

## Среднегодовое внутригодовое изменение характеристик, хлорофилла *a* и температуры на поверхности Чёрного моря по спутниковым данным

Ю. В. Артамонов, Е. А. Скрипалева, А. А. Латушкин, А. В. Федирко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, 299011, Россия  
E-mail: artam-ant@yandex.ru

На основе среднемесячных значений температуры поверхности моря, концентрации хлорофилла *a*, показателя диффузного ослабления света на длине волны 490 нм и коэффициента яркости моря на длине волны 555 нм по данным массива спутниковых измерений Copernicus (1998–2017) проанализированы пространственно-временные особенности климатической внутригодовой изменчивости этих параметров. Выявлены области с максимальной внутригодовой изменчивостью этих характеристик. Показано, что у северных берегов моря наблюдается уменьшение уровня сезонной изменчивости температуры, концентрации хлорофилла *a* и показателя диффузного ослабления света, тогда как у южных берегов понижение уровня сезонной изменчивости температуры сопровождается повышением уровня изменчивости концентрации хлорофилла *a* и показателя диффузного ослабления света. Также продемонстрировано, что во внутригодовом цикле основной максимум концентрации хлорофилла *a* и показателя диффузного ослабления света на северо-западном шельфе отмечается в мае, в период самой высокой скорости прогрева вод и примерно через месяц после наступления максимума стока р. Дунай; в южной части западного шельфа и в глубоководной части моря — в ноябре, когда наблюдается максимальная скорость охлаждения вод. Оценены корреляционные связи между полем температуры, концентрацией хлорофилла *a* и коэффициентами диффузного ослабления света и яркости моря. Выявлено, что сезонные изменения биооптических параметров лучше согласуются с интенсивностью изменений температуры от месяца к месяцу.

**Ключевые слова:** Чёрное море, спутниковые данные, сезонная изменчивость, температура поверхности моря, концентрация хлорофилла *a*, показатель диффузного ослабления света, коэффициент яркости моря

Одобрена к печати: 26.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-171-180

### Введение

В последние десятилетия для исследования климатических тенденций в изменении биопродуктивности морских акваторий и контроля их экологического состояния широко используются спутниковые данные (Копелевич и др., 2015а; Sokacac et al., 2004; Gordon et al., 2001; Kopelevich et al., 2014). Существенным вкладом в этом направлении является создание и усовершенствование электронного Атласа биооптических характеристик морей России на основе спутниковой информации о цвете океана (Копелевич и др., 2015а). На базе разных версий Атласа появились исследования, посвящённые уточнению изменчивости биооптических характеристик Чёрного моря. В работе (Артамонов и др., 2008) на основе Атласа (Kopelevich et al., 2005) показано, что на западе и в центре Чёрного моря во внутригодовом ходе концентрации хлорофилла *a* (*Chl-a*) прослеживаются два максимума: интенсивный — в октябре — декабре и более слабый — в июле — августе. Основной максимум величины показателя рассеяния света назад взвешенными частицами ( $b_{bp}$ ) приходится на май — июнь. Максимум показателя поглощения растворённого органического вещества ( $a_g$ ) у Крымского и Анатолийского побережий наступает в октябре — ноябре, в центральной части моря и на востоке — в феврале — марте, на северо-западе — в апреле — июне. По данным нового выпуска Атласа “Bio-optical characteristics of the Russian seas from satellite ocean color data” выявлено,

что изменения биооптических параметров на восточном шельфе и в прилегающей глубоководной части Чёрного моря подобны показателям, полученным в работе (Копелевич и др., 2015б). Концентрация *Chl-a* имеет два основных максимума: весенний (март–май) и осенний (октябрь–ноябрь). Показатель  $b_{bp}$  имеет чётко выраженный максимум в июне, связанный с цветением кокколитофорид и речным стоком.

В некоторых работах исследовалась связь биооптических параметров с термохалинной структурой вод. По данным Атласа (Korelevich et al., 2005) выявлены высокие линейные связи сезонных циклов  $b_{bp}$  и солёности с  $a_g$  и температурой на поверхности моря (ТПМ) в центральной части (Артамонов и др., 2012). Проявление Основного черноморского течения (ОЧТ) и речного стока в распределении коэффициента яркости моря ( $R_{rs}$ ) рассмотрено в работе (Карабашев, Евдошенко, 2015) по данным сканера цвета океана MODIS-Aqua за 2003–2011 гг. Показано, что ОЧТ проявилось в апрельском распределении  $R_{rs}$  в виде полосы его повышенных значений над континентальным склоном. В то же время в структуре распределений  $R_{rs}$  авторами не обнаружено признаков проникновения речного стока до континентального склона даже в период весеннего паводка.

Несмотря на успехи, достигнутые в исследовании изменчивости биооптических характеристик на основе данных сканеров цвета океана, некоторые вопросы требуют уточнения. Например: существуют ли общие закономерности в положении районов экстремальной изменчивости разных биооптических параметров; есть ли связь между скоростью прогрева и выхолаживания вод и временем наступления экстремумов биооптических характеристик; какова связь между внутригодовыми циклами биооптических параметров на статистическом уровне. Для ответов на эти вопросы удобно использовать цифровые массивы данных 3-го и 4-го уровней, базирующиеся на обработке спутниковой информации.

В настоящей работе на основе наиболее современного цифрового массива спутниковых данных уточняются региональные особенности среднегодовой внутригодовой изменчивости биооптических характеристик на всей акватории Чёрного моря и оценивается их связь с полем температуры.

