

## ПИКОФИТОПЛАНКТОН МОРЯ ЛАПТЕВЫХ В ОСЕННИЙ ПЕРИОД

Т. А. Белевич<sup>1,2,\*</sup>, Л. В. Ильяш<sup>2</sup>, Е. Г. Арашкевич<sup>1</sup>,  
член-корреспондент РАН М. В. Флинт<sup>1</sup>

Поступило 10.08.2018 г.

Численность и биомасса пикофитопланктона, суммарная концентрация хлорофилла “а” ( $XL_{\text{сум}}$ ), вклад пикофракции ( $XL_{\text{пико}}$ ) в  $XL_{\text{сум}}$  оценены в море Лаптевых в сентябре 2017 г., при этом оценки для западной части моря получены впервые. Не выявлено увеличения обилия пикофитопланктона в восточной части моря по сравнению с данными 1991 г. Вклад  $XL_{\text{пико}}$  в  $XL_{\text{сум}}$  был наибольшим (до 56%) на акваториях с низкими значениями  $XL_{\text{сум}}$ .

*Ключевые слова:* пикофитопланктон, море Лаптевых, Арктика, хлорофилл “а”, цианобактерии, пикоэукариоты.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524845619-623>

Климатические изменения, происходящие в последние десятилетия в Арктике, привели к существенным изменениям абиотических условий в эпиконтинентальных арктических морях. В частности, уменьшилась ледовитость в летний сезон, возросла температура поверхностного слоя моря [1], увеличились объём речного стока и связанное с ним опреснение верхнего квазиоднородного слоя [2], что привело к усилению стратификации водной толщи и, соответственно, уменьшению поступления биогенных элементов в фотический слой [3]. Эти тенденции, прежде всего, повлияли на условия существования базового трофического звена арктических экосистем — фитопланктона. Прогнозируется, что изменения пелагической морской среды, происходящие в арктическом регионе, приведут к возрастанию роли пикоформ — клеток размером менее 3 мкм — в формировании первичной продукции фитопланктона и увеличению доли этих мельчайших фотоавтотрофов в суммарной биомассе планктонных водорослей [4]. Увеличение численности и биомассы пикофитопланктона (ПФ) в последние десятилетия уже выявлено в ряде арктических районов, в частности в море Бофорта [5]. Изменения размерной структуры фитопланктона может сказаться на отклике фитопланктона на

прогрессирующее опреснение поверхностного слоя моря, изменения биогенного режима и потоков вещества в арктических экосистемах. Всё это делает актуальной и важной с прогностической точки зрения оценку биомассы ПФ и роли пикофракции в фитопланктонах разных биотопов арктических морей.

В большинстве работ, посвящённых фитопланктону Российской Арктики, сведения о пикофракции фитопланктона отсутствуют, что в основном связано с методологическими трудностями учёта пикоформ и априорной недооценкой возможной роли пикофитопланктона в арктических фитопланктонах. В море Лаптевых до настоящего времени единственные оценки обилия ПФ были получены в восточной части бассейна в сентябре 1991 г. [6].

Море Лаптевых существенно неоднородно по абиотическим условиям, что определяется, прежде всего, различиями в воздействии континентального стока и вод глубокого бассейна на его западную и восточную части [7]. Шельф западной части находится под влиянием сравнительно небольшого стока вод реки Хатанга, поступающих через пролив Вилькицкого из Карского моря, и модифицированных высокосолёных вод атлантического происхождения из глубоководной части бассейна, проникновение которых в область шельфа провоцируется существующим в этом районе бассейна мощным подводным каньоном. Шельф восточной части находится под влиянием мощного стока реки Лены — второго по величине в Арктике [8]. Распространение опреснённых

<sup>1</sup> Институт океанологии им. П.П. Ширшова  
Российской Академии наук, Москва

<sup>2</sup> Московский государственный университет  
им. М.В. Ломоносова

\* E-mail: belevich@mail.bio.msu.ru

речным стоком вод в поверхностном слое моря Лаптевых имеет в основном северное направление, и их влияние прослеживается вплоть до континентального склона [9]. Скорость распространения речного опреснения в море, мезомасштабная конфигурация опреснённых “линз”, формирование меандров в значительной мере определяются преобладающими ветрами.

