

Д. Г. Гоголев, Т. В. Буканова, Е. А. Кудрявцева

КОНЦЕНТРАЦИЯ ХЛОРОФИЛЛА «А»  
В ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ  
ЛЕТОМ 2018 ГОДА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ

Работа посвящена исследованию изменения концентрации хлорофилла «а» в юго-восточной части Балтийского моря в летний период 2018 г. Для анализа использованы данные радиометра MODIS, установленного на спутниках Aqua и Terra. Средняя концентрация хлорофилла «а» в теплый период 2018 г. (май-август) составила  $3,8 \pm 1,1$  мг/м<sup>3</sup> при средней температуре поверхности моря  $17,7 \pm 4,6$  °С. Максимум концентрации хлорофилла «а» (8,1 мг/м<sup>3</sup>) зафиксирован в мае. Однако наиболее массовое развитие фитопланктона пришлось на июль – средняя за месяц концентрация хлорофилла «а» была максимальной,  $4,2 \pm 0,8$  мг/м<sup>3</sup>. Самым теплым месяцем был август, когда отмечен пик температуры поверхности моря (24,7°С) и среднемесячная температура достигла  $21,8 \pm 1,8$  °С, что выше среднееголетнего значения для августа на 2,8°С. В целом концентрация хлорофилла «а» в исследуемый период была на уровне средних многолетних значений, а температура поверхности моря оказалась выше среднего для 2003 – 2016 гг. на 2,4°С. Прямого влияния аномалии погоды 2018 г., вызвавшей прогрев вод выше среднееголетнего уровня, на среднемесячные концентрации хлорофилла «а» не выявлено, что свидетельствует об устойчивом состоянии и запасе прочности экосистемы юго-востока Балтийского моря к изменчивости условий окружающей среды в масштабе нескольких лет.

The study focuses on chlorophyll "a" concentration variability in the South-Eastern part of the Baltic sea in summer 2018. The data of the MODIS radiometer installed on Aqua and Terra satellites were used for the analysis. The average concentration of chlorophyll "a" in the warm period of 2018 (May-August) was 3.8 mg/m<sup>3</sup> while the average sea surface temperature was 17.7°С. The Maximum concentration of chlorophyll "a" (8.1 mg/m<sup>3</sup>) was recorded in May. However, the most massive development of phytoplankton occurred in July – the average monthly concentration of chlorophyll "a" was the highest and exceeded 4.2 mg/m<sup>3</sup>. August was the warmest month, when the peak sea surface temperature (24.7°С) was observed, and the average monthly temperature reached 21.8°С, which is higher than the average annual value for August (2.8°С). Thus chlorophyll "a" concentration for the period under study was revealed at the average multiyear level, and the sea surface temperature was higher than the average for 2003 – 2016 by 2.4°С. The direct influence of the weather anomaly of 2018, which caused the water warming above the long-term average level, on the monthly average concentrations of chlorophyll "a" was not revealed, that indicates a sustainable state and strength of the south-eastern Baltic Sea ecosystem towards the variability of environmental conditions over several years.

**Ключевые слова:** концентрация хлорофилла «а», температура поверхности моря, спутниковые данные MODIS, Балтийское море.

**Keywords:** chlorophyll «a» concentration, sea surface temperature, MODIS satellite data, Baltic Sea.



## Введение

На сегодняшний день наиболее актуальной из экологических проблем бассейна Балтийского моря стала проблема эвтрофикации — повышения биологической продуктивности вод при избыточном поступлении биогенных элементов [1–3]. Среди всех районов Балтийского моря именно юго-восточная часть (включая Гданьский залив, Калининградский и Куршский заливы) относятся к наиболее эвтрофированным акваториям [1; 4; 5].

