем полигоне не более чем в 1,5 раза. При этом распределение глубины залегания DCM носило случай-

ный характер при изменениях на большинстве станций от 9 до 82 м. Такая картина расположения DCM в столбе воды указывает на отсутствие закономерных пространственных изменений вертикальной структуры фитоплана в районе Полярного фронта.

Вертикальное распределение величин *PP* характеризовалось быстрым падением с глубиной с максимумом на поверхности или в самых верхних слоях эвфотической зоны. Толщина слоя фотосинтеза измерялась на станциях при определении *PP* или рассчитывалась по зависимости  $H_{ph}$  от  $Chl_0$ . Величины всего массива рассчитанных и измеренных величин  $H_{ph}$  на полигоне в проливе Дрейка были типичны для мезотрофных вод Мирового океана (от 81 до 138 м) [18]. Отношение  $H_{ph}$  к величине относительной прозрачности по диску Секки изменялось от 3,95 до 8,12, составив в среднем 5,66. Близкие величины этого отношения (в среднем от 5,6 до 6,9) отмечались нами ранее на разрезе между Африкой и Антарктидой в конце октября — начале ноября 2005 г. (22-й рейс НИС «Академик Сергей Вавилов», неопубликованные данные). Такие показатели в целом близки к результатам, полученным для Субантарктической зоны Тихого океана [19]. Следует ска-

