

**ФИЗИКА. МЕХАНИКА. ХИМИЯ**

doi: 10.51639/2713-0576\_2022\_2\_3\_23

УДК 581.132:574.583

ГРНТИ 34.29.01

**Сезонные изменения первичной продукции в столбе воды и хлорофилла «а» в Карском море по экспедиционным данным**<sup>1\*</sup> Тюрина А. С., <sup>2</sup> Демидов А. Б.<sup>1</sup> *Российский химико-технологический университет имени Д. И. Менделеева  
Россия, Москва, Миусская площадь, 9, стр. 33*<sup>2</sup> *Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН  
Россия, Москва, Нахимовский проспект, 36*email: \* [lnltll@list.ru](mailto:lnltll@list.ru)

Впервые описана картина сезонных изменений продукционных показателей фитопланктона в открытых районах Карского моря. Величины интегральной первичной продукции (ИПП), хлорофилла «а» ( $X_{лфс}$ ) в слое фотосинтеза и на поверхности ( $X_{л0}$ ) в течение вегетационного периода (апрель – октябрь) варьировали в широких пределах. В зависимости от солёности воды, концентрации ИПП и  $X_{л0}$  изменялись по-разному, что обусловлено влиянием речного стока, а соответственно и низкой солёностью воды. В целом, содержание  $X_{л0}$  изменялось в 31,2 раза, а ИПП в 107,3 раза. При этом, в обоих случаях, наибольшие величины наблюдались в июне.

*Ключевые слова:* хлорофилл «а», Карское море, сезонные изменения фитопланктона.

**Введение**

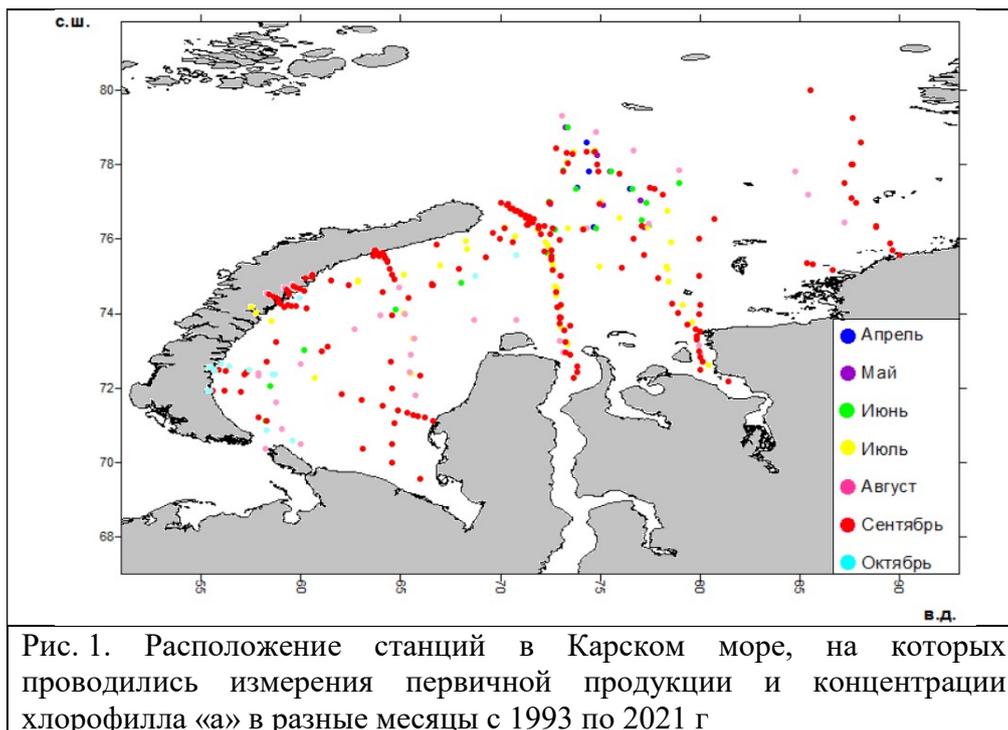
Важным показателем для определения состояния экосистемы Карского моря является сезонная изменчивость продукционных параметров фитопланктона: первичной продукции (ПП) и содержания хлорофилла «а» (Хл). Крайне важно изучать влияние на ПП климатических трендов, поскольку любые глобальные изменения неизбежно отразятся на динамике продукционных показателей фитопланктона.