## Материалы и методика

В работе использовались среднемесячные значения концентрации хлорофилла *a*, среднесуточные значения показателя диффузного ослабления света на длине волны 490 нм ( $K_d(490)$ ) и коэффициента яркости моря на длине волны 555 нм ( $R_{rs}(555)$ ), измеренные спутниковыми сканерами MODIS-Aqua и NPP-VIIRS, и среднесуточные значения ТПМ, измеренные радиометром (PFV52) AVHRR. Данные ТПМ и *Chl-a* 4-го уровня,  $K_d(490)$  и  $R_{rs}(555)$  3-го уровня взяты из массива Copernicus (<http://marine.copernicus.eu/interactive%20catalogue>) с пространственным разрешением примерно 6,6×4,7 км для ТПМ и 1×1 км для *Chl-a*,  $R_{rs}(555)$  и  $K_d(490)$  за период с 1998 по 2017 г.

По среднесуточным значениям ТПМ,  $R_{rs}(555)$  и  $K_d(490)$  в каждом узле соответствующей сетки были получены временные ряды их среднемесячных значений для каждого года. Затем среднемесячные ряды значений ТПМ, *Chl-a*,  $R_{rs}(555)$  и  $K_d(490)$  приводились к климатическому виду помесечным осреднением за весь период 1998–2017 гг. Уровень сезонной изменчивости ТПМ, *Chl-a*,  $R_{rs}(555)$  и  $K_d(490)$  оценивался по их среднеквадратическим отклонениям (СКО) для каждого года, которые затем осреднялись за 20 лет ( $СКО_{сез}$ ). Скорость прогрева и выхолаживания вод для каждого месяца оценивалась как величина разницы ТПМ ( $\Delta ТПМ$ ) между значениями ТПМ текущего месяца и предшествующего.

В работе анализировались линейные связи сезонных циклов среднемесячных величин ТПМ,  $\Delta ТПМ$ , *Chl-a*,  $R_{rs}(555)$  и  $K_d(490)$ , а также распределения максимумов их взаимно-корреляционных функций и соответствующих сдвигов, рассчитанных в каждом узле сетки на всей акватории Чёрного моря (на 95%-м уровне статистической значимости). При анализе линейных связей и расчёте взаимно-корреляционных функций поля ТПМ и  $\Delta ТПМ$  пересчитывались в узлы сетки биооптических параметров 1×1 км.

## Анализ результатов

Пространственные распределения  $SKO_{\text{сез}}$   $Chl-a$ ,  $K_d(490)$  и ТПМ показали, что общее повышение их значений, превышающих  $0,15 \text{ мг/м}^3$ ,  $0,025 \text{ м}^{-1}$  и  $6,8 \text{ }^\circ\text{C}$  соответственно, наблюдается на западном шельфе моря (рис. 1а–в). Увеличение  $SKO_{\text{сез}}$  ТПМ (до  $6,7\text{--}6,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) прослеживается в зонах Западного и Восточного циклонических круговоротов, где также отмечается некоторое повышение  $SKO_{\text{сез}}$   $Chl-a$  ( $0,07\text{--}0,08 \text{ мг/м}^3$ ) и  $K_d(490)$  (до  $0,014\text{--}0,015 \text{ м}^{-1}$ ). Понижение  $SKO_{\text{сез}}$   $Chl-a$  (ниже  $0,05 \text{ мг/м}^3$ ) и  $K_d(490)$  (ниже  $0,0125 \text{ м}^{-1}$ ) выявлено в области низких значений  $SKO_{\text{сез}}$  ТПМ (ниже  $6,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) в северной части моря, где ослабление температурных контрастов связано с повышением ТПМ в зимне-весенний период в результате переноса ОЧТ относительно тёплых вод с востока (Артамонов и др., 2012).

Помимо общих закономерностей в распределениях  $SKO_{\text{сез}}$  ТПМ и биооптических параметров, выявлены некоторые отличия. Так, максимальные значения  $SKO_{\text{сез}}$  ТПМ ( $7,6\text{--}7,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ) наблюдаются в самой мелководной части северо-западного шельфа ближе к Одесскому заливу, где наиболее выражены процессы сезонного прогрева и выхолаживания вод (см. рис. 1а). В то же время максимальные значения  $SKO_{\text{сез}}$   $Chl-a$  ( $0,55\text{--}0,85 \text{ мг/м}^3$ ) и  $K_d(490)$  ( $0,075\text{--}0,095 \text{ м}^{-1}$ ) отмечаются ближе к Днепро-Бугскому, Днестровскому лиманам и к дельте р. Дунай, где сказывается влияние речного стока (см. рис. 1б, в). Полоса повышенных значений  $SKO_{\text{сез}}$  ТПМ над западным шельфом прослеживается до прибосфорского района (см. рис. 1а), в то время как высокий уровень сезонной изменчивости  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  наблюдается в узкой прибрежной полосе практически по всему периметру моря (см. рис. 1б, в), что обусловлено внутригодовым изменением стока рек и проникновением азовских вод через Керченский пролив. Характерно, что у Анатолийских берегов при высоком уровне сезонной изменчивости  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  ( $SKO_{\text{сез}}$  выше  $0,1 \text{ мг/м}^3$  и  $0,02 \text{ м}^{-1}$  соответственно) наблюдаются низкие значения  $SKO_{\text{сез}}$  ТПМ (ниже  $6,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) вследствие развития в летний период Анатолийского апвеллинга (Иванов, Белокопытов, 2011) (см. рис. 1а).

