

Электронный Атлас

Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2018 гг.

**О.В. Копелевич, И.В. Салинг, С.В. Вазюля, Д.И. Глуховец,
С.В. Шеберстов, В.И. Буренков, П.Г. Каралли, А.В. Юшманова**

Electronic Atlas

Bio-optical characteristics of the seas, surrounding the western part of Russia, from data of satellite ocean color scanners of 1998-2018

**Kopelevich O.V., Sahling I.V., Vazyulya S.V., Glukhovets D.I.,
Sheberstov S.V., Burenkov V.I., Karalli P.G., Yushmanova A.V.**

ИО РАН, Москва, 2019

Содержание

Введение

Баренцево море (см. приложение 2)

- Субрегионы
- Диаграммы по субрегионам

Покрытие данными

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Концентрация взвешенного вещества, мг/л

Параметры кокколитофоридного цветения (концентрация клеток, площадь цветения, содержание клеток в 1-метровом слое)

Температура поверхности моря, °С (2003-2011)

- Карты среднемесячных распределений по годам

«Средне-климатические» распределения 1998-2011 гг.

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Концентрация взвешенного вещества, мг/л

Параметры кокколитофоридного цветения (концентрация клеток, площадь цветения, содержание клеток в 1-метровом слое)

Температура поверхности моря, °С (2003-2018)

- Таблицы средне-сезонных значений по субрегионам.

Карское море (см. приложение 3)

- Субрегионы
- Диаграммы по субрегионам (2003-2018)

Покрытие данными

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Концентрация взвешенного вещества, мг/л

Показатель поглощения окрашенным органическим веществом («желтым веществом»), a_g , m^{-1}

Температура поверхности моря, °С

- Карты среднемесячных распределений по годам

«Средне-климатические» распределения 2003-2011 гг.

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Концентрация взвешенного вещества, мг/л

Показатель поглощения окрашенным органическим веществом («желтым веществом»), $a_g, \text{м}^{-1}$

Температура поверхности моря, °С (2003-2018)

- Таблицы средне-сезонных значений по субрегионам.

Белое море (см. Приложение 4)

- Субрегионы
- Диаграммы по субрегионам

Покрытие данными

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Концентрация взвешенного вещества, мг/л

Показатель поглощения желтым веществом $a_g, \text{м}^{-1}$

Температура поверхности моря, °С

- Карты среднемесячных распределений по годам «Средне-климатические» распределения 2003-2011 гг.

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Концентрация взвешенного вещества, мг/л

Показатель поглощения желтым веществом $a_g, \text{м}^{-1}$

Температура поверхности моря, °С (2003-2018)

- Таблицы средне-сезонных значений по субрегионам.

Балтийское море (см. приложение 5)

- Субрегионы (Финский залив и Юго-восточная Балтика)
- Диаграммы по субрегионам (2003-2018)

Покрытие данными

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Концентрация взвешенного вещества, мг/л

Биомасса цианобактерий (только Финский залив) *Vсуап*

Температура поверхности моря, °С

- Карты среднемесячных распределений по годам «Средне-климатические» распределения 2003-2011 гг.

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Концентрация взвешенного вещества, мг/л

Биомасса цианобактерий (только Финский залив)

Температура поверхности моря, °С (2003-2018)

- Таблицы средне-сезонных значений по субрегионам.

Черное море (см. приложение 6)

- Субрегионы
- Диаграммы по субрегионам

Покрытие данными

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Показатель поглощения желтым веществом a_g, m^{-1}

Концентрация клеток кокколитофорид, млн.кл/л

Температура поверхности моря, °С

- Карты среднемесячных распределений по годам

«Средне-климатические» распределения 1998-2011 гг.

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Показатель поглощения желтым веществом a_g, m^{-1}

Концентрация клеток кокколитофорид, млн.кл/л

Температура поверхности моря, °С (2003-2018)

- Таблицы средне-сезонных значений по субрегионам.

Каспийское море (см. приложение 7)

- Субрегионы
- Диаграммы по субрегионам

Покрытие данными

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Концентрация взвешенного вещества, мг/л

Показатель поглощения желтым веществом a_g, m^{-1}

Температура поверхности моря, °С

- Карты среднемесячных распределений по годам

«Средне-климатические» распределения 1998-2011 гг.

Концентрация хлорофилла *Chl*

Показатель рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp}

Концентрация взвешенного вещества, мг/л

Показатель поглощения желтым веществом a_g, m^{-1}

Температура поверхности моря, °С (2003-2018)

- Таблицы средне-сезонных значений по субрегионам.

Заключение

Литература

Content

Introduction

Barents Sea (see Attachment 2)

- Subregions
- Diagrams by subregions

Coverage by data

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Parameters of coccolithophore bloom (plated cell concentration, bloom area, cell number within 1m layer)

Sea Surface Temperature

- Maps of the monthly mean distributions by years

“Climatic distributions” (average distributions over 1998-2011)

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Parameters of coccolithophore bloom (plated cell concentration, bloom area, cell number within 1m layer)

Sea Surface Temperature

- Tables of the seasonal values by years

Kara Sea (see Attachment 3)

- Subregions
- Diagrams by subregions (2003-2018)

Coverage by data

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Yellow substance absorption coefficient a_g, M^{-1}

Sea Surface Temperature

- Maps of the monthly mean distributions by years

“Climatic distributions” (average distributions over 1998-2011)

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Yellow substance absorption coefficient a_g, M^{-1}

Sea Surface Temperature

- Tables of the seasonal values by years

White Sea (see Attachment 4)

- Subregions
- Diagrams by subregions

Coverage by data

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Yellow substance absorption coefficient a_g, M^{-1}

Sea Surface Temperature

- Maps of the monthly mean distributions by years

“Climatic distributions” (average distributions over 1998-2011)

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Yellow substance absorption coefficient a_g, M^{-1}

Sea Surface Temperature

- Tables of the seasonal values by years

Baltic Sea (see Attachment 5)

- Subregions (Gulf of Finland and South-Eastern Baltic)
- Diagrams by subregions (2003-2018)

Coverage by data

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Cyanobacteria biomass *Bcyan* (Gulf of Finland only)

Sea Surface Temperature

- Maps of the monthly mean distributions by years

“Climatic distributions” (average distributions over 2003-2011)

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Cyanobacteria biomass *Bcyan* (Gulf of Finland only)

Sea Surface Temperature

- Tables of the seasonal values by years

Black Sea (see Attachment 6)

- Subregions
- Diagrams by subregions

Coverage by data

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Yellow substance absorption coefficient a_g, M^{-1}

Parameters of coccolithophore bloom (plated cell concentration, bloom area, cell number within 1m layer)

Sea Surface Temperature (2003-2018)

- Maps of the monthly mean distributions by years

“Climatic distributions” (average distributions over 1998-2011)

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Yellow substance absorption coefficient a_g, M^{-1}

Parameters of coccolithophore bloom (plated cell concentration, bloom area, cell number within 1m layer)

Sea Surface Temperature (2003-2018)

- Tables of the seasonal values by years

Caspian Sea (see Attachment 7)

- Subregions
- Diagrams by subregions

Coverage by data

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Yellow substance absorption coefficient a_g, M^{-1}

Sea Surface Temperature

- Maps of the monthly mean distributions by years

“Climatic distributions” (average distributions over 1998-2011)

Chlorophyll concentration *Chl*

Particle backscattering coefficient b_{bp}

Total suspended matter, mg/l

Yellow substance absorption coefficient a_g, M^{-1}

Sea Surface Temperature

- Tables of the seasonal values by years

Conclusion

References

Введение

Лаборатория оптики океана Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН представляет очередной 11-й выпуск обновляемого электронного атласа биооптических характеристик морей, омывающих берега России. Предыдущий выпуск был издан в прошлом году в комплекте с монографией [1], он охватывал период с 1998 по 2017гг. Настоящий выпуск, свободно доступный на сайте <http://optics.ocean.ru>, дополнен данными 2018 г.