Для оценки эвтрофирования используются следующие показатели: количественные показатели концентрации биогенных элементов — азота и фосфора, а также биомассы и видового состава фитопланктона, концентрации хлорофилла «а», скорости продукции биологического вещества, содержание кислорода и прозрачность вод [6; 7]. Среди перечисленных индикаторов особо выделяется фитопланктон — начальное звено трофической цепи и главный продуцент органического вещества в водоемах. Изучение информации о биомассе и скорости продукции фитопланктона приобретает исключительную важность при комплексном анализе состояния водоемов. Для измерения показателей биомассы фитопланктона удобно использовать хлорофилл «а», так как он является главным фотосинтетически активным пигментом фитопланктона и преобладает во всех группах водорослей [8]. Пространственно-временная изменчивость концентрации хлорофилла «а» с этой точки зрения становится важнейшим индикатором в изучении эвтрофирования и качества вод [9; 10]. Концентрации хлорофилла «а» может изучаться с помощью спутниковых данных в любой акватории Мирового океана практически ежедневно [11].

Тридцатилетняя история наблюдений в открытой части Балтийского моря (1974–2006) показала, что средняя концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое составляла  $2 \text{ мг/м}^3$  [7]. Концентрация хлорофилла «а» неодинакова в различных районах Балтийского моря и напрямую зависит от условий среды.

По данным Литовской гидрометеорологической службы, летом 2018 г. из-за аномально жаркого лета температура воды в Балтийском море прогрелась сильнее обычного. По наблюдениям как ученых, так и отдыхающих, отмечались массовые скопления водорослей на побережье Калининградской области и в открытом море. В связи с этим особенно интересна детальная оценка уровня развития фитопланктона и его показателя концентрации хлорофилла «а» в аномально теплых условиях.

Цель данного исследования — анализ состояния моря по спутниковым данным о концентрации хлорофилла «а» и температуре поверхности моря в необычно теплый летний сезон 2018 г.

## Материалы и методы

Данные по концентрации хлорофилла «а» и температуре поверхности моря получены при обработке спутниковых снимков спектрорадиометра MODIS (Aqua, Terra), уровень обработки level 2, пространственное разрешение — 1 км.



Спутниковый спектрорадиометр MODIS позволяет осуществлять ежедневный оперативный мониторинг юго-восточной части Балтийского моря в режиме реального времени. Периодичность наблюдения составляет 2 раза в сутки. Прием спутниковых данных является бесплатным и осуществляется через сайт Годдардского аэрокосмического центра Национального управления по воздухоплаванию и исследованию космического пространства США (НАСА) Ocean Color Web (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>). Однако спутниковые данные видимого диапазона ограничены или полностью отсутствуют в период облачности.

В ходе работы были сформированы массивы данных по концентрации хлорофилла «а» и температуре поверхности моря для 66 произвольных экспериментальных точек в районе исследования (рис. 1). Всего обработано 60 спутниковых снимков спектрорадиометра MODIS за май – август 2018 г. (местное время пролета спутника над акваторией юго-восточной Балтики 11:40–14:10). Выборка данных составила 3327 значений по концентрации хлорофилла «а» и 3847 – по температуре поверхности моря. Для обработки спутниковых данных использовалась программа SeaDAS, версия 7.4.