Эффективная оценка первичной продукции в столбе воды (ИПП) наряду с прямыми экспедиционными измерениями предполагает использование модельных расчетов и спутниковых данных. Один из подходов к оценке ИПП заключается в использовании эмпирических моделей, в которых спутниковые данные являются входящими параметрами. Разработка такого типа алгоритмов предполагает использование натуральных данных. Они используются как изучения количественных связей между интегральными величинами продукционных параметров и их значениями на поверхности, что необходимо для перехода к применению спутниковой информации, получаемой из подповерхностного слоя океана. Небольшое количество полевых данных затрудняет разработку алгоритмов расчета ИПП и ограничивает использование спутниковой информации для труднодоступных районов Арктического океана, к которым относится Карское море. Однако интенсификация исследований этого региона в последние две декады (с 2007 г. по настоящее время) позволяет в основном восстановить картину сезонных изменений ИПП, что позволит в дальнейшем оценить ее годовую величину по экспедиционным данным и провести сравнение с полученными ранее оценками с использованием спутниковой информации.

Таким образом, целью настоящей работы являлось описание сезонные изменения ИПП, хлорофилла «а» на поверхности ( $X_{л0}$ ) и в слое фотосинтеза ( $X_{лфс}$ ) в Карском море по экспедиционным данным.

## Материал и методы

Анализ сезонных изменений ПП и  $X_{л0}$  был впервые проведен на базе имеющихся данных, полученных в период с 1993 по 2021 гг. (табл. 1), собранных на станциях, расположенных по всей акватории Карского моря (рис. 1).



ПП измерялась при помощи радиоуглеродной модификации метода светлых и темных склянок [Steemann Nielsen, 1952]. Постановка опытов осуществлялась по схеме имитации световых условий [Lohrenz, 1993, Steemann Nielsen, 1958] или с помощью модифицированного метода Райтера-Йенча [Ryther, Yentsch, 1957, Demidov et al., 2018]. Расчёты проводились по стандартной формуле [Винберг и др., 1960], в которой общее количество углерода во всех формах углекислоты определяли на каждом горизонте отбора проб. Расчёт ИПП по модифицированному методу Райтера-Йенча [Ryther, Yentsch, 1957, Demidov et al., 2018] осуществлялся с использованием величины ассимиляционного числа (АЧ), рассчитанного для поверхностной пробы, кривых вертикального распределения  $X_{л}$ , подводной освещенности и кривой АЧ, полученной в опытах *insitu* [Demidov et al., 2018].

Концентрацию  $X_{л}$  в большинстве экспедиций измеряли при помощи флуориметрического метода [Holm-Hansen et al., 1965]. Пробы объемом 500 мл фильтровали через стекловолоконистые фильтры марки GF/F фирмы Whatman под вакуумом при разряжении не более 0.3 атм. После фильтрации фильтры высушивали при комнатной температуре в течение 3...4-х часов. Экстрагирование проводили 90 %-ым водным раствором ацетона в течение суток. Флуоресценцию полученных экстрактов измеряли на флуориметре Turner Designs (США) до и после подкисления водным 1 N раствором HCl. Расчёт концентрации  $X_{л}$  и феофитина «а» проводили согласно [Holm-Hansen, Riemann, 1978].

Экспедиционные данные, полученные за период с 1993 по 2021 г.  
([https://www.nodc.noaa.gov/archive/arc0028/0063065/1.1/data/0-data/ARCSS-PP\\_FGDCmetadata.htm](https://www.nodc.noaa.gov/archive/arc0028/0063065/1.1/data/0-data/ARCSS-PP_FGDCmetadata.htm))

Название судна	Год	Месяц	Количество станций
49-й Дмитрий Менделеев	1993	8-9	25
Суда Мурманского морского биологического института	1998	4-7	37
Суда Мурманского морского биологического института	1999	8-10	18
54-й Академик Мстислав Келдыш	2007	9	33
59-й Академик Мстислав Келдыш	2011	9-10	38
125-й Профессор Штокман	2013	9	28
125-й Профессор Штокман	2014	8-9	46
63-й Академик Мстислав Келдыш	2015	8-10	45
66-й Академик Мстислав Келдыш	2016	7-8	63
69-й Академик Мстислав Келдыш	2017	8-9	15
72-й Академик Мстислав Келдыш	2018	8-9	12
76-й Академик Мстислав Келдыш	2019	7-8	40
81-й Академик Мстислав Келдыш	2020	9	26
83-й Академик Мстислав Келдыш	2021	6	11

## Результаты и их обсуждение

### Сезонные изменения содержания $X_{л_0}$

Для изучения сезонных изменений содержания  $X_{л_0}$ , были построены кривые сезонных изменений различных показателей. Для построения графиков за каждый месяц, по всем имеющимся параметрам, были взяты медианы.