Атлас содержит цветные карты среднемесячных распределений биооптических параметров вод поверхностного слоя Баренцева, Карского, Белого, Балтийского, Черного и Каспийского морей; диаграммы, показывающие изменчивость их среднемесячных значений в разных регионах; таблицы средне-сезонных значений по годам.

Рассматриваемые характеристики включают концентрацию хлорофилла, показатели рассеяния назад взвешенными частицами и поглощения окрашенным органическим веществом («желтым веществом»), концентрацию взвешенного вещества, параметры кокколитофоридных цветений в Баренцевом и Черном морях, значения биомассы цианобактерий в Финском заливе Балтийского моря.

Для расчета использовались доступные на сайте <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov> данные второго уровня сканеров цвета SeaWiFS (январь 1998 – июнь 2002 гг.) и MODIS-Aqua (июль 2002 – декабрь 2018 гг.); «сшивка» данных SeaWiFS и MODIS-Aqua проводилась по совместным данным этих сканеров в период с июля 2002 г. по 2007 г. [2].

Расчеты биооптических характеристик выполнены в основном с помощью региональных алгоритмов, разработанных на основе данных натуральных измерений в исследуемых морях. Описание этих алгоритмов можно найти в монографии [1], прилагаемой к Атласу. В качестве параметра, характеризующего климатические изменения, в Атлас включены данные о сезонных и межгодовых изменениях температуры поверхности моря (ТПМ или SST – Sea Surface Temperature) по данным измерений сканером MODIS-Aqua. Эти данные представлены с 2003 г.

Биооптические характеристики Баренцева, Белого, Черного и Каспийского морей представлены с 1998 г.; Карского и Балтийского (которые рассчитывались только по данным MODIS-Aqua) с 2003 г.

Проблема оценки достоверности представляемых данных не может быть решена в полном объеме, так как зависит от качества получаемых спутниковых данных. В монографии [1] даны оценки ошибок используемых алгоритмов, эти оценки сделаны путем сравнения данных спутниковых и натуральных измерений при благоприятных погодных условиях. В арктических морях частая облачность препятствует получению

данных одновременных измерений, судовых и спутниковых; при сильной горизонтальной неоднородности и временной изменчивости отсутствие одновременных измерений делает оценку ошибки практически невозможной.

Представленные в Атласе оценки средних значений рассматриваемых параметров зависят как от качества используемых спутниковых данных, так и от полноты покрытия исследуемых регионов спутниковыми данными. Изменчивость покрытия может приводить, в частности, к тому, что расчет средних значений происходит для разных площадей, и при анализе межгодовых изменений и оценке трендов фактически сравниваются средние величины, рассчитанные для разных областей [2]. Однако ужесточение требований к качеству данных неминуемо приводит к сокращению полноты получаемой информации о сезонных и межгодовых изменениях исследуемых характеристик. Оптимальный выбор требований зависит от условий, в которых проводятся спутниковые наблюдения, в частности, от изменчивости облачности, препятствующей получению спутниковых данных. Этот вопрос рассматривался в работе [3]: сравнивались две версии: с более жесткими ограничениями на спутниковые данные, что обеспечивало большую надежность результатов, и «традиционная» версия, рассчитанная аналогично предыдущим выпускам, с более полными, но менее надежными результатами. Сравнение показало, что «жесткие» ограничения приводят во многих случаях к критической потере данных, в частности, к значительным пропускам на диаграммах. При «мягких» ограничениях пропуски на диаграммах отсутствовали, однако точность оценок была ниже, чем при выполнении жестких требований. В этом выпуске, также как и в предыдущем 10-м, используется версия с «мягкими» ограничениями.

Как отмечалось выше, представляемый выпуск Атласа основан на материалах предыдущего 10-го с дополнением данными 2018 г. Эта работа выполнена И.В. Салинг. Введение написано О.В. Копелевичем, Заключение основано на материалах статьи [4].

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема № 0149-2019-0003).

Авторы признательны GSFC DAAC за возможность использовать спутниковые данные сканеров SeaWiFS и MODIS.

Introduction

The Ocean Optics Laboratory, Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences (SIO RAS) presents a next 11th issue of the electronic atlas of the bio-optical characteristics of the Russian seas from satellite ocean color data. The previous issue was published in the last year complete with the monograph [1] and comprised the period of 1998-2017. The present issue, free available at site <http://optics.ocean.ru>, is supplemented with data of 2018.

The Atlas contains color maps with the mean monthly distributions of the bio-optical characteristics in the Barents, Kara, White, Baltic, Black, and Caspian seas; diagrams, demonstrating variability of the monthly means in different sub-regions; tables with parameters of the inter-annual changeability of different characteristics by year.

The set of bio-optical parameters includes chlorophyll concentration, the particle backscattering coefficient and the absorption coefficient of colored organic matter (“yellow substance”), the parameters of coccolithophore blooms in the Barents and Black Seas, cyanobacteria biomass in the Gulf of Finland of the Baltic Sea.

The Level 2 data from the ocean color scanners SeaWiFS (January 1998 – June 2002) and MODIS-Aqua (July 2002 – December 2018), available on the website <http://oceancolor.gsfc.nasa.gov>, were used for the calculation; these data were "cross-linked" by using their joint data in the period from July 2002 to 2007 [2].

Calculations of the bio-optical characteristics were performed mainly using regional algorithms developed on the basis of field measurements in the studied seas. The description of these algorithms can be found in the monograph [1] attached to the Atlas. As a parameter characterizing climatic changes, the Atlas includes data on seasonal and inter-annual changes in the sea surface temperature SST measured by MODIS-Aqua scanner. These data are available since 2003.

The bio-optical characteristics of the Barents, White, Black and Caspian seas are given since 1998, for the Kara and Baltic Seas from 2003 (they were calculated only by using MODIS-Aqua data).

The problem of assessing the uncertainties in the presented data cannot be solved in full, as it depends on the quality of the satellite data used. Estimates of errors of the algorithms used are given in the monograph [1], these estimates were made by comparing the data of satellite and field measurements under favorable weather conditions. In the Arctic seas, frequent cloudiness prevents simultaneous ship-based and satellite-based measurements data; under conditions of strong horizontal heterogeneity and temporal variability, the absence of simultaneous measurements makes error estimation practically impossible.

The estimates of the average values of the parameters presented in the Atlas depend both on the quality of the satellite data used and on the coverage of the studied regions by the satellite data. The changeability of coverage can lead, in particular, to the fact that the average values are calculated for different areas, and in the analysis of inter-annual changes the average values calculated for different areas are actually compared [2]. However, the strict requirements for data quality inevitably leads to a reduction in the completeness of the information obtained on seasonal and inter-annual changes in the studied characteristics.

The best choice of requirements depends on the conditions under which satellite observations are made, in particular the changeability in cloudiness that prevent satellite data being obtained. This issue was discussed in [3]: two versions were compared: with "hard" restrictions on satellite data, which provided greater reliability of the results, and the "traditional" version, calculated similarly to previous issues with more complete, but less reliable results. The comparison showed that "hard" constraints lead in many cases to critical data loss, in particular, to significant gaps in the charts. Under the "soft" constraints, there were no gaps in the charts, but the accuracy of the estimates was lower than under the strict requirements. This issue, as in the previous 10th, uses a version with "soft" restrictions.

As noted above, the presented issue of the Atlas is based on the materials of the previous 10th, supplemented by data of 2018. The work was done by I. V. Sahling. The introduction was written by O. V. Kopelevich, the Conclusion is based on the materials of the article [4].

The work was carried out in the framework of the state assignment of the Ministry of high education and science of Russia (theme № 0149-2019-0003).

The authors are grateful to GSFC DAAC for the opportunity to use satellite data from SeaWiFS and MODIS scanners.

Заключение

В заключение приведем результаты использования данных Атласа для оценки наиболее значимых межгодовых изменений биооптических характеристик рассматриваемых морей в 2016-2018 гг. (по материалам статьи [4]).