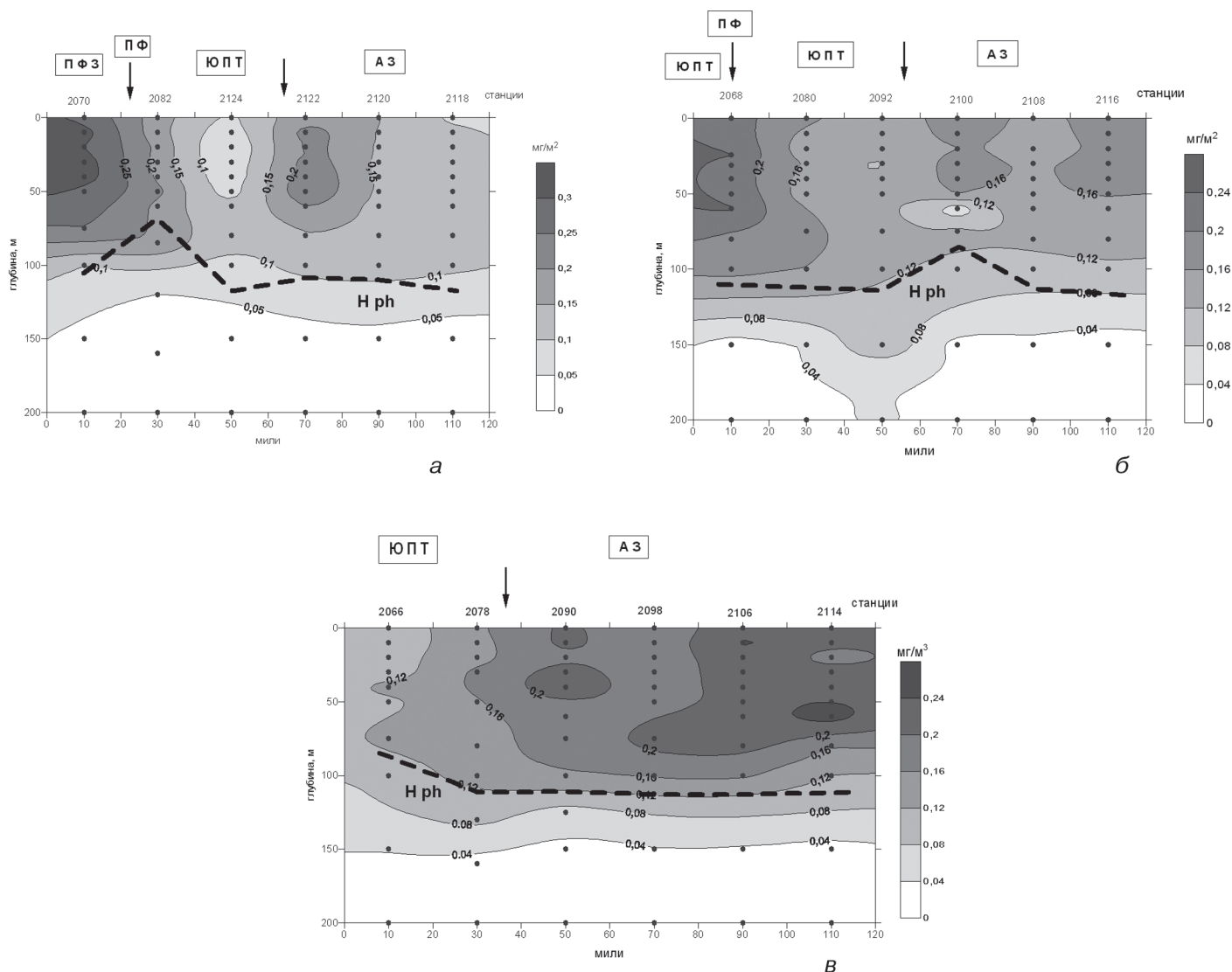


Рис. 3. Распределение содержания хлорофилла *a* на субмеридиональных разрезах в восточной (а), центральной (б) и западной (в) частях полигона в октябре—ноябре 2008 г. Точками показаны глубины отбора проб. ЮПТ — Южное полярное течение. Другие условные обозначения см. на рис. 1

зять, что нижняя граница  $H_{ph}$  обычно отмечалась при облученности, составлявшей 0,03–0,50% от  $I_0$ , что значительно меньше пороговой величины (1%), часто принимаемой за границу слоя фотосинтеза.

Аналогичные выделенным типам вертикального распределения *Chl* (рис. 2) кривые получены в работах других авторов в январе—марте в южной части пролива Дрейка (у о-ва Элефант) [20, 21] и в ноябре в районе южнее 60° ю.ш. [22], что свидетельствует о разнообразии вертикальных кривых хлорофилла в Антарктической зоне в различные сезоны [21, 5]. Очевидно, что в этом районе мы наблюдаем картину, отличную от часто принимаемой в моделях расчета первичной продукции в Южном океане [4].

Особенностью вертикального распределения *Chl* в южной части пролива Дрейка в зоне, прилегающей к Южным Шетландским островам, является хорошо выраженный DCM в нижних слоях зоны фотосинтеза (50–100 м) [5, 6]. Формирование этого максимума вызвано комплексом причин, главной из кото-

рых считается увеличение на этих горизонтах концентрации растворенного железа, недостаток которого лимитирует рост и фотосинтез фитопланктона в верхних слоях эвфотической зоны [23]. В свою очередь слои с повышенным содержанием железа приурочены к опустившейся летом на глубины холодной поверхностной антарктической водной массе, сформированной в зимний период в южной части пролива. С этим связано частое нахождение DCM в слое минимальных температур [5].

## Выводы

1. Исследования вертикального распределения продукционных характеристик фитопланктона, проводившиеся другими авторами в проливе Дрейка, выполнялись главным образом в его южной части в летний период. Нашими исследованиями в ранне-весенний период показано, что глубинный максимум в этом районе Южного океана является характерной

чертой изменчивости *Chl* по глубинам в начале сезонной сукцессии планктонных сообществ. Остаются открытыми вопросы пространственного распространения слоев с повышенным содержанием *Chl* на север до Полярного фронта и сезонной изменчивости его вертикального распределения.

2. Наличие глубинного максимума хлорофилла в Южном океане определяет необходимость модификации моделей расчета первичной продукции с вертикальным разрешением для повышения точности оценки продуктивности морских акваторий. Очевид-

но, что используемая до настоящего времени упрощенная схема предполагавшегося равномерного распределения хлорофилла *a* в верхнем перемешанном слое не соответствует реальной ситуации в районах Южного океана.