На рисунке 2 представлен графики сезонных изменений концентрации  $X_{л_0}$  с апреля по октябрь в зависимости от солёности воды (высокой –  $S > 25$  и низкой –  $S < 25$ ). Разделение массива данных по такому принципу было сделано для того, чтобы проследить различия в характере сезонных изменений продукционных показателей в водах, подверженных интенсивному влиянию речного стока ( $S < 25$ ), и относительно свободных от этого влияния ( $S > 25$ ). Поскольку в апреле, мае и июне нет показателей хлорофилла «а» с низкой солёностью воды, дополнительная кривая в виде общих данных (с низкой и высокой солёностью) полностью совпадает с кривой при высокой солёности.

Медианы концентраций  $X_{л_0}$  возрастали от  $0,11 \text{ мг/м}^3$  в апреле до  $3,433 \text{ мг/м}^3$  в июне с последующим резким снижением до  $0,271 \text{ мг/м}^3$  в июле. Затем, начиная с августа, содержание  $X_{л_0}$  увеличивалось и достигало второго пика в сентябре со значением  $0,655 \text{ мг/м}^3$  и, далее, снижалось к октябрю до  $0,482 \text{ мг/м}^3$ . Если отдельно рассматривать средние значения концентраций  $X_{л_0}$  только при  $S > 25$ , то с июля по октябрь концентрация постепенно возрастает до октября ( $0,452 \text{ мг/м}^3$ ), не демонстрируя пика в сентябре.

Имеющиеся значения концентраций  $X_{л_0}$  при низкой солёности с июля по октябрь, достаточно сильно отличаются от значений при высокой солёности воды за эти месяцы. Кривая изменений  $X_{л_0}$  при  $S < 25$  с июля по октябрь имела тенденцию к постепенному

снижению от  $1,507 \text{ мг/м}^3$  (июль) до  $0,87 \text{ мг/м}^3$  (октябрь). Так, в июле концентрация  $\text{Хл}_0$  при  $S < 25$  в 9,6 раз превышает значение этого показателя при  $S > 25$ ,  $1,507 \text{ мг/м}^3$  и  $0,157 \text{ мг/м}^3$  соответственно. А в октябре этот показатель различается в 1,9 раза при значениях  $0,87 \text{ мг/м}^3$  и  $0,452 \text{ мг/м}^3$  (при  $S < 25$  и  $S > 25$  соответственно).

На рисунке 2 видно, что концентрация  $\text{Хл}_0$  в течение вегетационного периода (апрель-октябрь) в Карском море варьировала в широких пределах. В целом содержание  $\text{Хл}_0$  изменялось в 31,2 раза, от  $0,11 \text{ мг/м}^3$  в апреле до  $3,433 \text{ мг/м}^3$  в июне.