Баренцево море

На рисунке 1 в левой части показаны сезонные изменения концентрации хлорофилла Chl , показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} и температуры поверхности моря SST в разных субрегионах в период с мая по сентябрь. Видно, что относительный ход изменений в рассматриваемый период в большинстве случаев соответствует «средне-климатическому», однако абсолютные величины значительно превышают средне-климатические. Это относится ко всем трем приведенным параметрам, причем в нескольких случаях зарегистрированы рекордные за все время наблюдений значения: Chl – в Северном субрегионе в мае и августе 2016 г. (0.41 и 0.24 мг м⁻³), в Среднем – в августе и сентябре 2017 г. (0.28-0.29 мг м⁻³), в Южном – в мае 2018 г. (0.38 мг м⁻³), b_{bp} – в Северном субрегионе в мае 2016 г. (5.5 м⁻¹), в Среднем – в июле 2016 г. (11.3 м⁻¹) и сентябре 2017г. (10.4 м⁻¹). Отметим, что среднемесячные значения SST почти во всех случаях заметно превышают средне-климатические значения, в их числе несколько рекордных за все время наблюдений, все они относятся к 2016 г. – в Среднем субрегионе май и июль (3.9 и 10.1 °C), в Южном – июль-сентябрь (11-13 °C).

В правой части рисунка 1 представлены среднемесячные распределения значений Chl и b_{bp} в июне и августе 2017. На июньских картах хорошо видно весеннее цветение фитопланктона, предположительно диатомовых водорослей (особенно ярко на карте распределения Chl , но и на карте b_{bp} тоже). На нижних картах хорошо видно кокколитофоридное цветение (особенно ярко на карте распределения b_{bp} , на карте хлорофилла тоже, но не так отчетливо). Эти два явления в основном определяют появление рекордных значений Chl и b_{bp} .

Карское море

На рисунке 2 представлены диаграммы для двух субрегионов Карского моря: К1 – юго-западная часть моря и К2 – северо-восточная. Сравнивая рисунки 1 и 2, можно увидеть существенное отличие между ними: для Карского моря нет такого явного превышения рассчитанных значений биооптических параметров над их средне-климатическими величинами, как для Баренцева. Рекордных значений за все время наблюдений гораздо меньше, однако они есть и почти все относятся к К1. Это значение

Chl для июня 2018 г. (1.23 мг м^{-3}) и b_{bp} для августа 2017 г. (0.0108 м^{-1}) и для субрегиона К2 для сентября 2018 г. (0.0068 м^{-1}).

Важнейший фактор, определяющий пространственное распределение биооптических характеристик в Карском море, - речной сток: его распространение в Карском море зависит, в первую очередь, от преобладающего направления ветра [1]. Рисунок 3 показывает, как изменяется пространственное распределение значений поглощения желтым веществом a_g в июле-сентябре 2016 г и 2017 г. в зависимости от преобладающего направления ветра. Особенно сильно это влияет на субрегион К2, что хорошо видно на диаграммах рисунка 2.

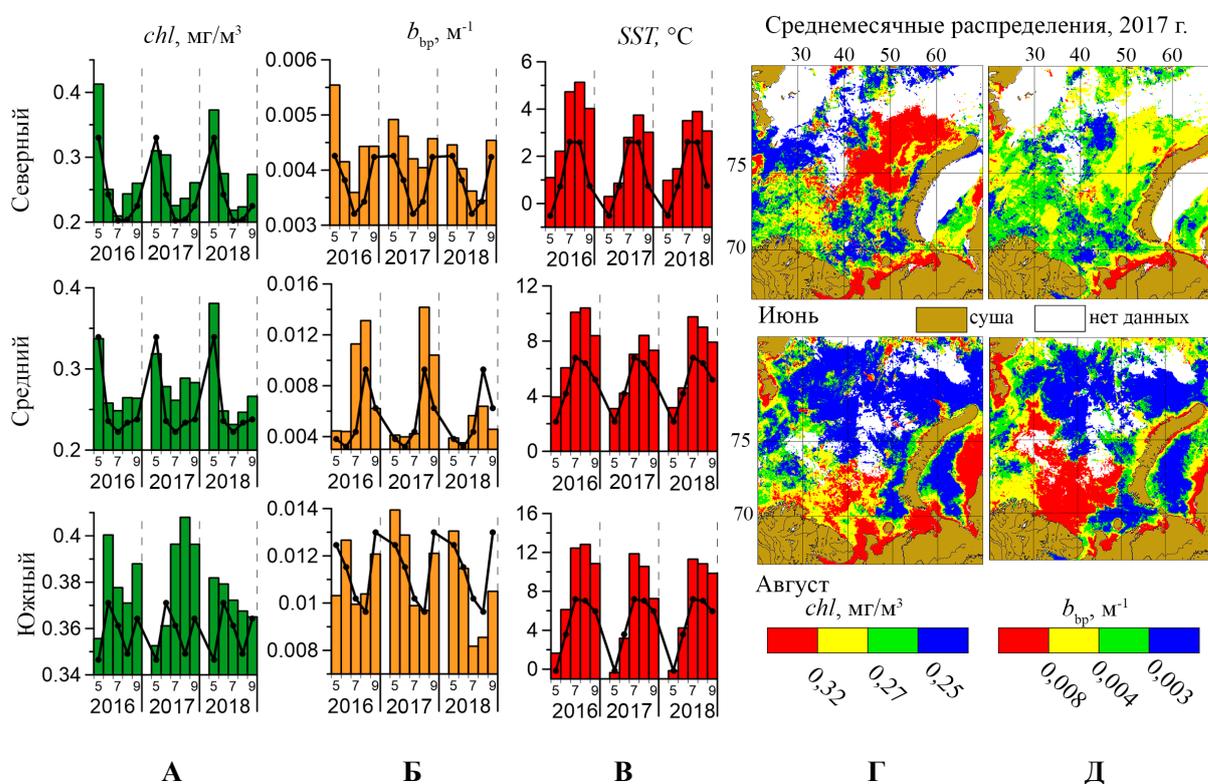


Рисунок 1. Сезонные изменения среднемесячных значений концентрации хлорофилла (Chl), показателя рассеяния назад взвешенными частицами (b_{bp}) и температуры поверхности моря (SST) в разных регионах Баренцевого моря в 2016 -2018 гг. (А-В). Справа – среднемесячные пространственные распределения значений Chl и b_{bp} в июне и августе 2017 (Г-Д).

Fig.1. Seasonal changes of the monthly means of Chl concentration, the particle backscattering coefficient b_{bp} , sea surface temperature SST in the subregions of the Barents Sea (A-B). Right – the monthly mean distributions of the Chl and b_{bp} values in June and August of 2017 ((Г-Д).