Целью настоящего исследования было получить оценки численности, биомассы ПФ, содержания хлорофилла “а” в пикофракции и вклада пикоформ в общую концентрацию хлорофилла “а” в западной и восточной частях моря Лаптевых, сравнить параметры обилия ПФ в этих районах, различающихся по абиотическим условиям, сравнить оценки обилия ПФ в восточной части моря, полученные в 2017 г., с оценками сентября 1991 г. для проверки гипотезы о возможном возрастании численности и биомассы пикоформ в связи с потеплением Арктики в последние декады.

Материал был получен в 69-м рейсе нис “Академик Мстислав Келдыш” в сентябре 2017 г. на 5 станциях в западной части и 4 станциях в восточной части моря Лаптевых (рис. 1). Отбор проб на части станций (№ 5590, 5591, 5592 и 5596) был выполнен дважды с интервалом в 2 недели (табл. 1).

Распределение температуры, солёности, интенсивности флуоресценции хлорофилла, плотности оценивали на основании данных вертикального зондирования STD-зондом SeaBird-911, вооружённого флуориметром. За нижнюю границу фотической зоны принимали глубину проникновения 1% фотосинтетически активной радиации. Пробы воды на станциях отбирали батометрами комплекса SBE 32 в пределах фотической зоны: в верхнем квазиоднородном слое, в

пикногалоклине и/или в слое максимума флуоресценции и с горизонтов ниже пикноклина. Всего отобраны и проанализированы 44 пробы.

Подсчёт клеток ПФ в пробах проводили с использованием проточного цитометра Accury C6 (BD Bioscience, США), а также люминесцентного микроскопа Leica DM1000 по методике, изложенной в работе [10]. Использование двух методов учёта повышает точность оценок отдельных компонентов ПФ, поскольку цитометр Accury C6 даёт недоучёт цианобактерий [11].

При определении концентрации суммарного хлорофилла “а” ( $ХЛ_{сум}$ ) пробы воды объёмом 0,5–1 л фильтровали через фильтры GF/F. Для определения концентрации хлорофилла “а” пикофракции ( $ХЛ_{пико}$ ) пробы воды объёмом 0,5–1 л предварительно профильтровывали методом обратной фильтрации через фильтр с диаметром пор 3 мкм. Полученный фильтрат осаждали на фильтры GF/F. Концентрацию  $ХЛ_{сум}$  и  $ХЛ_{пико}$  определяли флуориметрически в ацетоновом экстракте [12], используя флуориметр Trilogy Turner Designs (США).

Достоверность различий средних значений биомассы оценивали по критерию Манна–Уитни. Для оценки зависимости между параметрами рассчитывали коэффициент корреляции Спирмена ( $R_s$ ).

С о с т а в П Ф. Пикофитопланктон в районе исследований был представлен цианобактериями и эукариотическими водорослями. На всех станциях по численности и биомассе преобладали пикоэукариоты, вклад цианобактерий в суммарную биомассу ПФ не превышал 4%.

К о н ц е н т р а ц и я х л о р о ф и л л а “ а ”. В конце августа — второй половине сентября в восточной части моря средние для фотического слоя значения  $ХЛ_{сум}$  варьировались от 0,06 до 1,89 мг/м<sup>3</sup> (табл. 1). Последнее значение является высоким для сибирских арктических морей. При этом самое низкое и самое высокое значения  $ХЛ_{сум}$  зафиксированы на одной и той же ст. 5596 с интервалом в две недели. Существенное снижение солёности поверхностного слоя (0–5 м) при повторных наблюдениях (ст. 5596\_2) даёт основание полагать, что увеличение  $ХЛ_{сум}$  обусловлено увеличением влияния вод реки Лена и/или губы Буор-Хая на район станции. Значения  $ХЛ_{сум}$  в дельте Лены и губе Буор-Хая существенно выше таковых на шельфе моря [13]. Влияние опреснённых вод сказывалось и на расположенной севернее ст. 5592, где также отмечено снижение солёности поверхностного слоя и небольшое увеличение  $ХЛ_{сум}$ . Полученные оценки  $ХЛ_{сум}$  в восточной части моря в целом сопоставимы с таковыми для сентября 2015 г. [14].