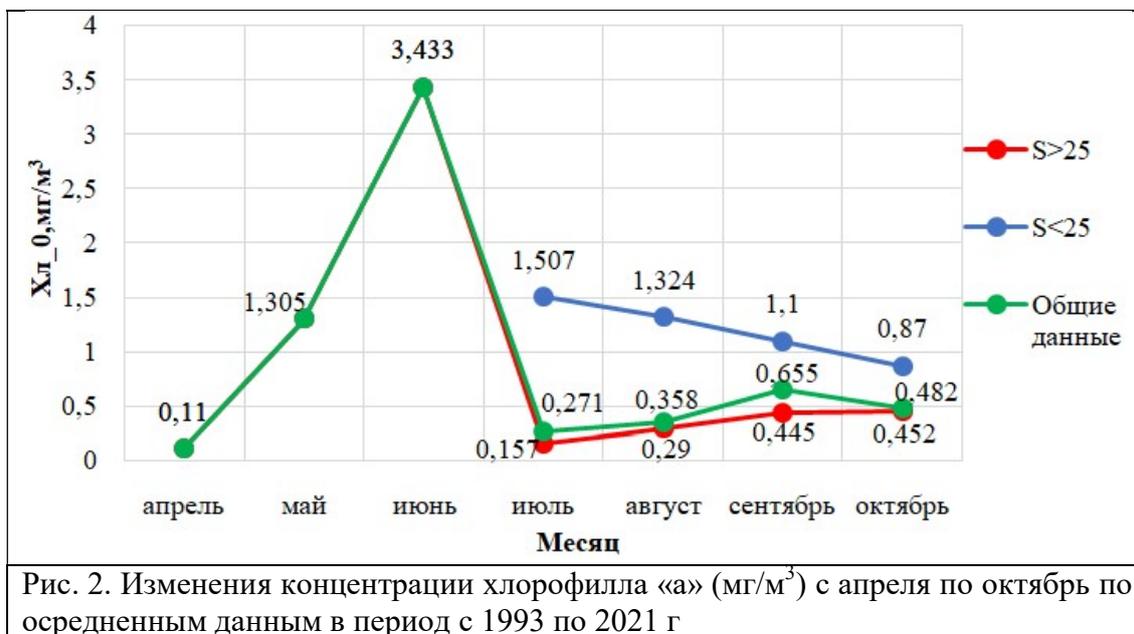


Рис. 2. Изменения концентрации хлорофилла «а» ( $\text{мг/м}^3$ ) с апреля по октябрь по осредненным данным в период с 1993 по 2021 г

### Изменения в течение года ИПП

На рисунке 3 представлен график с тремя кривыми, на двух из которых показаны изменения ИПП в зависимости от солености воды. Дополнительно была построена третья кривая, на которой отображены общие данные (независимо от солености воды). Стоит заметить, что с апреля по июль данные по ИПП при низкой солености воды отсутствуют.

Если говорить о кривой с обобщенными данными, то содержание ИПП в водах Карского моря с апреля по октябрь изменяется в 107,3 раза. Наименьший показатель в октябре –  $7 \text{ мгС/м}^2$  в день и наибольший в июне –  $751 \text{ мгС/м}^2$  в день.

Среднемесячные величины ИПП возрастали с апреля ( $53 \text{ мгС/м}^2$  в день), достигали максимума в июне ( $751 \text{ мгС/м}^2$  в день) и резко опускались в июле ( $163,5 \text{ мгС/м}^2$  в день), после чего постепенно снижались к концу вегетационного сезона (рис. 3).

При высокой солености воды ( $S > 25$ ) величины ИПП имели тенденцию к постепенному снижению с июля по октябрь (от  $153,5 \text{ мгС/м}^2$  в день до  $6 \text{ мгС/м}^2$  в день соответственно). Величины ИПП при низкой солености ( $S < 25$ ) с июля по август возрастают от  $175,5$  до  $195,5 \text{ мгС/м}^2$  в день, а потом резко снижаются до  $63,5 \text{ мгС/м}^2$  в день в сентябре. Значения ИПП достигают минимума в октябре ( $13 \text{ мгС/м}^2$  в день).

При сопоставлении рис. 3 и рис. 4 обращает на себя внимание большая вариабельность величин ИПП, чем  $\text{Хл}_0$  и  $\text{Хл}_{\text{фс}}$ . В разные месяцы отношение максимальных значений  $\text{Хл}_0$  к минимальным изменяется от 0,11 до 3,43;  $\text{Хл}_{\text{фс}}$  - от 5,83 до 89,36; ИПП – от 7 до 751. Это связано, по-видимому, с тем, что кроме пространственной неоднородности и межгодовой изменчивости на большой разброс величин ИПП в течение года, по сравнению с содержанием хлорофилла, оказывают большое влияние изменения от дня ко дню приходящей фотосинтетически активной радиации (ФАР).