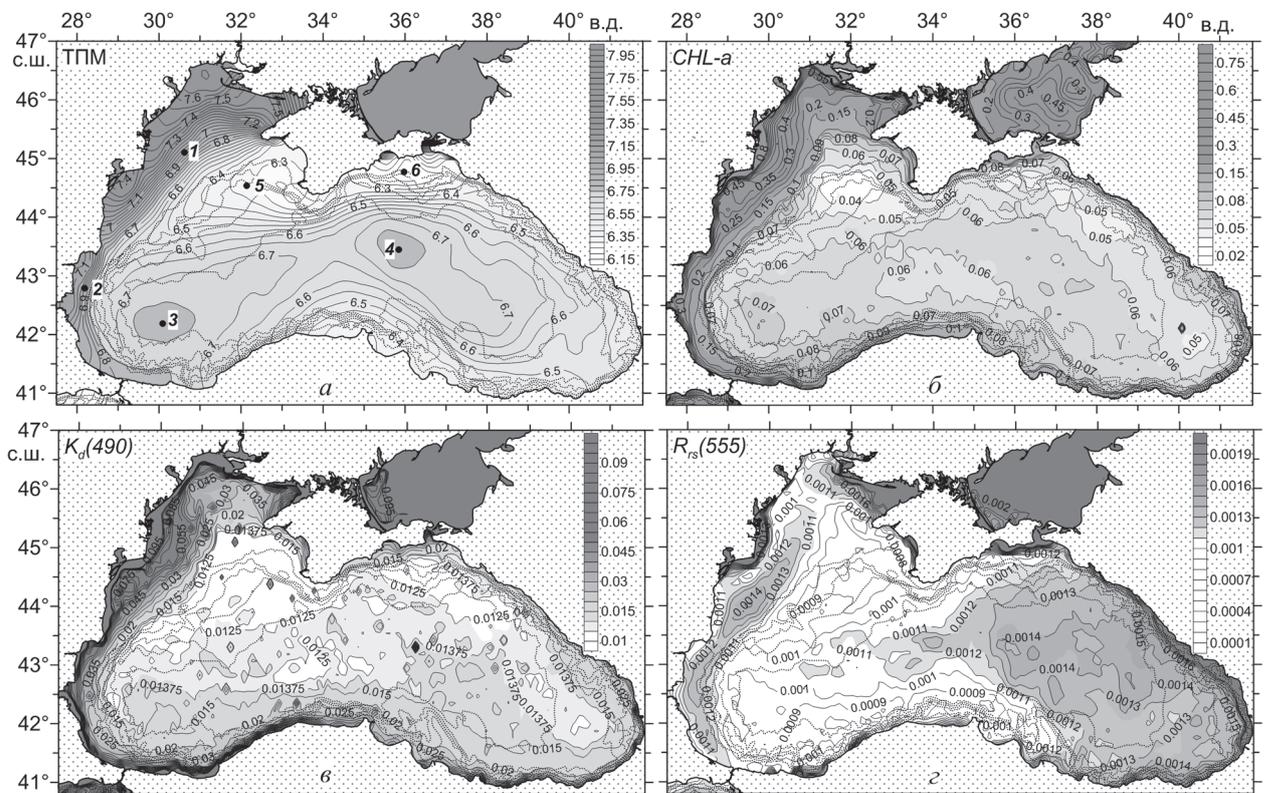


Рис. 1. Распределения  $SKO_{\text{сез}}$ : а — ТПМ; б — концентрации хлорофилла а; в — показателя диффузно-го ослабления света на длине волны 490 нм; г — коэффициента яркости моря на длине волны 555 нм (пунктир — основные изобаты 100, 500, 1000, 1500 и 2000 м)

Таким образом, при уменьшении уровня сезонной изменчивости ТПМ у северных берегов моря наблюдается понижение  $SKO_{\text{сез}} Chl-a$  и  $K_d(490)$ , тогда как у южных берегов, наоборот, при низком уровне сезонной изменчивости ТПМ отмечается повышение  $SKO_{\text{сез}} Chl-a$  и  $K_d(490)$ . Это отличие связано с различным вкладом стока рек у северных и южных берегов моря в сезонную изменчивость  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  и влиянием адвекции вод ОЧТ и развития Анатолийского апвеллинга на изменчивость ТПМ. Отличия распределений  $SKO_{\text{сез}} Chl-a$  и  $K_d(490)$  наблюдаются и в положении областей их минимальных значений. Абсолютные минимумы  $SKO_{\text{сез}} Chl-a$  (ниже  $0,04 \text{ мг/м}^3$ ) и  $K_d(490)$  (ниже  $0,012 \text{ м}^{-1}$ ) прослеживаются западнее Крыма над свалом глубин.

Максимальные величины  $SKO_{\text{сез}} R_{rs}(555)$  ( $0,0015-0,0019 \text{ ср}^{-1}$ ), так же как и  $SKO_{\text{сез}} Chl-a$  и  $K_d(490)$ , наблюдаются в прибрежных районах интенсивного выноса речной взвеси и в области проникновения азовских вод на Керченско-Таманском шельфе (рис. 1г). В качестве отличий от распределений  $SKO_{\text{сез}} Chl-a$  и  $K_d(490)$  можно отметить: смещение максимума  $SKO_{\text{сез}} R_{rs}(555)$  (выше  $0,0016 \text{ ср}^{-1}$ ) на северо-западном шельфе в Каркинитский залив; увеличение  $SKO_{\text{сез}} R_{rs}(555)$  (выше  $0,0012 \text{ ср}^{-1}$ ) ближе к границе западного шельфа в полосе, вытянутой вдоль свала глубин; повышение  $SKO_{\text{сез}} R_{rs}(555)$  (выше  $0,0014 \text{ ср}^{-1}$ ) во всей восточной части моря. Положение области минимальных значений  $SKO_{\text{сез}} R_{rs}(555)$  (ниже  $0,0009 \text{ ср}^{-1}$ ) к западу от Крыма над свалом глубин качественно совпадает с положением области минимума  $SKO_{\text{сез}} Chl-a$  и  $K_d(490)$  (см. рис. 1г).