85

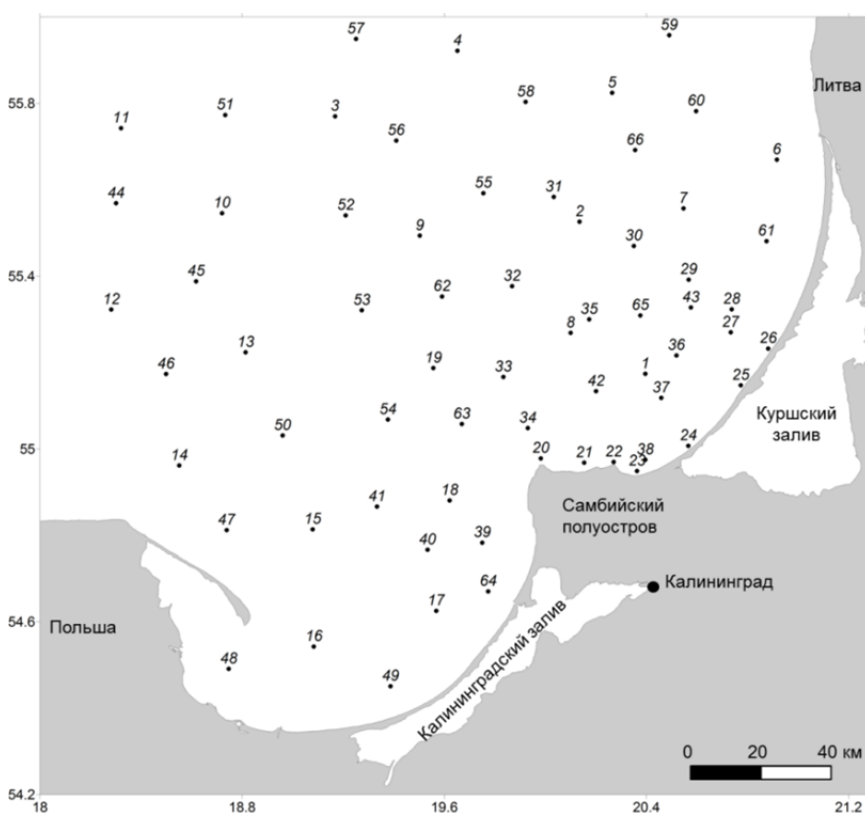


Рис. 1. Расположение экспериментальных точек

Для расчета концентрации хлорофилла «а» в поверхностном слое юго-восточной части Балтийского моря использовался региональный алгоритм, предложенный в статье Буканова и соавторов [12].

### Результаты

В период с 1 мая по 31 августа 2018 г. были получены спутниковые данные за 60 дней из 123. Это объясняется наличием значительной облачности над исследуемым регионом в течение данного периода.

Результаты обработки полученных данных отражены в виде графика распределения средних значений концентрации хлорофилла «а» ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ) и температуры поверхности моря ( $^{\circ}\text{C}$ ) по всем узловым точкам наблюдений (рис. 2).

86

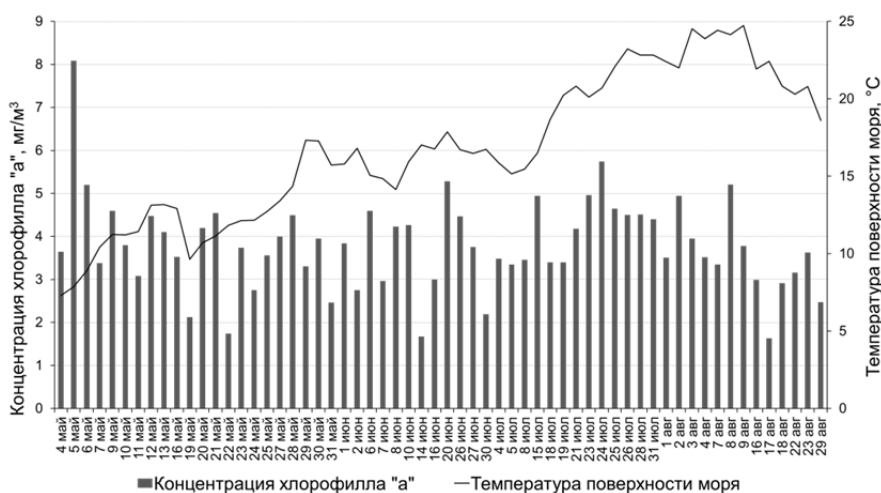


Рис. 2. Концентрация хлорофилла «а» и температура поверхности моря в юго-восточной части Балтийского моря с мая по август 2018 г.