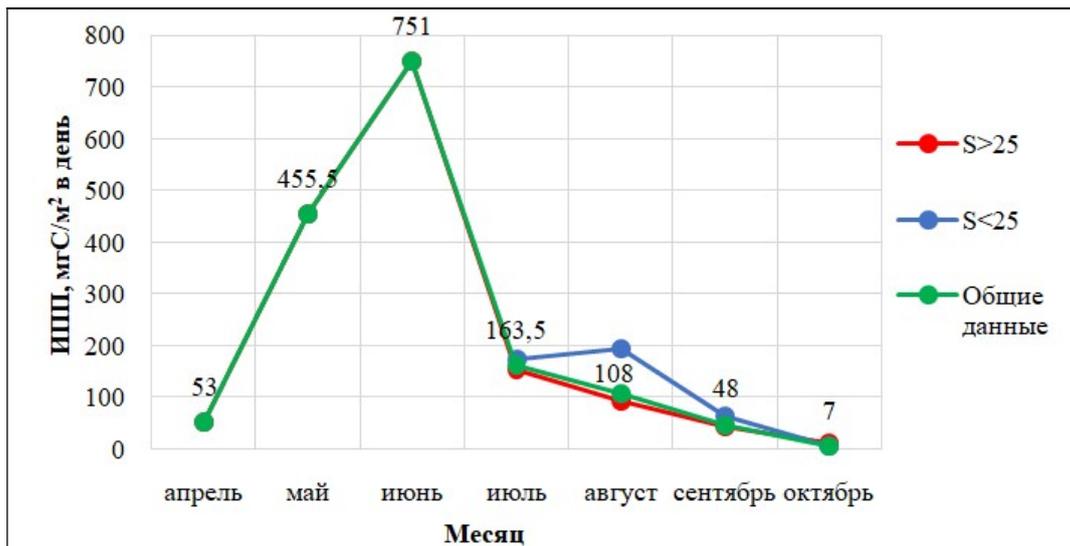


Рис. 3. Изменения интегральной первичной продукции с апреля по октябрь по осредненным данным за период с 1993 по 2021 г

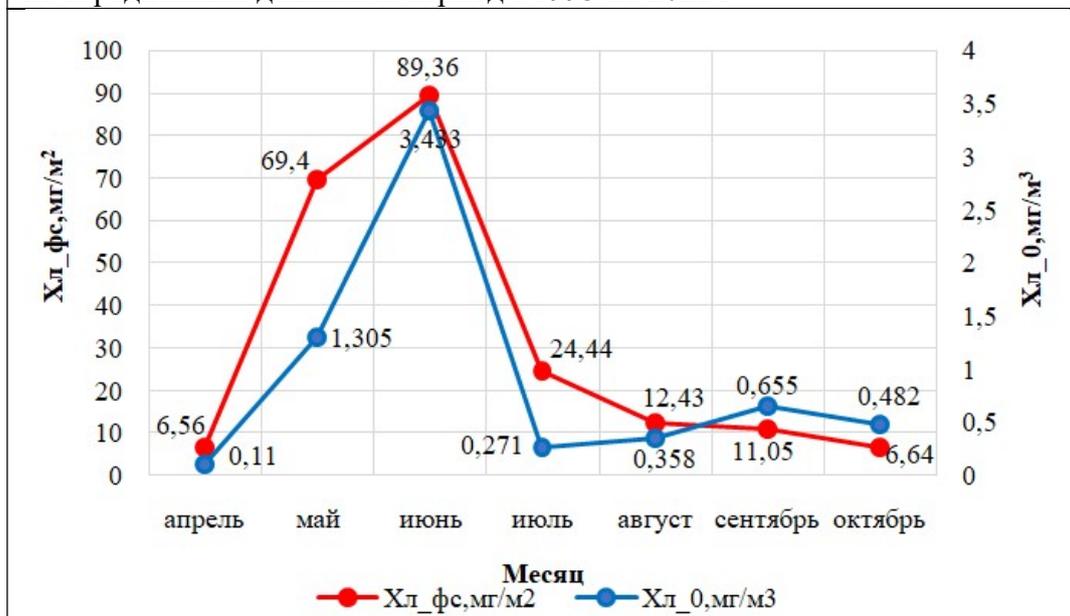


Рис. 4. Изменения концентраций хлорофилла «а» в слое фотосинтеза и поверхностного хлорофилла «а» с апреля по октябрь по осредненным данным в период с 1993 по 2021 г

В настоящей работе впервые описаны сезонные изменения продукционных параметров фитопланктона в Карском море по данным полевых наблюдений. Впервые для открытых районов моря зарегистрированы высокие ( $> 500 \text{ мгС/м}^2$  в день для ИПП и  $> 1 \text{ мг/м}^3$  для  $\text{Хл}_0$ ) величины весной, что свидетельствует о «цветении» фитопланктона, явлении, ранее не регистрирующимся для этих акваторий. Учет весеннего максимума ИПП в дальнейшем может быть использован для ревизии данных о годовой ПП Карского моря, полученных ранее по спутниковым данным и модельным расчетам [Демидов и др., 2018].