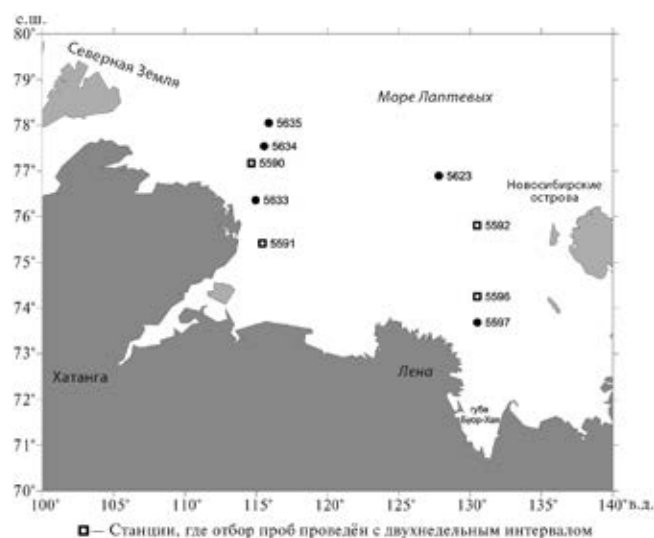


Рис. 1. Схема расположения станций.

**Таблица 1.** Глубина на станциях ( $H$ , м), глубина фотического (ФС, м), температура ( $T_0$ , °C) и солёность ( $S_0$ , епс) поверхностного слоя моря, суммарная численность ( $N_{\text{пико}}$ ,  $10^9$  кл/м<sup>3</sup>) и биомасса ( $B_{\text{пико}}$ , мг С/м<sup>3</sup>) пикофитопланктона, биомасса фотосинтезирующих пикоэукариот ( $B_{\text{эук}}$ , мг С/м<sup>3</sup>), биомасса пикоцианобактерий ( $B_{\text{циан}}$ , мг С/м<sup>3</sup>), суммарная концентрация хлорофилла “а” ( $ХЛ_{\text{сум}}$ , мг/м<sup>3</sup>), концентрация хлорофилла “а” пиководорослей ( $ХЛ_{\text{пико}}$ , мг/м<sup>3</sup>), вклад хлорофилла “а” пиководорослей в суммарный хлорофилл “а” (вклад) в море Лаптевых в сентябре 2017 г.

Дата	Станция	$H$	ФС	$T_0$	$S_0$	Среднее для ФС						
						$N_{\text{пико}}$	$B_{\text{пико}}$	$B_{\text{эук}}$	$B_{\text{циан}}$	$ХЛ_{\text{сум}}$	$ХЛ_{\text{пико}}$	Вклад, %
Восточная часть												
03.09.	5597	20	11	5,08	13,40	5,90	4,41	4,41	0,000	0,33	0,18	54
03.09.	5596	24	17	3,79	17,31	1,91	1,10	1,09	0,010	0,06	0,03	50
14.09.	5596_2	24	6	4,56	6,61	30,52	17,01	16,83	0,180	1,89	0,36	19
03.09.	5592	45	25	2,09	25,73	0,53	0,64	0,63	0,010	0,07	0,02	28
14.09.	5592_2	45	25	2,11	18,03	4,21	2,60	2,56	0,044	0,12	0,05	40
15.09.	5623	62	58	2,74	22,64	0,77	1,51	1,51	0,000	0,07	0,04	55
Западная часть												
01.09.	5591	43	14	3,45	21,53	6,85	10,41	10,38	0,023	0,33	0,15	45
18.09.	5591_2	43	26	2,31	22,33	2,62	3,49	3,49	0,000	0,21	0,06	29
18.09.	5633	44	30	1,52	27,85	3,06	2,65	2,72	0,100	0,38	0,10	26
31.08.	5590	63	62	1,91	32,17	3,62	2,29	2,29	0,000	0,10	0,06	56
19.09.	5590_2	63	31	0,66	31,59	5,53	4,90	4,90	0,004	0,27	0,09	33
19.09.	5634	186	29	-0,39	29,98	8,05	5,72	5,72	0,001	0,40	0,15	38
19.09.	5635	857	36	-1,35	32,26	1,66	2,24	2,23	0,005	0,64	0,07	11

В западной части моря значения  $ХЛ_{\text{сум}}$  в фотическом слое варьировались в меньшей степени ( $CV = 51\%$ ), изменяясь от 0,1 до 0,64 мг/м<sup>3</sup>. Наибольшее значение  $ХЛ_{\text{сум}}$  отмечено на ст. 5635 на севере бассейна в районе континентального склона. На этой станции в слое 20–30 м был отмечен заглубленный максимум хлорофилла, в котором на глубине 27 м концентрация  $ХЛ_{\text{сум}}$  была в 3 раза больше, чем в подповерхностном слое, что и обусловило самое высокое для западной части интегральное значение  $ХЛ_{\text{сум}}$  в фотическом слое.

Несмотря на различие абиотических условий — интенсивности речного стока, солёности и температуры поверхностного слоя моря, средние значения  $ХЛ_{\text{сум}}$  в восточной и западной частях моря достоверно не различались.