Максимальная концентрация хлорофилла «а» была зафиксирована 5 мая 2018 г. — абсолютное значение  $8,1 \text{ мг}/\text{м}^3$  при практически минимальном значении температуры за наблюдаемый период  $7,9^{\circ}\text{C}$  (рис. 2). Далее отмечалось скачкообразное снижение концентрации хлорофилла «а», 22 числа зафиксировано минимальное значение концентрации в мае ( $1,7 \text{ мг}/\text{м}^3$ ). С 23 числа начался неравномерный рост концентрации хлорофилла «а», однако в конце месяца (31 мая) отмечен спад до  $2,5 \text{ мг}/\text{м}^3$ . В течение мая наблюдался скачкообразный рост температуры поверхности моря с  $7,3^{\circ}\text{C}$  в начале месяца до  $16^{\circ}\text{C}$  в конце (рис. 2). В целом в мае 2018 г. средняя концентрация хлорофилла «а» составила  $3,9 \pm 1,3 \text{ мг}/\text{м}^3$  при средней температуре поверхности моря  $12,1 \pm 2,6^{\circ}\text{C}$  (табл.). В июне наблюдался постепенный, но не равномерный рост температуры поверхности воды и одновременное снижение до средних величин концентрации хлорофилла «а» ( $3,4 - 3,6 \text{ мг}/\text{м}^3$ ) (рис. 2, табл.). Минимальное значение зафиксировано 14 июня ( $1,7 \text{ мг}/\text{м}^3$ ) — через 7 дней после максимального снижения температуры воды до  $14,1^{\circ}\text{C}$  7 июня (рис. 2).



**Среднемесячные значения концентрации хлорофилла «а»  
и температуры поверхности моря в юго-восточной части Балтийского моря  
с мая по август 2018 г.**

Месяц	Среднее значение	
	Концентрация хлорофилла «а», мг/м <sup>3</sup>	Температура поверхности моря, °С
Май	3,9±1,3	12,1±2,6
Июнь	3,6±1,1	16,2±1,0
Июль	4,2±0,8	20,5±2,9
Август	3,5±0,9	21,8±1,8
Среднее	3,8±1,1	17,7±4,6

87

Во второй и третьей декадах июня наблюдались повышенные значения концентрации хлорофилла «а». Максимальное значение было отмечено 20 июня (5,3 мг/м<sup>3</sup>) — через 4 дня после максимального значения температуры (17,8°С). А минимум концентрации — 30 июня (2,2 мг/м<sup>3</sup>), при постепенном снижении температуры воды до 15,8°С (рис. 2). В среднем за июнь 2018 г. концентрация хлорофилла «а» составила 3,6±1,1 мг/м<sup>3</sup> при средней температуре поверхности моря 16,2±1,0°С (табл.).

В течение июля концентрация хлорофилла «а» и температура поверхности моря значительно возрастали (рис. 2). Так, 24 июля концентрация хлорофилла «а» достигала своего второго за период исследования максимума — 5,7 мг/м<sup>3</sup>, при постоянном росте температуры поверхности воды вплоть до 23,2°С (рис. 2). Средняя концентрация хлорофилла «а» за июль 2018 г. составила 4,2±0,8 мг/м<sup>3</sup> при средней температуре поверхности моря 20,5±2,9°С (табл.).

В августе были зафиксированы два пика концентрации хлорофилла «а», отмеченные через 2 и 4 дня после максимальных значений температуры: 24,5°С (31.07) — 4,94 мг/м<sup>3</sup> (02.08) и 24,7°С (04.08) — 5,21 мг/м<sup>3</sup> (08.08) (рис. 2). Во второй половине августа началось сезонное снижение температуры воды, параллельно которому заметно снижение концентрации хлорофилла «а». В целом в августе 2018 г. среднемесячная концентрация хлорофилла «а» равна 3,5±0,9 мг/м<sup>3</sup> при средней температуре поверхности моря 21,8±1,8°С (табл.).

### Обсуждение

Известно, что развитие фитопланктона в Балтийском море носит ярко выраженный сезонный характер [13]. Биомасса фитопланктона имеет три отчетливых максимума: весенний (основной), летний и осенний [14–16]. Весенняя вспышка наблюдается в восточной части Балтийского моря в конце апреля — мае и, как правило, характеризуется развитием диатомовых водорослей [13; 17]. В рамках данного исследования распределения концентрации хлорофилла «а» в юго-восточной части Балтийского моря с мая по август 2018 г. были зафиксированы повышенные значения в мае — 8,1 мг/м<sup>3</sup>. В среднем за май концен-

трация хлорофилла «а» равна  $3,9 \pm 1,3$  мг/м<sup>3</sup>, что, вероятно, является первым годовым максимумом концентрации хлорофилла «а» (рис. 2). Однако необходимо дополнительно рассмотреть данные за апрель.