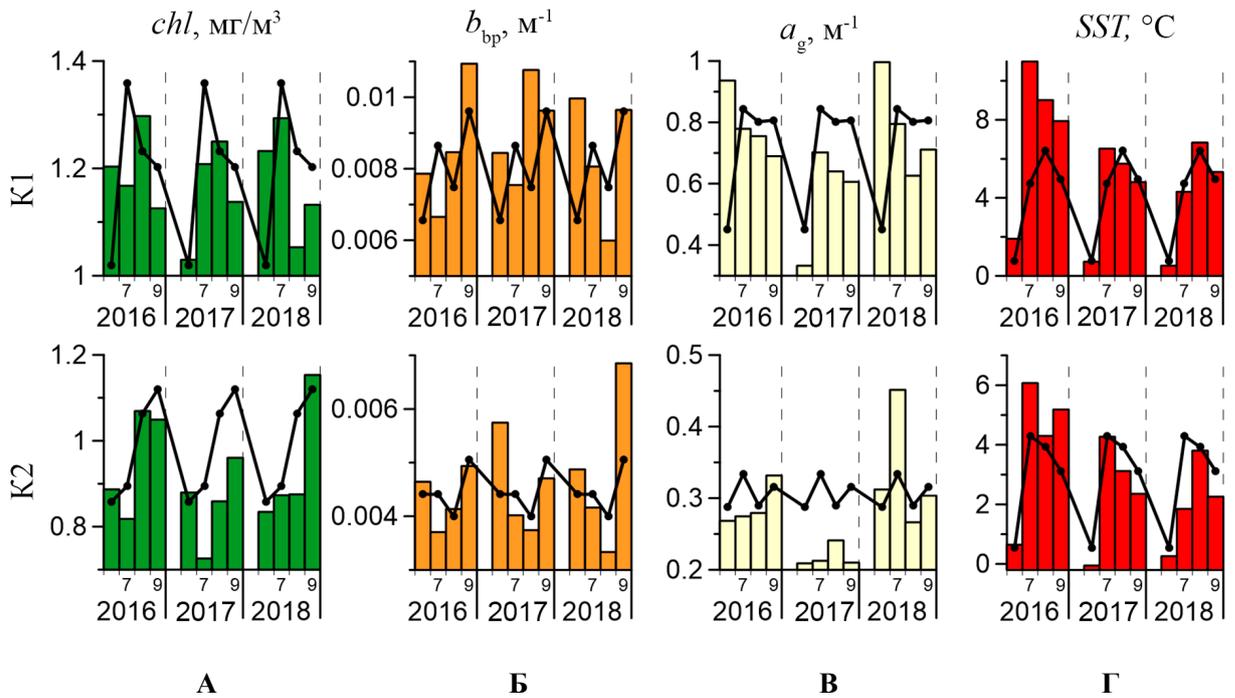


Рисунок 2. Сезонные изменения концентрации хлорофилла (А), показателя рассеяния назад взвешенными частицами (Б), показателя поглощения желтым веществом (В) и температуры поверхности моря (Г) в Карском море в 2016-2018 гг.

Fig.2. Seasonal changes of the monthly means of Chl concentration (A), the particle backscattering coefficient b_{bp} (B), the yellow substance absorption coefficient (B), sea surface temperature SST (Gamma) in the subregions of the Kara Sea in 2016-2018.

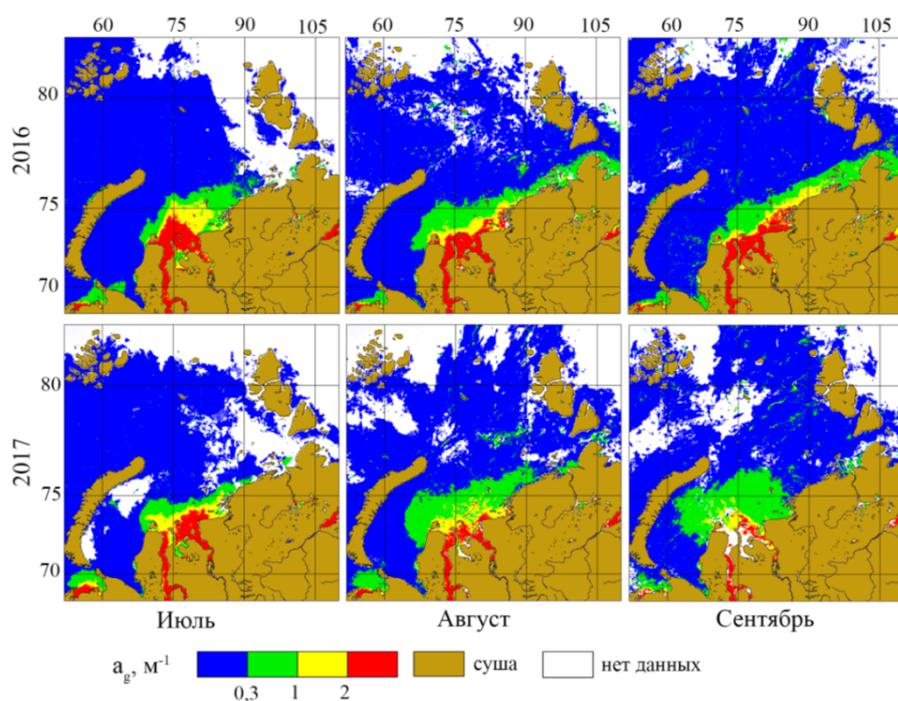


Рис.3. Среднемесячные распределения значений показателя поглощения желтым веществом в Карском море в июле-сентябре 2016 г (восточный перенос) и 2017 г (западный перенос).

Fig.3. Monthly mean distributions of the yellow substance absorption coefficient a_g values in the Kara Sea in June – September of 2016 (eastern transfer) and August of 2017 (western transfer).

Белое море

Заметные изменения биооптических характеристик наблюдались в рассматриваемый период и в Белом море (рис. 4, 5). Здесь также можно отметить несколько рекордно высоких значений, причем для всех четырех приведенных характеристик.

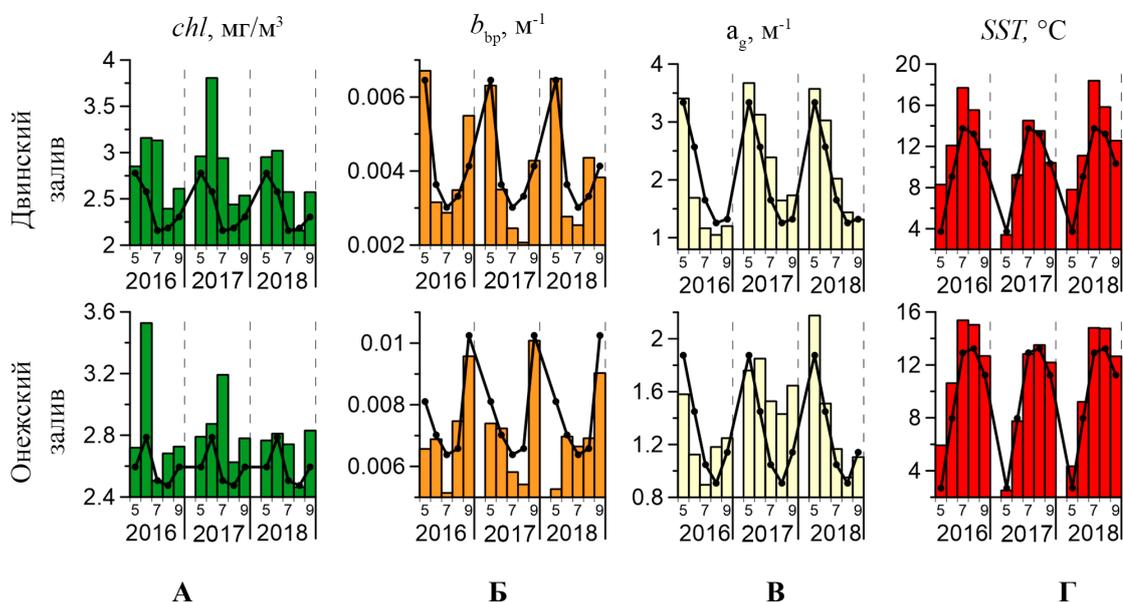


Рисунок 4. Сезонные изменения концентрации хлорофилла (А), показателя рассеяния назад взвешенными частицами (Б), показателя поглощения желтым веществом (В) и температуры поверхности моря (Г) в Белом море в 2016-2018 гг.

Fig.4. Seasonal changes of the monthly means of Chl concentration (A), the particle backscattering coefficient b_{bp} (B), the yellow substance absorption coefficient (B), sea surface temperature SST (Г) in the subregions of the White Sea in 2016-2018.