**Численность и биомасса ПФ.** Численность ( $N_{\text{пико}}$ ) и биомасса ( $B_{\text{пико}}$ ) ПФ в фотическом слое восточной части существенно варьировались, составляя в среднем  $7,3 \cdot 10^9$  кл/м<sup>3</sup> ( $CV = 158\%$ ) и  $4,6$  мг С/м<sup>3</sup> ( $CV = 138\%$ ) соответственно. В западной части обилие ПФ изменялось в меньшей степени, средние значения численности составили  $4,5 \cdot 10^9$  кл/м<sup>3</sup> ( $CV = 33\%$ ), биомассы —  $4,5$  мг С/м<sup>3</sup> ( $CV = 64\%$ ). Средние значения численности и биомассы пикофитопланктона в восточной и западной частях достоверно не отличались.

Наиболее высокое обилие ПФ в восточной части отмечено на ст. 5596\_2. Это согласуется с предположением о более интенсивной интрузии опреснённых стоком Лены вод в северном направлении во время повторных наблюдений в восточной части, поскольку в сентябре численность и биомасса пикофитопланктона в дельте Лены и губе Буор-Хая существенно выше, чем на срединном шельфе [6].

Содержание хлорофилла “а” в пикофракции. Между биомассой пикоформ, оценённой в единицах углерода, и концентрацией  $ХЛ_{\text{пико}}$  выявлена высоко достоверная корреляция ( $R_s = 0,89$ ;  $p = 0,0004$ ). Это свидетельствует о том, что величины  $ХЛ_{\text{пико}}$ , полученные с использованием метода фракционной фильтрации, адекватно характеризуют биомассу фотосинтезирующего пикопланктона.

Наибольшие значения  $ХЛ_{\text{пико}}$  были отмечены на ст. 5596\_2, что согласуется с наибольшими  $N_{\text{пико}}$  и  $B_{\text{пико}}$  в районе интенсивного опресняющего воздействия ленских вод. В восточной части концентрация  $ХЛ_{\text{пико}}$  изменялась в большей степени ( $CV = 119\%$ ), чем в западной ( $CV = 40\%$ ). При этом средние значения содержания  $ХЛ_{\text{пико}}$  достоверно не различались.

В целом на исследованной акватории вклад  $ХЛ_{\text{пико}}$  в  $ХЛ_{\text{сум}}$  изменялся от 11 до 56% и составлял в среднем 37%, что соответствует оценке в 35%

для шельфовой станции моря Лаптевых в 2012 г. [15]. Наибольший вклад пикофракции отмечен на акваториях с низкими значениями  $XL_{\text{сум}}$ . Между  $XL_{\text{сум}}$  и вкладом пикоформ выявлена достоверная отрицательная корреляция ( $R_s = -0,609$ ;  $p = 0,03$ ).

Обилие ПФ в восточной части моря Лаптевых в 2017 и 1991 г. В 1991 г. оценки численности и биомассы ПФ получены только для поверхностного горизонта. Наши данные 2017 г. показывают, что в поверхностном слое восточной части величина  $N_{\text{пико}}$  изменялась в пределах  $(1,2-25,3) \cdot 10^9$  кл/м<sup>3</sup>,  $B_{\text{пико}}$  — от 1,1 до 17 мг С/м<sup>3</sup>. Наблюдения, выполненные в море Лаптевых в сентябре 1991 г., дали более высокие оценки для открытых районов бассейна:  $(26,8 \pm 13) \cdot 10^9$  кл/м<sup>3</sup>, 10–30 мг С/м<sup>3</sup> соответственно [6]. Это позволяет говорить, что по крайней мере в восточной части обилие ПФ в самое тёплое для района время (начало осеннего сезона) за почти три десятилетия не возросло. Это отличает шельф моря Лаптевых от моря Бофорта, где численность пикоэукариот в осенний период с 2002 по 2011 г. возросла почти в два раза [5]. На отсутствие увеличения обилия ПФ в восточной части указывает и сравнение данных по содержанию  $XL_{\text{пико}}$ . В 1991 г. [13] оно было выше, чем в 2017 г.:  $0,63 \pm 0,19$  мг/м<sup>3</sup>,  $0,14 \pm 0,12$  мг/м<sup>3</sup> соответственно. Различия в тенденциях изменения обилия ПФ в море Лаптевых и море Бофорта могут объясняться большей выраженностью климатических трендов в море Бофорта [1].