В начале лета из-за обеднения поверхностных вод биогенными элементами, наличия устойчивых галоклина и термоклина и ограниченного вертикального водообмена наступает стадия летнего минимума биомассы фитопланктона [13]. Для 2018 г. также характерно снижение концентрации хлорофилла «а» в июне, достигающее минимального значения 14 июня ( $1,7$  мг/м<sup>3</sup>) (рис. 2).

Затем при максимальной температуре поверхности моря и устойчивой стратификации наступает стадия летнего максимума, регистрируемого в июле, когда значения концентрации хлорофилла «а» достигают пика —  $5,7$  мг/м<sup>3</sup> (рис. 2). С начала июля температура поверхности моря становится выше  $15^{\circ}\text{C}$ , что провоцирует массовое развитие сине-зеленых водорослей (*Nodularia spumigena*, *Aphanizomenon sp.* и др.) [6; 13; 17]. Среднемесячная концентрация хлорофилла «а» максимальна в июле и составляет  $4,2 \pm 0,8$  мг/м<sup>3</sup>, что характеризует июль как второй годовой максимум.

В августе при максимальной температуре поверхности моря концентрация хлорофилла «а» постепенно снижается вследствие наступления годового максимума выедания фитопланктона зоопланктоном, когда трофический пресс максимальный.

По спутниковым данным MODIS за 2003–2012 гг. в юго-восточной части Балтийского моря максимум концентрации хлорофилла «а» приходится на июль и составляет  $4,8$  мг/м<sup>3</sup> [18]. В мае среднемесячная концентрация хлорофилла «а» составляет  $3,5$  мг/м<sup>3</sup>, в июне —  $4,2$ , в августе —  $3$  мг/м<sup>3</sup> [18]. По судовым данным за 2003–2007 гг. в районе исследования средняя концентрация хлорофилла «а» в слое фотосинтеза в мае составляет  $2,4$  мг/м<sup>3</sup>, а в июле —  $4$  мг/м<sup>3</sup> [19; 20]. Таким образом, полученные за летний период 2018 г. данные по концентрации хлорофилла «а» находятся на уровне средних многолетних значений в районе исследования (рис. 3).

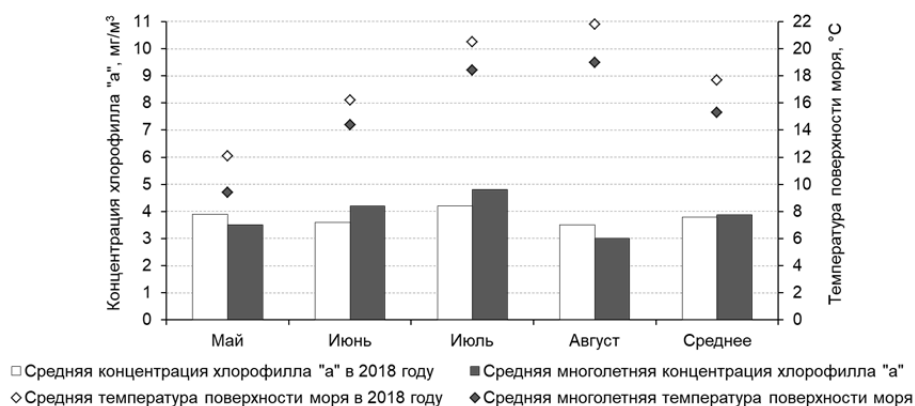


Рис. 3. Сравнение среднемесячных (для 2018 г.) и средних многолетних значений концентрации хлорофилла «а» и температуры поверхности моря в юго-восточной части Балтийского моря