3. Установленные для центральной части пролива Дрейка (в районе Полярного фронта) максимумы вертикального распределения первичной продукции в поверхностном слое отражают слабую выраженность светового угнетения фитопланктона.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O'Reilly J. E., Maritorena S., Mitchell B. G., Siegel D., Carder K., Garver S., Kahru M., McClain C. Ocean color chlorophyll algorithms for SeaWiFS // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. N C11. P. 24937–24953.
2. Carder K.L., Chen F.R., Cannizzaro J.P. Performance of the MODIS semi-analytical ocean color algorithm for chlorophyll-*a* // *Advances in Space Res.* 2004. Vol. 33. N 7. P. 1152–1159.
3. Alderkamp A.C., de Baar H.J.W., Visser R.J.W., Arriago K.R. Can photoinhibition control phytoplankton abundance in deeply mixed water columns of the Southern Ocean? // *Limnol. and Oceanogr.* 2010. Vol. 55. N 3. P. 1248–1264.
4. Arriago K.R., van Dijken G.L., Bushinsky S. Primary production in the Southern Ocean, 1997–2006 // *J. Geophys. Res.* 2008. Vol. 113. C08004, doi: 10.1029/2007JC004551.
5. Holm-Hansen O., Hewes C.D. 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.* 2004. Vol. 27. N 11. P. 699–710.
6. Holm-Hansen O., Kahru M., Hewes C.D. Deep chlorophyll *a* maxima (DCMs) in pelagic Antarctic waters. II. Relation to bathymetric features and dissolved iron concentrations // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2005. Vol. 297. P. 71–81.
7. Демидов А.Б., Гагарин В.И., Григорьев А.В. Сезонная изменчивость хлорофилла *a* на поверхности в проливе Дрейка // *Океанология.* 2010. Т. 50. № 3. С. 355–370.
8. Whitworth T. Sonation and geostrophic flow of the Antarctic Circumpolar Current at Drake Passage // *Deep-Sea Res.* 1980. Vol. 27. N 7. P. 497–507.
9. Sievers H.A., Nowlin W.D.Jr. The stratification and water masses at Drake Passage // *J. Geophys. Res.* 1984. Vol. 89. N C6. P. 10489–10514.
10. Jeffrey S.W., Humphrey G.F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls *a*, *b*, *c*<sub>1</sub> and *c*<sub>2</sub> in higher plants, algae and natural phytoplankton // *Biochem. und Physiol. Pflanz.* 1975. Bd. 167. N 2. S. 191–194.
11. Демидов А.Б., Ведерников В.И., Гагарин В.И., Буренков В.И. Продукционные характеристики фитопланктона в восточных районах Атлантики и Атлантическом секторе Южного океана в октябре–ноябре 2004 г. // *Океанология.* 2008. Т. 48. № 3 С. 396–410.
12. Holm-Hansen O., Riemann B. Chlorophyll *a* determination: improvements in methodology // *Oikos.* 1978. Vol. 30. P. 438–447.
13. Neveux J., Delmas D., Romano J., Algarra P., Ignatides L., Herbland A., Morand P., Neori A., Bonin D., Barbe J., Sukenik A., Berman T. Comparison of chlorophyll and phaeo-
14. pigments determination by spectrophotometric, fluorometric, spectrofluorometric and HPLC methods // *Mar. Microb. Food Webs.* 1990. Vol. 4. N 2. P. 217–238.
15. Mantoura R.F.C., Jeffrey S.W., Liewellyn C.A., Claustre H., Morales C.E. Comparison between spectrophotometric, fluorometric and HPLC methods for chlorophyll analysis // *Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods.* Paris: UNESCO, 1997. P. 361–380.
16. Yunev O.A., Vedernikov V.I., Basturk O., Yilmaz A., Kideys A.E., Moncheva S., Kononov S.K. Long-term variations of surface chlorophyll *a* and primary production in the open Black Sea // *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 2002. Vol. 230. P. 11–28.
17. Винберг Г.Г., Кабанова Ю.Г., Кобленц-Мишке О.И., Хмелева Н.Н., Калер В.Л. Методическое пособие по определению первичной продукции органического вещества в водоемах радиоуглеродным методом. Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1960. 26 с.
18. Uitz J., Claustre H., Morel A., Hooker S.B. Vertical distribution of phytoplankton communities in open ocean: An assessment on surface chlorophyll // *J. Geophys. Res.* 2006. Vol. 111. C08005. doi: 10.1029/2005JC003207.
19. Виноградов М.Е., Шушкина Э.А., Незлин Н.П., Ведерников В.И., Гагарин В.И. Корреляционная связь различных параметров экосистемы пелагиали Мирового океана // *Океанология.* 1999. Т. 39. № 1. С. 64–74.
20. Ведерников В.И., Коновалов Б.В. Первичная продукция и хлорофилл // *Экосистемы Субантарктической зоны Тихого океана* // Отв. ред. М.Е. Виноградов, М.В. Флинт. М.: Наука, 1988. С. 118–132.
21. Mikaelyan A.S., Belyaeva G.A. Chlorophyll *a* content in cells of Antarctic phytoplankton // *Polar Biology.* 1995. Vol. 15. N 6. P. 437–445.
22. Holm-Hansen O., Hewes C.D., Villafañe V.E., Helbling E.W., Silva N., Amos T. Distribution of phytoplankton and nutrients in the area around Elephant Island, Antarctica // *Polar Biology.* 1997. Vol. 18. N 2. P. 145–153.
23. Brandini F.P., Boltovskoy A.P., Piola A., Kocum S., Rottgers R., Abreu P.C., Lopes R.M. Multiannual trends in fronts and distribution of nutrients and chlorophyll in the southwestern Atlantic (30°–62°S) // *Deep-Sea Res.* I. 2000. Vol. 47. N 6. P. 1015–1033.
24. de Baar H.J.W., de Jong J.T.M., Nolting R.F., Timmermans K.R., van Leeuwe M.V., Bathmann U., Rutger van der Loeff M., Sildam J. Low dissolved Fe and the absence of bloom in the remote Pacific waters of the Southern ocean // *Mar. Chem.* 1999. Vol. 66. N 1–2. P. 1–34.