При наличии общих закономерностей распределения  $SKO_{\text{сез}} Chl-a$ ,  $K_d(490)$  и  $R_{rs}(555)$  наблюдаются различия во времени наступления максимумов этих параметров в течение года. На рис. 2 (см. с. 175) представлены примеры внутригодового хода ТПМ, скорости её изменения от месяца к месяцу  $\Delta TPМ$ ,  $Chl-a$ ,  $K_d(490)$  и  $R_{rs}(555)$  в точках, расположенных в районах экстремумов их  $SKO_{\text{сез}}$  (положение точек показано на рис. 1а).

В области высокого уровня сезонной изменчивости ТПМ,  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  на северо-западном шельфе (точка 1) основной максимум  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  наблюдается в мае, примерно через месяц после наступления апрельского максимума стока р. Дунай (Газетов и др., 2015). Этот период характеризуется высокой скоростью прогрева вод. Второе, более слабое увеличение значений  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  происходит в декабре, через один-два месяца после наступления в этом районе максимума скорости выхолаживания вод  $\Delta TPМ$ . В южной части западного шельфа (точка 2), где речной сток менее интенсивен, основной максимум  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  наблюдается в ноябре, когда скорость охлаждения вод максимальна. Увеличение значений  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  также происходит в мае, что может быть связано с усилением локального речного стока, и в феврале, когда значения ТПМ достигают минимума. В зонах Западного и Восточного циклонических круговоротов (точки 3 и 4) в глубоководной части моря в сезонном ходе  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  лучше выражена годовая периодичность с основным максимумом в ноябре, в период максимума скорости выхолаживания вод. Некоторое увеличение концентрации  $Chl-a$  и значений  $K_d(490)$  отмечается в июне, в период самого быстрого прогрева вод. Над свалом глубин западнее Крыма (точка 5) и к югу от Керченского п-ова (точка 6), где сезонная изменчивость ТПМ,  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  минимальна, основной максимум  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  наблюдается соответственно в декабре и ноябре при максимальной скорости выхолаживания вод. В феврале, когда ТПМ достигает минимума, происходит ещё одно слабое повышение значений  $Chl-a$  и  $K_d(490)$ . Максимум значений  $R_{rs}(555)$  во всех рассмотренных случаях отмечается в июне, в период наиболее высокой скорости прогрева поверхностных вод, когда происходит максимум цветения кокколитофорид (Копелевич и др., 2015б; Sokasar et al., 2004).

Анализ линейных связей между внутригодовым ходом величин ТПМ,  $\Delta TPМ$ ,  $Chl-a$ ,  $K_d(490)$  и  $R_{rs}(555)$  в точках 1–6 показал, что сезонные изменения биооптических параметров лучше согласуются не с ТПМ, а с интенсивностью её изменений от месяца к месяцу. Так, линейная связь между  $Chl-a$  и ТПМ (рис. 3а, см. с. 175) во всех точках незначима, тогда как между  $Chl-a$  и  $\Delta TPМ$  (рис. 3б) выявлен высокий уровень обратной линейной связи.

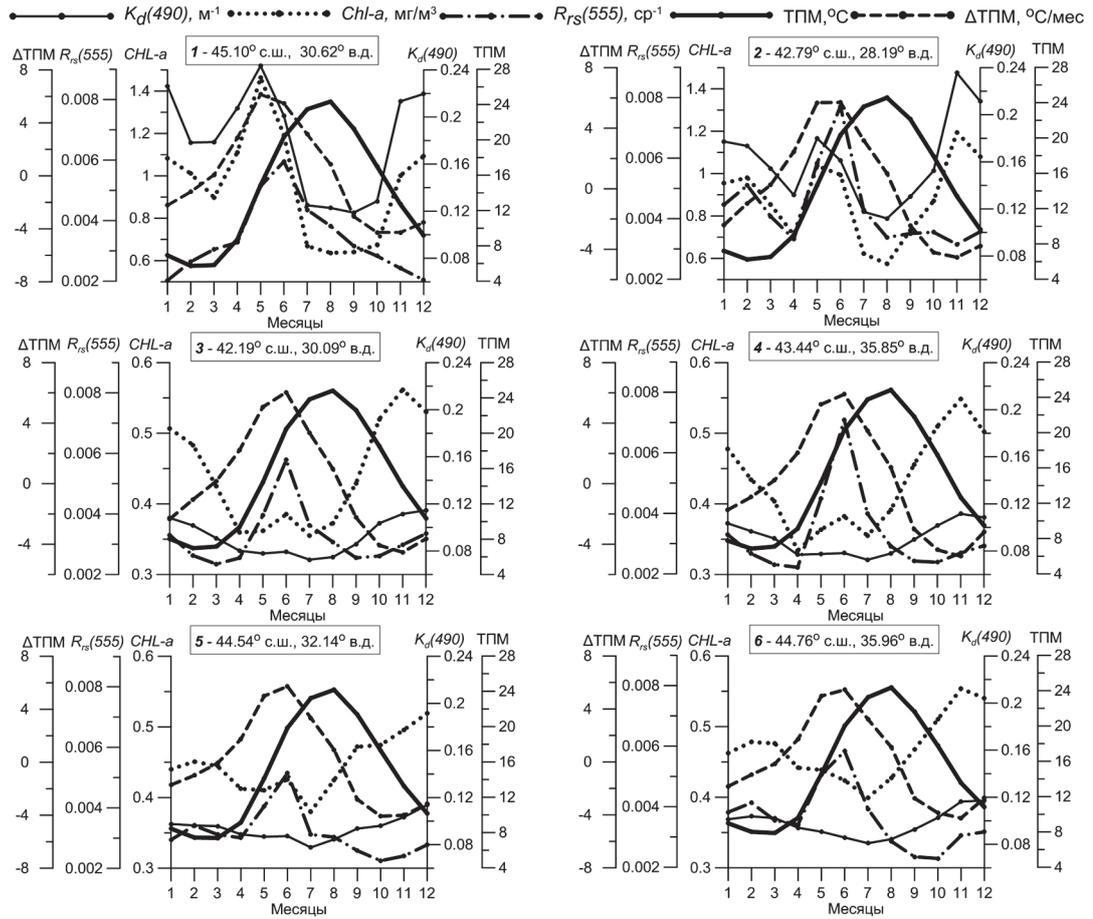


Рис. 2. Графики внутригодового цикла ТПМ (сплошные кривые), ΔТПМ (штриховые кривые),  $Chl-a$  (пунктир),  $K_d(490)$  (тонкие сплошные кривые) и  $R_{rs}(555)$  (штрих-пунктир)