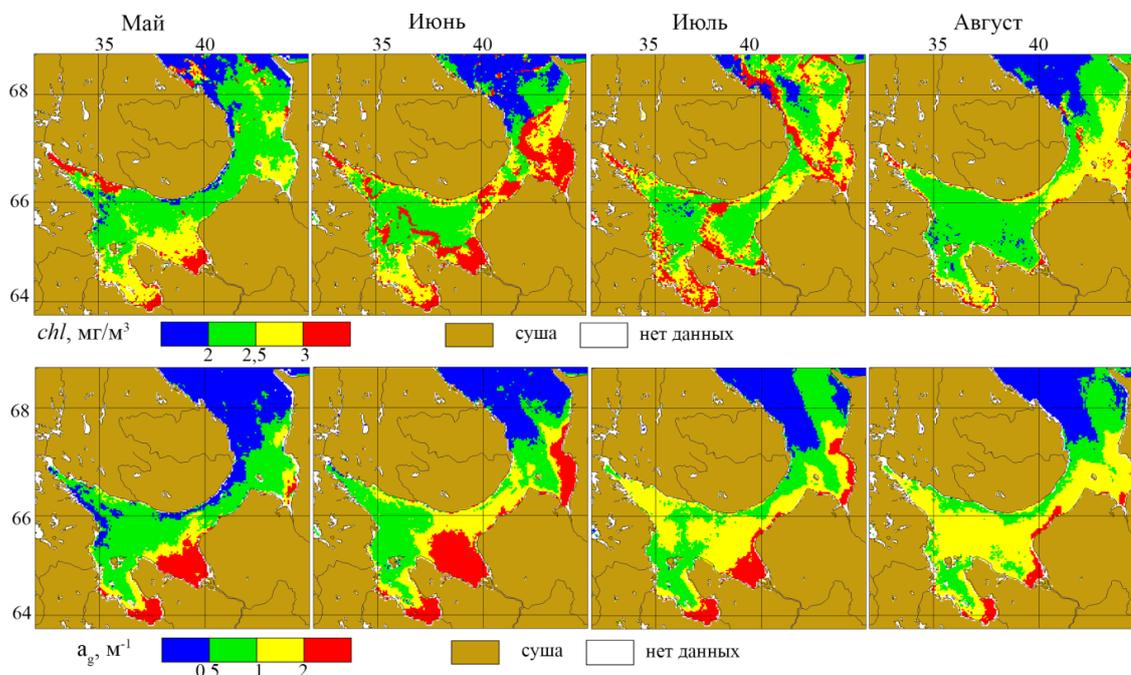


Рисунок 5. Среднемесячные распределения значений концентрации хлорофилла и показателя поглощения желтым веществом в Белом море в мае-августе 2016 г (верхний ряд) и 2017 г. (нижний).

Fig.5. Monthly mean distributions of the Chl and a_g values in May - August of 2016 (top) and 2017 (bottom).

Рекордно высокие значения концентрации хлорофилла в Двинском заливе наблюдались в июне 2017 г. (3.8 мг м^{-3}), июле (3.1 мг м^{-3}) и сентябре (2.6 мг м^{-3}) 2016 г., в Онежском заливе – в июне 2016 г. (3.5 мг м^{-3}), июле 2017 г. (3.2 мг м^{-3}) и сентябре 2018 г. (2.8 мг м^{-3}); показателя b_{bp} в Двинском заливе – в августе 2018 г. Для показателя поглощения a_g рекорды были побиты в обоих заливах в июле и августе 2017 г., в Онежском заливе и в мае 2018 г., и в июне, и в сентябре 2017 г., причем в июле и августе они в несколько раз превысили средне-климатические значения (1.5 и 1.4 м^{-1}). Температура воды в обоих заливах была аномально высокой в мае-июле 2016 г. (в июле в Двинском заливе также в 2018 г.), средне-климатические значения были превышены во все месяцы наблюдений.

Балтийское море

Для Балтийского моря ниже приведены данные для Финского залива, где был разработан региональный алгоритм для оценки биомассы цианобактерий [1], массовое цветение которых регулярно наблюдается в Балтийском море в летний сезон. На рисунке 6 показаны сезонные изменения концентрации хлорофилла, показателей рассеяния назад взвешенными частицами и поглощения желтым веществом, температуры поверхности моря.

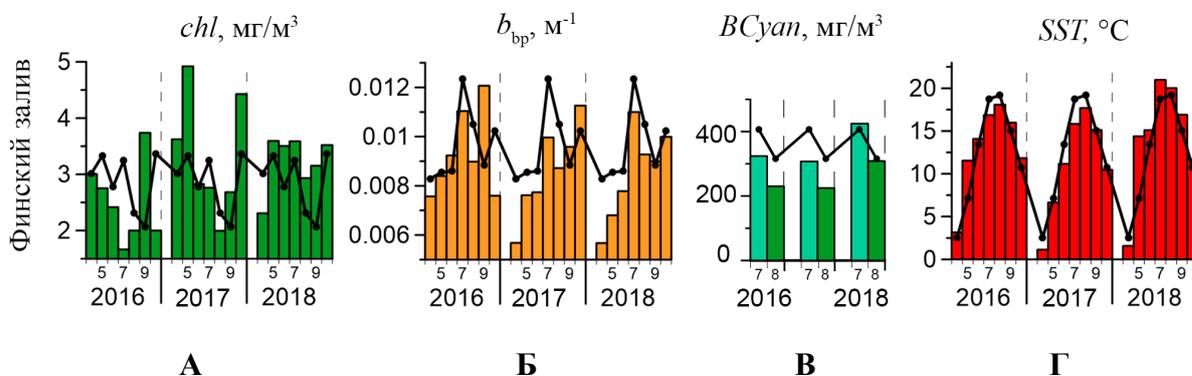


Рисунок 6. Сезонные изменения концентрации хлорофилла (А), показателя рассеяния назад взвешенными частицами (Б), показателя поглощения желтым веществом (В) и температуры поверхности моря (Г) в Финском заливе Балтийского моря в 2016-2018 гг.

Fig.6. Seasonal changes of the monthly means of Chl concentration (A), the particle backscattering coefficient b_{bp} (Б), the yellow substance absorption coefficient (B), sea surface temperature SST (Г) in the Gulf of Finland of the Baltic Sea in 2016-2018.

В рассматриваемый период для Финского залива зарегистрировано только одно рекордное значение биооптических характеристик – концентрации хлорофилла в мае 2017 г. (4.9 мг м^{-3}). Температура воды заметно превысила средне-климатические значения в мае-сентябре 2018 г., но эти значения были далеки от рекордных (более 21 °C в июле-августе

2010 г. Кстати, именно в 2018 г. значения биомассы цианобактерий оказались существенно более высокими, чем в 2016 и 2017 гг. (однако далеки от рекордных значений в июле 2004 г. – около 800 мг м^{-3} и августе 2015 г. – более 600 мг м^{-3} [1].

Среднемесячные пространственные распределения биомассы цианобактерий в июле и августе 2017 и 2018 гг. показаны на рисунке 7. Видно, как смещается цветение в августе на восток от открытой части залива в июле, где на достаточно большой акватории значения *BCyan* превышают 600 мг м^{-3} .

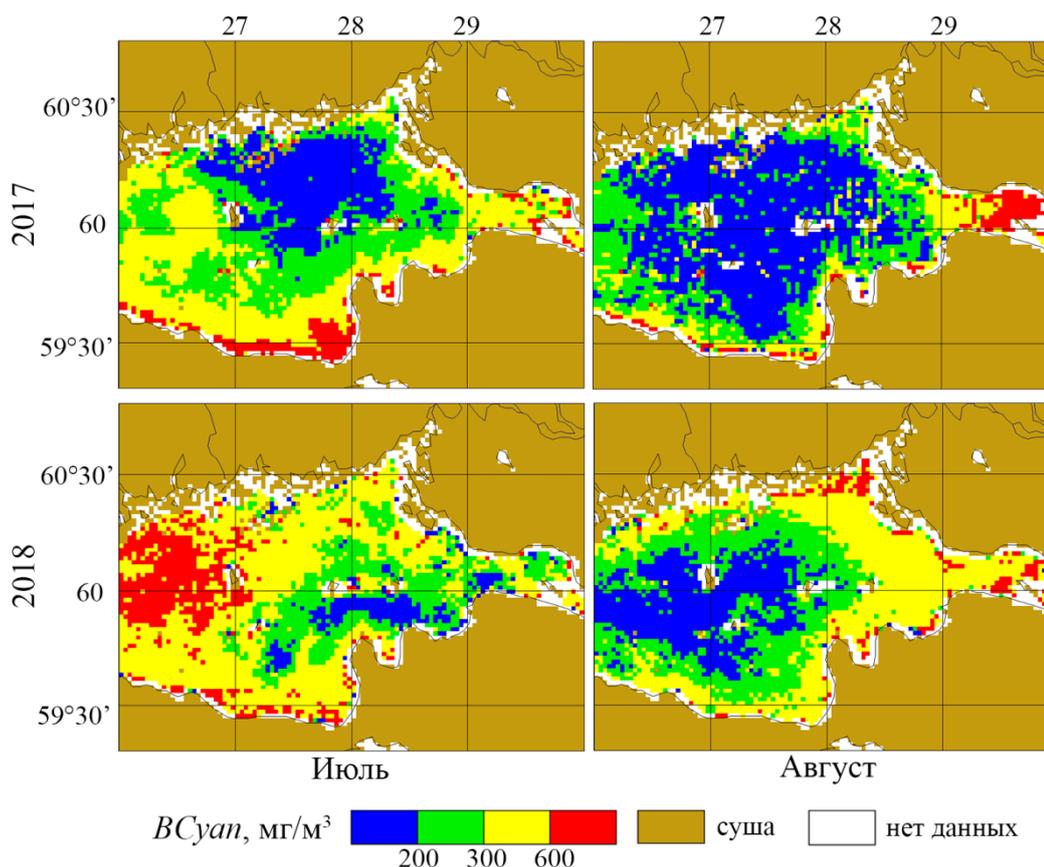


Рисунок 7. Среднемесячные распределения биомассы цианобактерий в Финском заливе в 2017 и 2018 гг.