**VERTICAL VARIABILITY OF PRIMARY PRODUCTION AND CHLOROPHYLL *a* IN THE DRAKE PASSAGE IN AUSTRAL SPRING (OCTOBER—NOVEMBER)**

*A.B. Demidov, S.A. Mosharov, V.I. Gagarin, I.V. Mosharova*

Vertical distribution of primary production (PP) and chlorophyll *a* concentration (Chl) were studied in two Drake Passage cruises in October—November 2007 and 2008. Diversity in sharp of vertical curves of Chl was pointed out in the different hydrological zones of the Drake Passage. Antarctic waters in spring were characterized by well-defined deep chlorophyll maximum (DCM). Influence of DCM must be taken into account for annual Southern Ocean PP estimation by models.

**Key words:** *primary production, chlorophyll a, vertical distribution, Southern Ocean.*

**Сведения об авторах**

*Демидов Андрей Борисович* — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Тел. 8-499-129-21-09; e-mail: demspa@rambler.ru

*Мошаров Сергей Александрович* — канд. биол. наук, ст. науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Тел. 8-499-124-63-88; e-mail: mosharov@ocean.ru

*Гагарин Владимир Иванович* — канд. биол. наук, науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Тел. 8-499-124-77-49; e-mail: gagarin@ocean.ru

*Мошарова Ирина Викторовна* — канд. биол. наук, науч. сотр. кафедры гидробиологии биологического факультета МГУ. Тел. 8-495-939-25-73; e-mail: ivmpost@mail.ru