Температура поверхности моря в рассматриваемый период 2018 г., напротив, демонстрирует значительное превышение относительно средних многолетних значений. Согласно [21], по данным спектрорадиометра MODIS среднемесячные значения температуры поверхности моря за 2003–2016 гг. в юго-восточной части Балтийского моря составляют  $9,4^{\circ}\text{C}$  – в мае,  $14,4^{\circ}\text{C}$  – в июне,  $18,4^{\circ}\text{C}$  – в июле и  $19,0^{\circ}\text{C}$  в августе. Таким образом, температура поверхности воды в мае 2018 г. на  $2,7^{\circ}\text{C}$ , в июне на  $1,8^{\circ}\text{C}$ , в июле на  $2,1^{\circ}\text{C}$  и в августе на  $2,8^{\circ}\text{C}$  выше, чем среднее многолетнее значение (рис. 3). В среднем за рассматриваемый теплый период температура поверхности моря была теплее среднемноголетних показателей на  $2,4^{\circ}\text{C}$ . Однако существенное влияние на распределение концентрации хлорофилла «а» это не оказало.

### Заключение

Средняя концентрация хлорофилла «а» в юго-восточной части Балтийского моря за период с мая по август 2018 г. составила  $3,8 \pm 1,1$  мг/м<sup>3</sup> при средней температуре поверхности моря  $17,7 \pm 4,6^{\circ}\text{C}$ . Наиболее массовое развитие фитопланктона пришлось на июль, когда концентрация хлорофилла «а» достигала  $5,7$  мг/м<sup>3</sup> и в среднем за месяц была максимальной за период исследования ( $4,2$  мг/м<sup>3</sup>). Это следствие большей продолжительности летнего «цветения» сине-зеленых водорослей. Весной рост фитопланктона ограничивается быстрым расходом биогенных элементов (в юго-восточной Балтике – нитратов [22]). Экстремальные значения концентрации хлорофилла «а», достигающие весной 2018 г.  $8$  мг/м<sup>3</sup>, обусловлены более высоким удельным содержанием пигмента в фитопланктоне по сравнению с летним периодом [23].

Самым теплым месяцем был август, когда был отмечен пик температуры поверхности моря ( $24,7^{\circ}\text{C}$ ) и среднемесячная температура достигла  $21,8 \pm 1,8^{\circ}\text{C}$ , что выше среднемноголетнего значения для августа на  $2,8^{\circ}\text{C}$  [21].

В целом концентрация хлорофилла «а» в юго-восточной части Балтийского моря в мае – августе 2018 г. была на уровне средних многолетних значений, в то время как температура поверхности моря оказалась выше среднего для 2003–2016 гг. на  $2,4^{\circ}\text{C}$ .

Таким образом, полученные данные свидетельствуют об отсутствии прямого влияния аномалии погоды 2018 г., обусловившей прогрев вод выше среднемноголетнего уровня, на среднемесячные концентрации хлорофилла «а», а значит, устойчивом состоянии и запасе прочности экосистемы юго-востока Балтийского моря к изменчивости условий окружающей среды в масштабе нескольких лет.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке государственного задания № 0149-2019-0013.*

### Список литературы

1. HELCOM. Eutrophication status of the Baltic Sea 2007–2011. A concise thematic assessment // Baltic Sea Environment Proceedings. 2014. №143.
2. HELCOM. Development of tools for assessment of eutrophication in the Baltic Sea // Baltic Sea Environment Proceedings. 2006. №104.