Таким образом, полученные материалы показывают, что при существенных отличиях абиотических условий в восточной и западной частях моря Лаптевых средние значения  $XL_{\text{сум}}$ ,  $N_{\text{пико}}$ ,  $B_{\text{пико}}$ ,  $XL_{\text{пико}}$  и его вклада в  $XL_{\text{сум}}$  в этих районах в начале осеннего сезона достоверно не различались. Изменение опресняющего влияния стока р. Лены на шельфовые районы восточной части моря приводят к существенным изменениям в количественных характеристиках пикофракции фитопланктона и  $XL_{\text{сум}}$ , которые проявляются за двухнедельный срок. Вклад  $XL_{\text{пико}}$  в  $XL_{\text{сум}}$  был наибольшим (до 56%) на акваториях с низкими значениями  $XL_{\text{сум}}$ . Не выявлено увеличения обилия ПФ в восточной части моря Лаптевых в конце вегетационного сезона по сравнению с оценками 1991 г.

**Источник финансирования.** Экспедиционные исследования поддержаны РФФ (проект № 14–50–00095), обработка и анализ полученных результатов выполнены в рамках Государственного задания МГУ им. М.В. Ломоносова, часть 2 (тема № АААА-А16-116021660052-0) и при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18–05–60069).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polyak L., Alley R.B., Andrews J.T. et al. // Quatern. Sci. Rev. 2010. V. 29. P. 1757–1778.
2. Peterson B.J., McClelland J., Curry R., et al. // Science. 2006. V. 313. P. 1061–1066.
3. McLaughlin F.A., Carmack E.C. // Geophys. Res. Lett. 2010. V. 37. L24602. doi:10.1029/2010GL045459.
4. Li W. K.W., Carmack E.C., McLaughlin F.A., et al. // J. Geophys. Res. Oceans. 2013. V. 118. P. 5750–5759.
5. Blais M., Ardyna M., Gosselin M., et al. // Limnol. and Oceanogr. 2017. V. 62. P. 2480–2497.
6. Moreira-Turcq P.F., Cauwet G., Martin J.M. // Hydrobiologia. 2001. V. 462. P. 157–168.
7. Bauch D., Torres-Valdes S., Polyakov I., et al. // Ocean Sci. 2014. V. 10. P. 141–154.
8. Gordeev V.V., Martin J.M., Sidorov I.S., et al. // Amer. J. Sci. 1996. 296. P. 664–691.
9. Heim B., Abramova E., Doerffer R., et al. // Biogeosci. Discuss. 2013. V. 10. P. 3849–3889.
10. Belevich T.A., Ilyash L.V., Milyutina I.A., et al. // Moscow Univ. Biol. Sci. Bull. 2017. V. 72. № 3. P. 109–114.
11. Ribeiro C.G., Dominique M.D., dos Santos A. L., et al. // Limnol. and Oceanogr: Methods. 2016. DOI: 10.1002/lom3.10135.
12. Arar E.J., Collins G.B. Method 445.0. *in vitro* Determination of Chlorophyll “a” and Pheophytin “a” in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence. Rev. 1.2. Cincinnati: U.S. Environ. Protection Agency, 1997. 22 p.
13. Heiskanen A.-S., Keck A. // Mar. Chem. 1996. V. 53. P. 229–245.
14. Суханова И.Н., Флинт М.В., Георгиева Е. Ю., и др. // Океанология. 2017. Т. 57. № 1. С. 86–102.
15. Metfies K., von Appen W.-J., Kiliass E., et al. // PLoS ONE. 2016. V. 11. № 2. e0148512. DOI:10.1371/journal.pone.0148512.

**PICOPHYTOPLANKTON OF THE LAPTEV SEA IN THE AUTUMN**

**T. A. Belevich<sup>1,2</sup>, L. V. Ilyash<sup>2</sup>, E. G. Arashkevich<sup>1</sup>,  
Corresponding Member of the RAS M. V. Flint<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

Received August 10, 2018

The abundance and biomass of picophytoplankton, the total concentration of chlorophyll “a”, and the contribution of the picofraction to chlorophyll “a” were studied in the Laptev Sea in 2017. These were the first data for the western sea area. An increase in picophytoplankton abundance in the eastern part of the sea in comparison with that in 1991 was not revealed. The contribution of the picofraction to chlorophyll “a” was the highest (to 56%) in areas with a low total concentration of chlorophyll “a”.

*Keywords:* picophytoplankton, the Laptev Sea, Arctic, chlorophyll “a”, cyanobacteria, picoeukaryotes.