### Конфликт интересов

Авторы статьи заявляют, что у них нет конфликта интересов по материалам данной статьи с третьими лицами на момент подачи статьи в редакцию журнала, и им ничего не известно о возможных конфликтах интересов в настоящем со стороны третьих лиц.

**Список литературы**

1. ARCSS-PP Arctic System Science Primary Production Marine primary production in the Arctic Ocean 1954-2007// [URL:https://www.nodc.noaa.gov/archive/arc0028/0063065/1.1/data/0-data/ARCSS-PP\\_FGDCmetadata.htm](https://www.nodc.noaa.gov/archive/arc0028/0063065/1.1/data/0-data/ARCSS-PP_FGDCmetadata.htm)
2. Винберг Г.Г., Кабанова Ю.Г., Кобленц-Мишке О.И. и др. Методическое пособие по определению первичной продукции органического вещества в водоемах радиоуглеродным методом. Минск: Изд-во Белорус. гос. ун-та, 1960. 26 с.
3. А. Б. Демидов, С. В. Шеберстов, В. И. Гагарин, П. В. Хлебопашев. Сезонная изменчивость первичной продукции фитопланктона Карского моря по спутниковым данным. Океанология. 2017, том 57, № 1, с. 103–117
4. А. Б. Демидов, С. В. Шеберстов, В. И. Гагарин // Оценка годовой величины первичной продукции Карского моря // Океанология. - 2018. - №3. - С. 391-403.
5. Demidov A.B., Gagarin V.I., Vorobieva O.V. et al. Spatial and vertical variability of primary production in the Kara Sea in July and August 2016: The influence of the river plume and subsurface chlorophyll maxima // Pol. Biol. 2018. V. 41. № 3. P. 563–578.
6. Lohrenz S.E. Estimation of primary production by the simulated in situ method // ICES mar. Sci. Symp. 1993. V. 197. P. 159–171.
7. Ryther J.H., Yentsch C.S. The estimation of phytoplankton production in the ocean from chlorophyll and light data. Limnol. Ocenogr. 1957. V. 2. P. 281-286.
8. Steemann Nielsen E. The use of radioactive carbon (C14) for measuring organic production in the sea // J.Cons. Perm. Ins. Explor. Mer. 1952. № 18. P. 117–140.
9. Holm-Hansen O., Lorenzen C.J., Holmes R.W., Strickland J.D.H. Fluorometric determination of chlorophyll // J. Cons. Perm. Int. Explor. Mer. 1965. V. 30. P. 3–15.
10. Holm-Hansen O., Riemann B. Chlorophyll a determination: improvements in methodology // Oikos. 1978. V. 30. P. 438–447.

**Seasonal changes in primary production in the water column and chlorophyll «a»  
in the Kara Sea according to expedition data**

<sup>1</sup> Tyurina A. S., <sup>2</sup> Demidov A. B.

<sup>1</sup> *Russian University of Chemical Technology named after D. I. Mendeleev  
Russia, Moscow, Miusskaya square, 9, building 33*

<sup>2</sup> *Institute of Oceanology P. P. Shirshov RAS  
Russia, Moscow, Nakhimovsky prospect, 36*

The pattern of seasonal changes in phytoplankton production indicators in the open areas of the Kara Sea is described for the first time. The values of integral primary production (IPP) of chlorophyll «a» (Chl<sub>phs</sub>) in the photosynthesis layer and on the surface (Chl<sub>0</sub>) during the growing season (April–October) varied widely. Depending on the salinity of the water, the concentrations of IPP and Chl<sub>0</sub> changed differently, which is due to the influence of the river runoff, and, accordingly, the low salinity of the water. In general, the content of Chl<sub>0</sub> changed by 31,2 times, and IPP by 107,3 times. At the same time, in both cases, the largest values were observed in June.

*Keywords:* chlorophyll «a», Kara Sea, seasonal changes in phytoplankton.