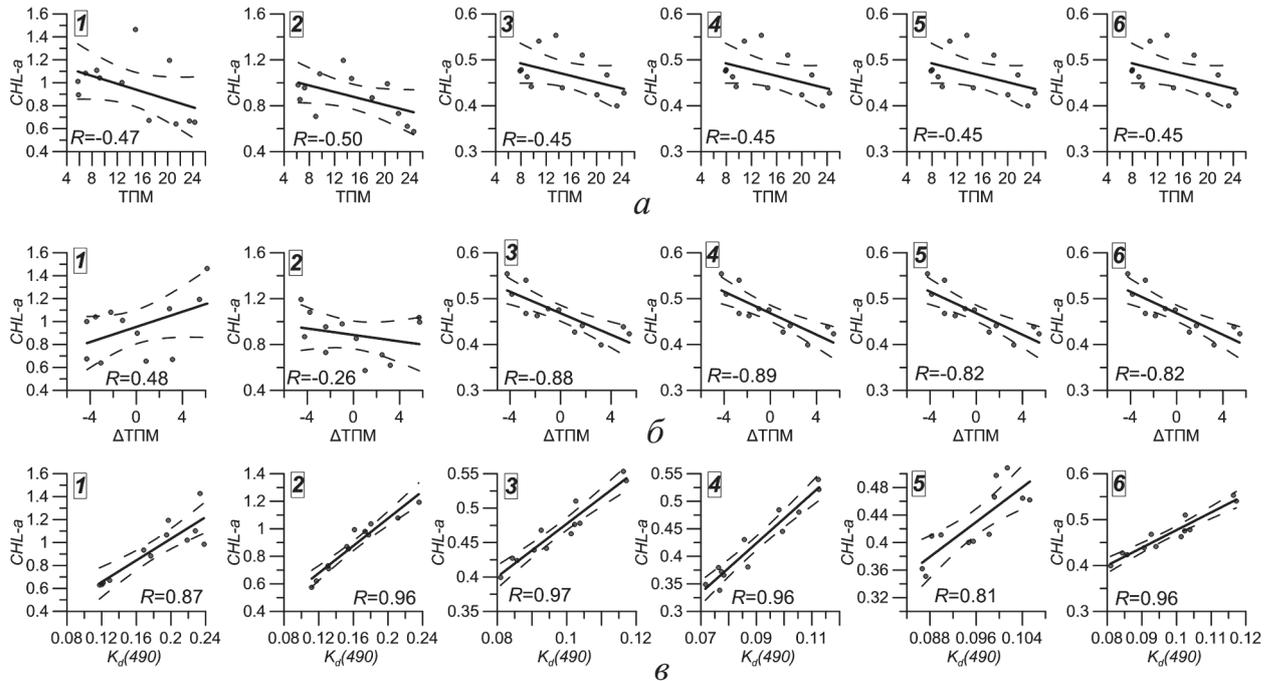


Рис. 3. Графики линейной связи между внутригодовым ходом величин: а —  $Chl-a$  и ТПМ, б —  $Chl-a$  и ΔТПМ, в —  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  в узлах сетки 1–6 (штриховые линии — границы 95%-го доверительного интервала)