3. Schiewer U. Ecology of Baltic coastal waters. Springer, 2008.
4. Lindgren D., Håkanson L. Functional classification of coastal areas as a tool in ecosystem modeling and management // Mass-Balance Modelling and GIS-Based Data Analysis as Tools to Improve Coastal Management. Licentiate Thesis. Uppsala, 2007.
5. Atlas of the Baltic Sea. HELCOM, 2010.
6. Гидрометеорология и гидрохимия морей. Балтийское море. Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности / отв. ред. Ф.С. Терзиев. СПб., 1994. Т. 3, вып. 2.
7. Hakanson L., Bryhn A. C. Eutrophication in the Baltic Sea. Present situation, nutrient transport process, remedial strategies. Springer, 2008.
8. Wasmund N., Uhlig S. Phytoplankton trends in the Baltic Sea // ICES Journal of Marine Science. 2003. №60. P. 177–186.
9. Елизарова В.А. Хлорофилл как показатель биомассы фитопланктона // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов : тр. РАН Биологии внутренних вод. СПб., 2003. С. 126–132.
10. Трифонова И.С. Оценка трофического статуса водоемов по содержанию хлорофилла «а» в планктоне // Методические вопросы изучения первичной продукции планктона внутренних водоемов. СПб., 2003. С. 158–166.
11. Doerffer R., Fiseher J. Concentration of chlorophyll, suspended matter, and gelbstoff case II water derived from satellite coastal zone color scanner data with inverse modeling methods // J. Geophysical Research. 1994. Vol. 99, №С4. P. 7457–7466.
12. Буканова Т.В., Вазюля С.В., Копелевич О.В. и др. Региональные алгоритмы оценки концентрации хлорофилла и взвеси в юго-восточной Балтике по данным спутниковых сканеров цвета // Современные проблемы дистанционного исследования Земли из космоса. 2011. Т. 8, №2. С. 64–73.
13. Hobro R. Stages of annual zooplankton succession in the Asko area (northern Baltic sea) // Acta Bot. Fenica. 1979. №110. P. 79–80.
14. Калвека Б.Я. Особенности развития фитопланктона в Рижском заливе 1987–1980 гг. // Рыбохозяйственные исследования в бассейне Балтийского моря. 1983. Вып. 18. С. 3–9.
15. Николаев И.И. Биопланктон Рижского залива // Труды Латв. отд. ВНИРО. 1953. Т. 1. С. 115–172.
16. Alasaarela E. Phytoplankton and environmental conditions in central and coastal areas of the Bothnian Bay // Ann. Bot. Fennica. 1979. Vol. 16, №3. P. 241–274.
17. Hallfors G.A., Niemi A. Biological oceanography // The Baltic Sea. Elsevier Oceanogr. Ser. №30. Amsterdam, 1981. P. 219–238.
18. Буканова Т.В. Тенденции эвтрофирования юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным : дис. ... канд. геогр. наук. Калининград, 2014.
19. Кудрявцева Е., Пименов Н., Александров С., Кудрявцев В. Первичная продукция и хлорофилл в юго-восточной части Балтийского моря в 2003–2007 гг. // Океанология. 2011. Т. 51, №1. С. 33–41.
20. Александров С.В., Кудрявцева Е.А. Хлорофилл «а» и первичная продукция фитопланктона // Нефть и окружающая среда Калининградской области. Калининград, 2012. Т. 2. С. 358–372.
21. Котлярова М.А., Буканова Т.В. Изменчивость температуры поверхности юго-восточной части Балтийского моря по спутниковым данным // Известия КГТУ. 2019. №53. С. 51–60.
22. Кудрявцева Е.А., Александров С.В. Гидролого-гидрохимические основы первичной продуктивности и районирование российского сектора Гданьского бассейна Балтийского моря // Океанология. 2019. Т. 59, №1. С. 56–71.





23. Kudryavtseva E., Aleksandrov S., Bukanova T. et al. Relationship between seasonal variations of primary production, abiotic factors and phytoplankton composition in the coastal zone of the south-eastern part of the Baltic Sea // Regional studies in Marine Science. 2019. №32. 100862.

#### Об авторах

Денис Григорьевич Гоголев — магистрант, Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: dengg@mail.ru

Татьяна Васильевна Буканова — канд. геогр. наук, науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия.

E-mail: tatiana.bukanova@gmail.com

Елена Андреевна Кудрявцева — канд. геогр. наук, науч. сотр., Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Россия.

E-mail: kudryavtzeva@rambler.ru

#### The authors

Denis G. Gogolev, Master's Student, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: dengg@mail.ru

Dr Tatiana V. Bukanova, Research Fellow, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: tatiana.bukanova@gmail.com

Dr Elena A. Kudryavtseva, Research Fellow, Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Russia.

E-mail: kudryavtzeva@rambler.ru