Fig.7. Monthly mean distributions of the cyanobacteria biomass in the Gulf of Finland in 2017 and 2018.

Черное море

Сезонные изменения концентрации хлорофилла, показателя рассеяния назад взвешенными частицами, концентрации клеток кокколитофорид и температуры поверхности моря в восточной глубоководной части (субрегион #7) и восточной прибрежной зоне (субрегион # 8) показаны на рисунке 8.

Рекордно высокие значения показателя b_{bp} зарегистрированы в субрегионе # 8 в мае-июле 2017 г. (значения b_{bp} в субрегионе # 7, хотя и были высокими, но уступили 2012 г.), они были обусловлены интенсивным кокколитофоридным цветением [3]. В субрегионе # 8

зарегистрировано рекордно высокое значение концентрации хлорофилла в июле 2017 г., что также было обусловлено кокколитофоридным цветением. Изменения значения показателей поглощения в 2017-2018 гг. рассмотрены в недавно опубликованной работе [4].

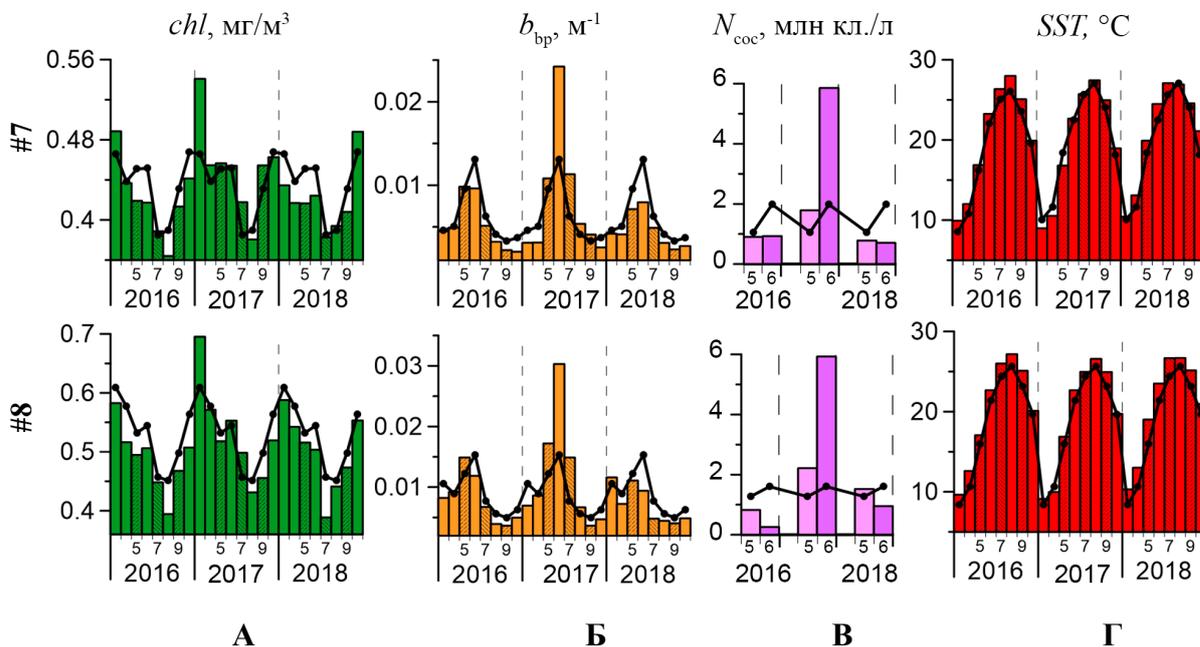


Рисунок 8. Сезонные изменения концентрации хлорофилла (А), показателя рассеяния назад взвешенными частицами (Б), концентрации клеток кокколитофорид (В) и температуры поверхности моря (Г) в Черном море в 2016-2018 гг.

Fig.8. Seasonal changes of the monthly means of Chl concentration (A), the particle backscattering coefficient b_{bp} (Б), the coccolithophore cell concentration (B), sea surface temperature SST in the subregions #7 and #8 of the Black Sea.

На рисунке 9 показаны среднемесячные распределения значений концентрации клеток кокколитофорид в Черном море в мае и июне 2017 и 2018 гг. Видно, что в июне 2017 г. цветение охватывало практически все море, тогда как в 2018 г. цветения фактически вообще не было. Отметим, что в 2017 г. четко выраженное цветение наблюдалось в мае. По среднему значению концентрации клеток в субрегионе # 8 цветение в мае 2017 г. уступило маю 2012 г., но превзошло последнее по площади цветения – примерно 200 тыс. кв. километров.

Каспийское море

Сезонные изменения концентрации хлорофилла, показателей рассеяния назад взвешенными частицами и поглощения желтым веществом, температуры поверхности моря для трех субрегионов Каспийского моря [1] показаны на рисунке 10.

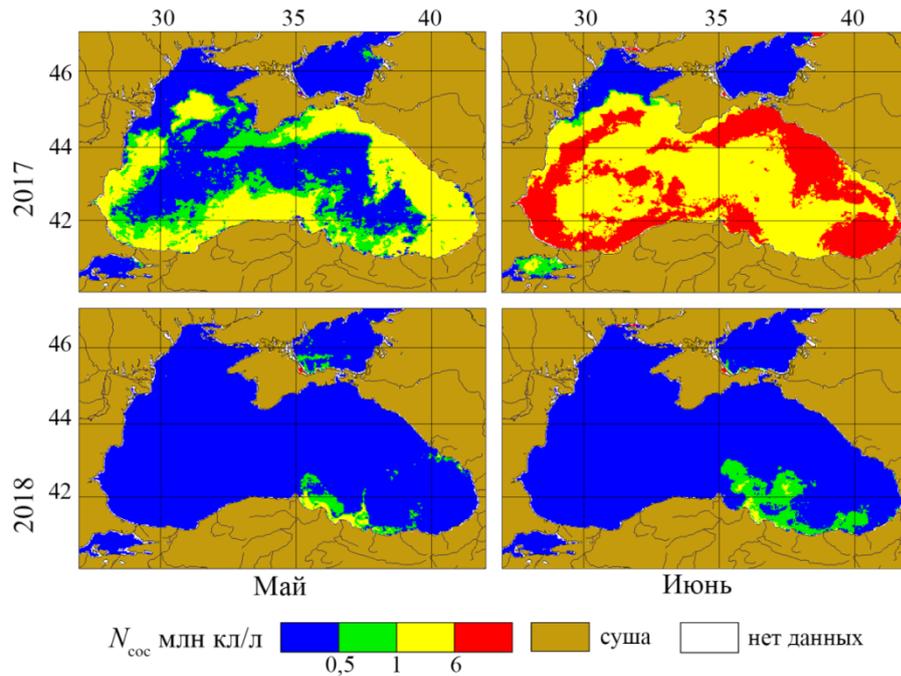


Рисунок 9. Среднемесячные распределения значений концентрации клеток кокколитофорид в Черном море в мае и июне 2017 и 2018 гг.