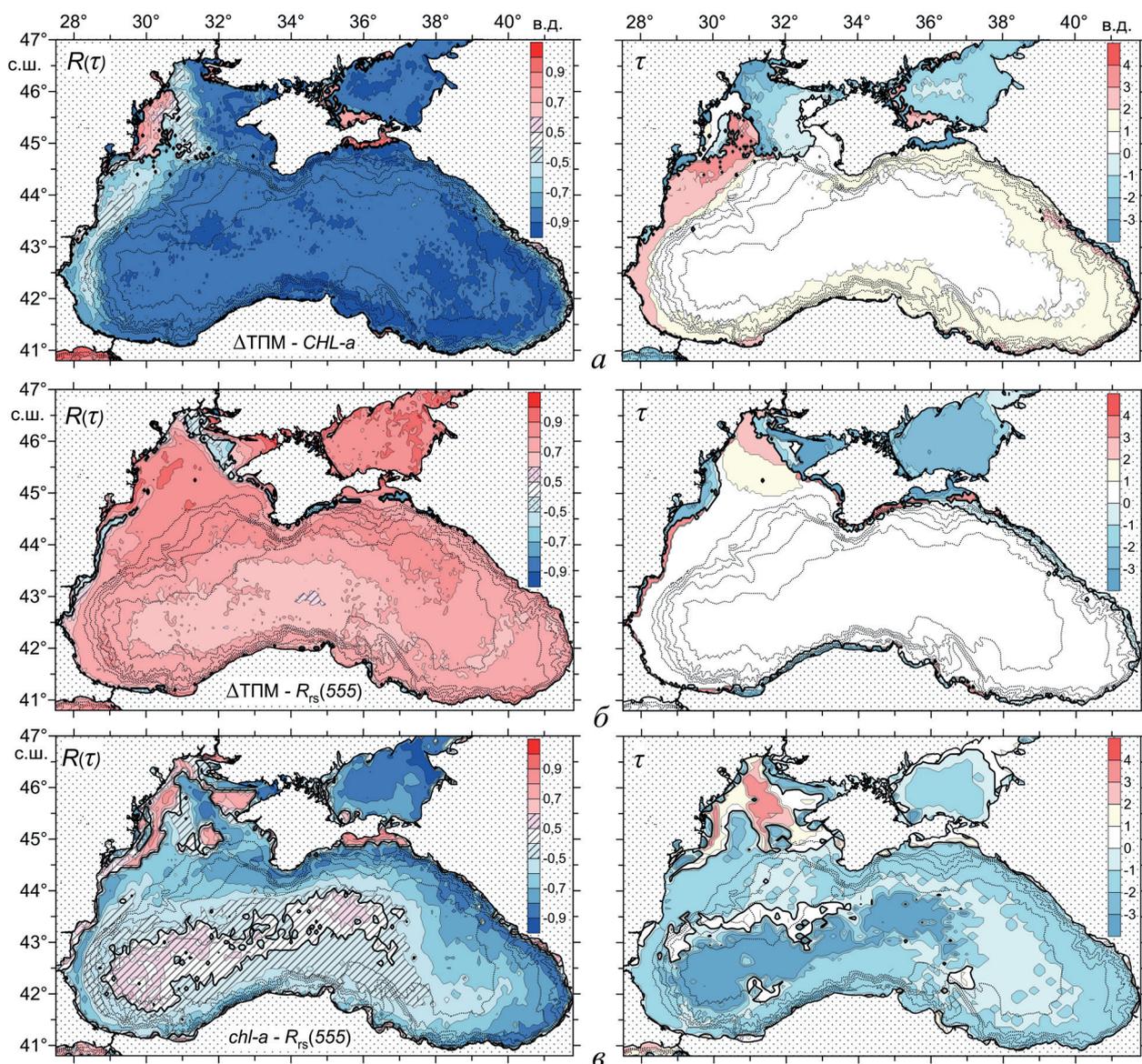


Рис. 4. Пространственные распределения максимумов взаимно-корреляционных функций  $R(\tau)$  и соответствующих им сдвигов  $\tau$  (мес) между: а —  $\Delta\text{ТПМ}$  и  $\text{Chl-a}$ , б —  $\Delta\text{ТПМ}$  и  $R_{rs}(555)$ , в —  $\text{Chl-a}$  и  $R_{rs}(555)$  (районы, где связь незначима на 95%-м уровне, заштрихованы)

Величины коэффициентов  $R$  между  $\text{Chl-a}$  и  $\Delta\text{ТПМ}$  составляют  $-0,88...-0,89$  в открытой части моря в зонах циклонических круговоротов (точки 3, 4) и  $-0,82$  к западу от Крыма и мористее Керченского п-ова (точки 5, 6). Связь между  $\text{Chl-a}$  и  $\Delta\text{ТПМ}$  незначима только в точках 1 и 2, располагающихся на западном шельфе, что может быть обусловлено наличием в течение года двух хорошо выраженных максимумов  $\text{Chl-a}$ , при этом один максимум наблюдается в мае в период максимальных положительных значений  $\Delta\text{ТПМ}$ , второй — в ноябре–декабре, когда отмечаются максимальные отрицательные значения  $\Delta\text{ТПМ}$ . Отметим, что между внутригодовыми распределениями  $\text{Chl-a}$  и  $K_d(490)$  выявлена высокая прямая линейная связь с величинами  $R \sim 0,81-0,97$  (рис. 3в).

Распределение максимума  $R(\tau)$  взаимно-корреляционной функции между  $\Delta\text{ТПМ}$  и  $\text{Chl-a}$  (рис. 4а) показывает наличие высокой обратной корреляции ( $R(\tau)$  выше 0,85 по абсолютной величине) при отсутствии временного сдвига почти на всей акватории моря, т. е. основной максимум  $\text{Chl-a}$  наступает в период максимальной скорости выхолаживания поверхностных вод. Временной сдвиг до трёх месяцев за счёт влияния прибрежных эффектов наблюдается в мелководной части северо-западного шельфа. Положительная корреляция с  $R(\tau)$  выше 0,7

выявлена между Белгород-Днестровским лиманом и дельтой Дуная при отсутствии временного сдвига, т.е. максимум  $Chl-a$  здесь наступает в период максимума скорости прогрева вод. В узкой полосе у берегов Крыма между Керченским проливом и Феодосийским заливом наблюдается временной сдвиг до 2–3 мес. Наступление максимума  $Chl-a$  в этом районе на 2–3 мес раньше максимума скорости прогрева вод может быть связано с проникновением сюда азовских вод.

Между  $\Delta T_{ПМ}$  и  $R_{rs}(555)$  выявлена значимая прямая корреляция при отсутствии временного сдвига почти на всей акватории моря, что подтверждает вывод о наступлении максимума  $R_{rs}(555)$  в период максимальной скорости прогрева поверхностных вод (рис. 4б). Временной сдвиг до трёх месяцев наблюдается в узкой вдольбереговой полосе в районах речного стока и выноса азовских вод и в Каркинитском заливе. В северной части моря величины  $R(\tau)$  превышают 0,85, в глубоководной части моря они понижаются до 0,6–0,7.

Корреляция между внутригодовыми распределениями  $Chl-a$  и  $R_{rs}(555)$  в центральной глубоководной части моря незначима (рис. 4в). Значимая прямая корреляция при отсутствии временного сдвига с величинами  $R(\tau)$  выше 0,7 выявлена в районах выноса речных вод на северо-западном шельфе и в Каркинитском заливе, а также в районе проникновения азовских вод на Керченско-Таманском шельфе. Высокий уровень обратной корреляции со значениями  $R(\tau)$  выше 0,8 и временным сдвигом до двух месяцев отмечается в шельфовой полосе вдоль всего восточного и Крымского побережий, т.е. внутригодовые изменения  $R_{rs}(555)$  и  $Chl-a$  в этом районе происходят в противофазе с двухмесячным сдвигом.

## Заключение

По данным современного массива данных спутниковых измерений COPERNICUS уточнены особенности климатической внутригодовой изменчивости концентрации хлорофилла  $a$ , показателя диффузного ослабления света и коэффициента яркости моря. Показано, что максимальные значения  $SKO_{сез} Chl-a$  и  $K_d(490)$  наблюдаются на западном шельфе в районах Днепро-Бугского, Днестровского лиманов и дельты р. Дунай. Полоса повышенных значений  $SKO_{сез} Chl-a$  и  $K_d(490)$  прослеживается практически по всему периметру моря. У северных берегов моря отмечено уменьшение  $SKO_{сез} T_{ПМ}$ ,  $Chl-a$  и  $K_d(490)$ ; у южных берегов, наоборот, понижение  $SKO_{сез} T_{ПМ}$  сопровождается повышением  $SKO_{сез} Chl-a$  и  $K_d(490)$ . Самые высокие величины  $SKO_{сез} R_{rs}(555)$ , также как и  $SKO_{сез} Chl-a$  и  $K_d(490)$ , прослеживаются в прибрежных районах интенсивного выноса речной взвеси и проникновения азовских вод. Наблюдается увеличение  $SKO_{сез} R_{rs}(555)$  на западном шельфе ближе к свалу глубин и во всей восточной части моря.

Показано, что во внутригодовом цикле основной максимум  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  на северо-западном шельфе наблюдается в мае, через месяц после максимума стока р. Дунай, когда скорость прогрева вод максимальна. Второе увеличение  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  здесь происходит в декабре, через два месяца после наступления в этом районе максимума скорости выхолаживания вод. В южной части западного шельфа, где речной сток менее интенсивен, основной максимум  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  наблюдается в ноябре, когда скорость охлаждения вод максимальна. Увеличение значений  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  происходит также в мае, что может быть связано с усилением локального речного стока, и в феврале, когда наблюдается минимум  $T_{ПМ}$ . В глубоководной части моря основной максимум  $Chl-a$  и  $K_d(490)$  отмечается в ноябре, в период наибольшей скорости выхолаживания вод. Некоторое увеличение концентрации  $Chl-a$  и значений  $K_d(490)$  отмечается в июне, в период самого быстрого прогрева вод. Максимум  $R_{rs}(555)$  на большей части акватории также наступает в июне, когда воды наиболее быстро прогреваются.

На большей части акватории моря выявлена высокая корреляция между внутригодовыми циклами  $\Delta T_{ПМ}$  и  $Chl-a$  (обратная) и между  $\Delta T_{ПМ}$  и  $R_{rs}(555)$  (прямая) при отсутствии временного сдвига, т.е. основной максимум  $Chl-a$  наступает в период наибольшей скорости выхолаживания вод, а максимум  $R_{rs}(555)$  — во время наибольшей скорости их прогрева.

В районах интенсивного речного стока (западный шельф между Белгород-Днестровским лиманом и дельтой Дуная) и выноса азовских вод между *Chl-a* и ДТММ выявлена значимая положительная корреляция. Между *Chl-a* и  $R_{rs}(555)$  прослеживается значимая прямая корреляция при отсутствии временного сдвига в районах выноса речных вод на северо-западном шельфе и в Каркинитском заливе, а также в районе проникновения азовских вод на Керченско-Таманском шельфе. Высокий уровень обратной корреляции отмечается в узкой шельфовой полосе вдоль всего восточного и Крымского побережий моря.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН МГИ по темам № 0827-2018-0002 и 0827-2018-0003.

## Литература

1. Артамонов Ю. В., Скрипалева Е. А., Шугаев А. В. Региональные особенности сезонной изменчивости распределения хлорофилла «а» и оптических характеристик на поверхности Черного моря // Системы контроля окружающей среды. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. С. 216–219.
2. Артамонов Ю. В., Белокопытов В. Н., Скрипалева Е. А. Особенности изменчивости гидрологических и биооптических характеристик на поверхности Черного моря по данным спутниковых и контактных измерений // Устойчивость и эволюция океанологических характеристик экосистемы Черного моря / под ред. В. Н. Еремеева, С. К. Коновалова. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2012. С. 88–115.
3. Газетов Е. И., Андрианова О. Р., Мединец В. И., Белевич Р. Р., Морозов В. Н. Оценка влияния стока реки Дунай на отдельные гидрологические характеристики северо-западной части Черного моря в 2004–2013 гг. // Вестник Одесского нац. ун-та. Географические и геологические науки. 2015. Т. 20. Вып. 4. С. 22–34.
4. Иванов В. А., Белокопытов В. Н. Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 209 с.
5. Карабашев Г. С., Евдошенко М. А. Проявления Основного черноморского течения, «цветения» кокколитофорид и континентального стока в среднемесячных распределениях коэффициента яркости Черного моря // Океанология. 2015. Т. 55. № 1. С. 44–55. DOI: 10.7868/S0030157415010086.
6. Копелевич О. В., Вазюля С. В., Салинг И. В., Шеберстов С. В., Буренков В. И. (2015а) 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.
7. Копелевич О. В., Шеберстов С. В., Салинг И. В., Вазюля С. В., Буренков В. И. (2015б) 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. № 1. С. 7–16.
8. Cokacar T., Oguz T., Kubilay N. Satellite detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the Black Sea // Deep-Sea Research. 2004. Part I. V. 51. P. 1017–1031.
9. Gordon H. R., Boynton G. C., Balch W. M., Groom S. B., Harbour D. S., Smyth T. J. Retrieval of coccolithophore calcite concentration from SeaWiFS imagery // Geophysical Research Letters. 2001. V. 28. No. 8. P. 1587–1590.
10. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Sheberstov S. V., Lukyanova E. A., Prokhorenko O. V. Bio-optical characteristics of the seas of Russia from data of the SeaWiFS satellite ocean color scanner. М.: P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, 2005.
11. Kopelevich O., Burenkov V., Sheberstov S., Vazyulya S., Kravchishina M., Pautova L., Silkin V., Artemiev V., Grigoriev A. Satellite monitoring of coccolithophore blooms in the Black Sea from ocean color data // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 146. P. 113–123.