Fig.9. Monthly mean distributions of the coccolithophore cell concentration in the Black Sea in May and June of 2017 and 2018.

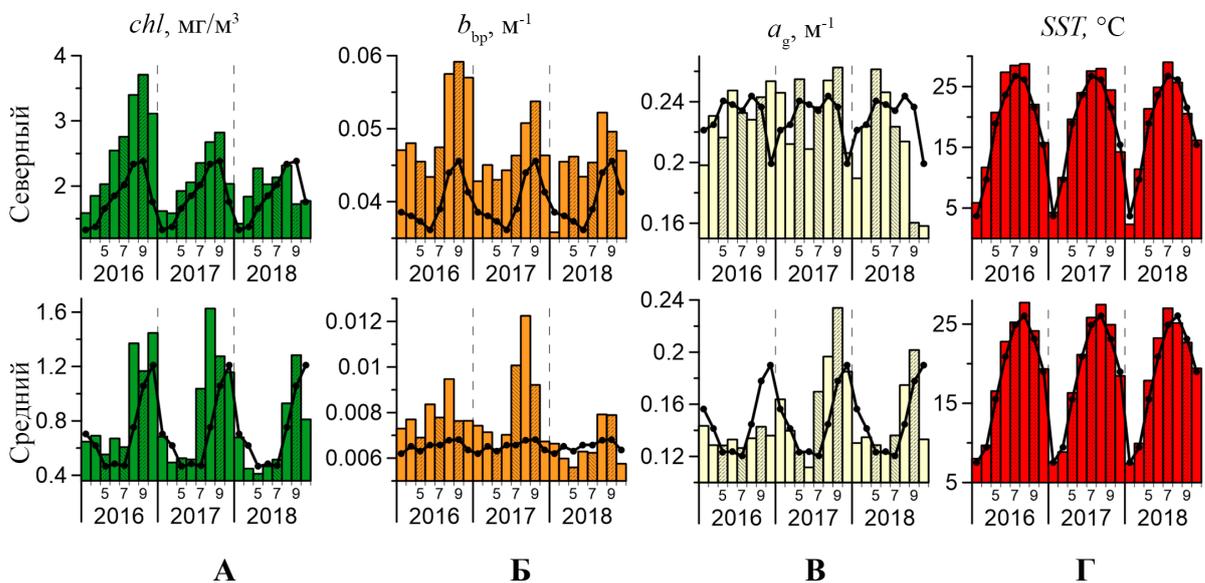


Рисунок 10. Изменения среднемесячных величин основных биооптических характеристик и температуры поверхности моря в 2016-2018 гг.

Fig.10. Seasonal changes of the monthly means of Chl concentration (A), the particle backscattering coefficient b_{bp} (B), the yellow substance absorption coefficient (C), sea surface temperature SST (D) in 2016-2018.

В рассматриваемый период в Каспийском море зарегистрированы несколько рекордно высоких значений параметров; все они относились к Северному и Среднему Каспию. В первом концентрация хлорофилла превысила рекордные значения в июне и августе 2016г., показатель b_{bp} в мае 2018 г. В Среднем Каспии концентрация хлорофилла

была рекордной в июне 2016 г. и августе 2017 г., значение показателя b_{bp} – в августе 2017 г., показатель поглощения - в августе-сентябре 2017 г. Температура поверхности моря в летние месяцы была выше средне-климатических значений, ее связь со значениями биооптических характеристик не обнаружено.

На рисунке 11 показаны распределения концентрации хлорофилла в июле и показателя b_{bp} в августе в 2016-2018 гг. и «средне-климатические» (1998-2011). Видно, что высокими значениями Chl и b_{bp} в 2017 г. заметно выделяется Средний Каспий.

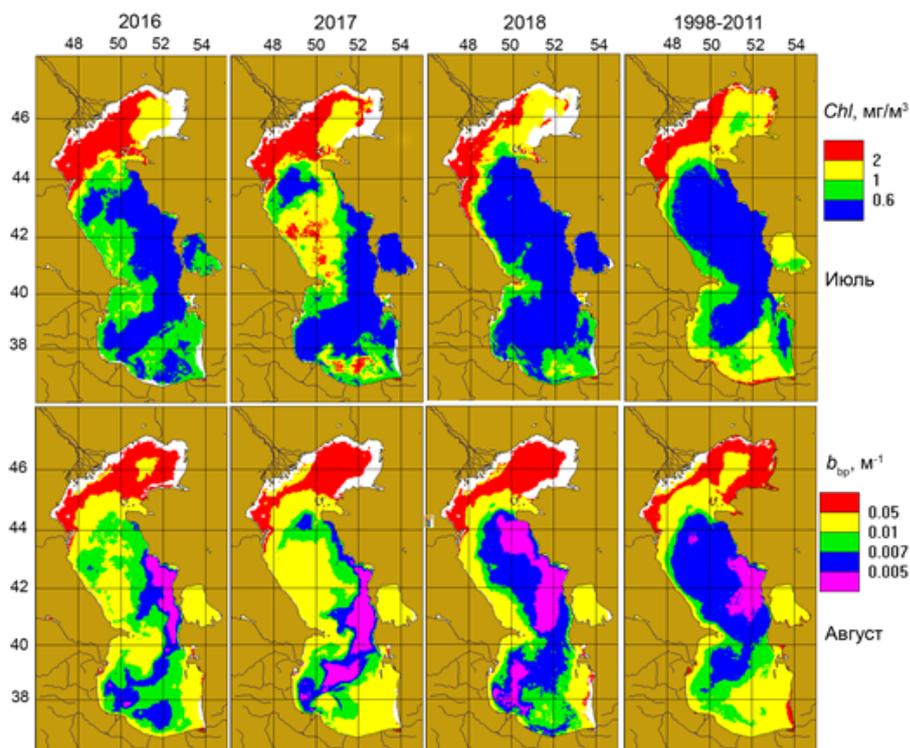


Рисунок 11. Среднемесячные распределения концентрации хлорофилла Chl в июле и показателя рассеяния назад взвешенными частицами b_{bp} в августе 2016-2018 гг. и «средне-климатические» распределения 1998-2011 гг.

Fig.11. Monthly means of Chl concentration in July and the particle backscattering coefficient b_{bp} in August of 2016-2018 and “climatic” distributions of 1998-2011.

Подводя итог представленным выше результатам, следует отметить, что в рассматриваемый период во всех, без исключения, морях зарегистрированы рекордные значения хотя бы одной из биооптических характеристик. Интересно, что в подавляющем большинстве случаев рекордные значения были зарегистрированы в 2017г. и относились либо к показателю b_{bp} (в Баренцевом, Карском, Черном и Каспийском морях) либо и к концентрации хлорофилла (Белое и Балтийское моря, Средний Каспий). Причины этого на данный момент не ясны.

Conclusion

In conclusion, we present the results of using the Atlas data to estimate the most significant inter-annual changes in the bio-optical characteristics of the considered seas in 2016-2018. (based on the materials of the article [4]).

Barents Sea

Figure 1 on the left shows the seasonal changes in the concentration of chlorophyll *Chl*, the particle backscattering coefficient b_{bp} , and the sea surface temperature *SST* in different subregions from May to September. It can be seen that the relative changes during the period under consideration in most cases corresponds to the “average climatic”, but the absolute values significantly exceed the average climatic.

This applies to all of the above parameters, and in several cases, the record values for the whole period of observation were recorded:

Chl in the Northern subregion in May and August 2016 (0.41 and 0.24 mg m⁻³), in the Middle Barents - in August and September 2017 (0.28-0.29 mg m⁻³), in the South subregion - in May 2018 (0.38 mg m⁻³);

b_{bp} - in the Northern subregion in May 2016 (5.5 m⁻¹), in the Middle - in July 2016 (11.3 m⁻¹) and September 2017 (10.4 m⁻¹).

Note that the average monthly *SST* values in almost all cases significantly exceeded the average climatic values, including several record values for the whole period of observations, all of them refer to 2016 - May and July in the Middle subregion (3.9 and 10.1⁰C), July-September in the South - (11-13⁰C).

The right-hand side of Figure 1 shows the monthly average distributions of *Chl* and *bbp* values in June and August 2017. On the June maps, the spring bloom of phytoplankton, presumably diatoms, is clearly visible (especially brightly on the *Chl* distribution map, but also on the b_{bp} map). Coccolithophore bloom is clearly visible on the bottom maps (especially brightly on the b_{bp} distribution map, on the chlorophyll map too, but not so clearly). These two phenomena mainly determined the appearance of record values of *Chl* and b_{bp} .

Kara Sea

Figure 2 presents diagrams for two subregions of the Kara Sea: K1 - the south-western part of the sea and K2 - the north-eastern. Comparing Figures 1 and 2, one can see a significant difference between them: for the Kara Sea there is no such apparent excess of the calculated values of the bio-optical parameters over their average climatic values, as for the Barents. The number of the record values for the whole period of observations for the Kara Sea is less than for

the Barents Sea, and almost all of them relate to K1. They include the *Chl* value for June 2018 (1.23 mg m^{-3}) and b_{bp} for August 2017 (0.0108 m^{-1}); for the K2 subregion for September 2018 (0.0068 m^{-1}).

The most important factor determining the spatial distribution of bio-optical characteristics in the Kara Sea is river runoff: its distribution in the Kara Sea depends, first of all, on the prevailing wind direction [1]. Figure 3 shows the changes in the spatial distribution of the values of the yellow substance absorption coefficient a_g in July-September 2016 and 2017 depending on the prevailing wind direction. As seen in the diagrams of Fig.2, this especially affects the K2 subregion.

White Sea

In the White Sea during the considered period, significant changes in the bio-optical characteristics were observed (Fig. 4, 5); a few record high values were registered. Among them, the chlorophyll concentration in the Dvina Bay in June 2017 (3.8 mg m^{-3}), July (3.1 mg m^{-3}) and September (2.6 mg m^{-3}) in 2016; in Onega Bay in June 2016 (3.5 mg m^{-3}), July 2017 (3.2 mg m^{-3}) and September 2018 (2.8 mg m^{-3}); b_{bp} in the Dvina Bay - in August 2018.

The record values of the yellow substance absorption coefficient a_g were observed in both bays in July and August 2017, in Onega Bay in May 2018, and in June and September 2017; in July and August 2017 they exceeded several times the average climatic values (1.5 and 1.4 m^{-1}).

The *SST* values in both bays were abnormally high in May-July 2016 (in the Dvina Bay also in July 2018), the average climatic values were exceeded in all months of observation.

Baltic Sea

For the Baltic Sea, we present the data for the Gulf of Finland, where a regional algorithm was developed for estimating the biomass of cyanobacteria [1], the mass blooms of which is regularly observed in the Baltic Sea during the summer season. Figure 6 shows seasonal changes in chlorophyll concentration, the particle backscattering and the yellow substance absorption coefficients, and sea surface temperature.

In the considered period, the only record value of the bio-optical characteristics, registered for the Gulf of Finland, was the *Chl* concentration in May 2017 (4.9 mg m^{-3}). The *SST* values significantly exceeded the average climatic values in May-September 2018, but these values were far from the record ones (more than $21 \text{ }^\circ\text{C}$ in July-August 2010). In 2018, values of the cyanobacteria biomass were significantly higher than in 2016 and 2017 (however, they were far from the record values in July 2004 - about 800 mg m^{-3} and in August 2015 - more than 600 mg m^{-3} [1]).

The monthly mean spatial distributions of the cyanobacteria biomass in July and August 2017 and 2018 are shown in Figure 7. In August, the bloom shifted eastward from the open part of the Bay in July, where BCyan values exceeded 600 mg m^{-3} on a large area.

Black Sea

Seasonal changes in chlorophyll concentration, the particle backscattering coefficient, coccolithophore cell concentration and sea surface temperature in the eastern deepwater part (subregion # 7) and the eastern coastal zone (subregion # 8) are shown in Figure 8.

The record-high b_{bp} values were registered in subregion # 8 in May-July 2017 (in subregion # 7 the b_{bp} values were also high, but less than in 2012). These values have arisen from an intense coccolithophore bloom [5].

In subregion # 8, a record high chlorophyll concentration was recorded in July 2017, which was also due to coccolithophore bloom. Changes in the values of the absorption coefficient in 2017-2018 were considered in a recently published work [6].

Figure 9 shows the monthly mean distributions of the concentration of coccolithophore cells in the Black Sea in May and June 2017 and 2018. It can be seen that in June 2017, the bloom covered almost the entire sea, while in 2018 there was virtually no bloom. Note that in 2017, pronounced bloom was observed in May. The average value of cell concentration in subregion # 8 in May 2017 was inferior to May 2012, but surpassed the latter in area of the bloom - about 200 thousand square kilometers.

Caspian Sea

Seasonal changes in chlorophyll concentration, the particle backscattering and the yellow substance coefficients, sea surface temperature for three subregions of the Caspian Sea [1] are shown in Figure 10.

During the considered period, several record high parameter values were registered in the Caspian Sea; all of them were in the North and Middle Caspian. In the first, chlorophyll concentration were exceeded record values in June and August 2016, the b_{bp} values - in May 2018. In the Middle Caspian, chlorophyll concentration exceeded the record value in June 2016 and August 2017, the b_{bp} coefficient - in August 2017, the yellow substance absorption coefficient - in August-September 2017. Sea surface temperature in the summer months was higher than the average climatic values, its relationship with the values of the bio-optical characteristics was not found.

Figure 11 shows the distribution of chlorophyll concentration in July and the b_{bp} values in August 2016-2018 as well as the “mean climatic” distribution 1998-2011. It can be seen that the Middle and South sub-regions are noticeably distinguished by high *Chl* and b_{bp} values in 2017.

Summing up the results presented above, it should be noted that during the period under review, the record values of at least one of the bio-optical characteristics were registered in all considered seas. Interestingly, in the vast majority of cases, the record values were observed in 2017: they related either to the b_{bp} coefficient (in the Barents, Kara, Black and Caspian seas) or to chlorophyll concentration (White and Baltic Seas, the Middle Caspian). The reasons for this are currently not clear yet.

Литература

1. Копелевич О.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Шеберстов С.В., Буренков В.И., Каралли П.Г., Юшманова А.В. Биооптические характеристики морей, омывающих берега западной половины России, по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2017 гг. // М.: ООО «ВАШ ФОРМАТ», 2018. – 140 с. (См. Приложение 8)
2. Копелевич О.В., Шеберстов С.В., Салинг И.В., Вазюля С.В., Буренков В.И. Сезонная и межгодовая изменчивость биооптических характеристик вод поверхностного слоя Баренцева, Белого, Черного и Каспийского морей по спутниковым данным // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2015. Т. 8. No.1. С. 7–16.
3. Копелевич О.В., Вазюля С.В., Салинг И.В., Шеберстов С.В., Буренков В.И. Электронный атлас «Биооптические характеристики морей России по данным спутниковых сканеров цвета 1998-2014 гг.» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 6. С. 99-110.
4. Копелевич О.В., Салинг И.В. Межгодовые изменения биооптических характеристик морей России по спутниковым данным в 2016-2018 гг. // Труды X Юбилейной Всероссийской конференции «Современные проблемы оптики естественных вод». СПб.: ОАО "Издательство "ХИМИЗДАТ", 2019. С. 106-113.
5. Копелевич О.В., Артемьев В.А., Вазюля С.В., Глуховец Д.И., Салинг И.В., Юшманова А.В. Исследование биооптических характеристик поверхностного слоя// В монографии: «Некоторые результаты комплексной прибрежной экспедиции «Черное море – 2017» на МНИС «Ашамба». М.: Изд-во «Научный мир», 2018. 172 с.
6. Yushmanova A., Kopelevich O., Vazyulya S., and Sahling I. Inter-Annual Variability of the Seawater Light Absorption in Surface Layer of the Northeastern Black Sea in Connection with Hydrometeorological Factors // J. Mar. Sci. Eng. 2019, 7, 326; doi:10.3390/jmse7090326.