## Multi-year average intra-annual cycle of hydrooptical characteristics, chlorophyll *a* and surface temperature of the Black Sea from satellite data

Yu. V. Artamonov, E. A. Skripaleva, A. A. Latushkin, A. V. Fedirko

*Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol 299011, Russia*  
*E-mail: artam-ant@yandex.ru*

On the basis of monthly means of sea surface temperature, concentration of chlorophyll *a*, diffuse attenuation coefficient at the wavelength of 490 nm and remote sensing reflectance at the wavelength of 555 nm according to the array of satellite measurements COPERNICUS (1998–2017) spatial and temporal characteristics of climatic intra-annual variability of these parameters were analyzed. The regions of the highest intra-annual variability of these characteristics are identified. It is shown that a decrease in the level of seasonal variability of temperature, chlorophyll *a* concentration and diffuse attenuation coefficient is observed at the northern coasts of the sea, while in the southern coasts, a decrease in the level of seasonal temperature variability is accompanied by an increase in the level of variability of the chlorophyll *a* concentration and the diffuse attenuation coefficient. It was shown that in the intra-annual cycle, the main maximum of the chlorophyll *a* concentration and the diffuse attenuation coefficient in the northwestern shelf is observed in May, at the time of the highest rate of warming up of water and about a month after the maximum of the Danube runoff, in the southern part of the western shelf and in the deep sea — in November, when the maximum cooling rate of the waters is observed. The correlation between the sea surface temperature, concentration of chlorophyll *a*, diffuse attenuation coefficient and remote sensing reflectance is estimated. It is revealed that seasonal changes in bio-optical parameters are in better agreement with the intensity of the temperature changes from month to month.

**Keywords:** Black Sea, satellite data, seasonal variability, sea surface temperature, chlorophyll *a* concentration, diffuse attenuation coefficient, remote sensing reflectance

Accepted: 26.10.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-1-171-180

### References

1. Artamonov Yu. V., Skripaleva E. A., Shugaev A. V., Regional'nye osobennosti sezonnoi izmenchivosti raspredeleniya khlorofilla "a" i opticheskikh kharakteristik na poverkhnosti Chernogo morya (Regional features of seasonal variability of the distributions of chlorophyll *a* and optical characteristics on the Black Sea surface), In: *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy* (Control systems of the environment), Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2008, pp. 216–219.
2. Artamonov Yu. V., Belokopytov V. N., Skripaleva E. A., Osobennosti izmenchivosti gidrologicheskikh i bioopticheskikh kharakteristik na poverkhnosti Chernogo morya po dannym sputnikovykh i kontaktnykh izmerenii (The features of variability of hydrological and biooptical characteristics on the Black Sea surface according to satellite and contact measurements), In: *Ustoichivost' i evolyutsiya okeanologicheskikh kharakteristik ekosistemy Chernogo morya* (Stability and evolution of oceanologic characteristics of Black Sea ecosystem), V. N. Ereveev, S. K. Konovalov (eds.), Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2012, pp. 88–115.
3. Gazetov E. I., Andrianova O. R., Medinets V. I., Belevich R. R., Morozov V. N., Otsenka vliyaniya stoka reki Dunai na ot-del'nye gidrologicheskie kharakteristiki severo-zapadnoi chasti Chernogo morya v 2004–2013 gg. (Assessment of the Danube river influence on some hydrological characteristics of the northwestern Black Sea in 2004–2013), *Odessa National University Herald. Geographical and geological sciences*, 2015, Vol. 20, Issue 4, pp. 22–34.
4. Ivanov V. A., Belokopytov V. N., *Okeanografiya Chernogo morya* (Oceanography of Black Sea), Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2011, 209 p.
5. Karabashev G. S., Evdoshenko M. A., Proyavleniya Osnovnogo chernomorskogo techeniya, tsveteniya kokkolytoforid i kontinental'nogo stoka v srednemesyachnykh raspredeleniyakh koeffitsienta yarkosti Chernogo morya (Manifestations of the Rim Current, Coccolithophores Blooms, and Continental Runoff in the Long-term Monthly Mean Distributions of Satellite Reflectance Coefficient of the Black Sea), *Okeanologiya*, 2015, Vol. 55, No. 1, pp. 44–55, DOI: 10.7868/S0030157415010086.

6. Kopelevich O. V., Vazyulya S. V., Saling I. V., Sheberstov S. V., Burenkov V. I. (2015a), Elektronnyi Atlas "Bioopticheskie kharakteristiki morei Rossii po dannym sputnikovykh skanerov tsveta 1998–2014 gg." (Electronic Atlas "Biooptical characteristics of the Russian Seas from satellite ocean color data of 1998–2014"), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 6, pp. 99–110.
7. Kopelevich O. V., Sheberstov S. V., Saling I. V., Vazyulya S. V., Burenkov V. I. (2015b), Sezonnaya i mezhgodovaya izmenchivost' bioopticheskikh kharakteristik vod poverkhnostnogo sloya Barentseva, Belogo, Chernogo i Kaspiiskogo morei po sputnikovym dannym (Seasonal and inter-annual changeability of biooptical characteristics in the surface layer of the Barents, White, Black and Caspian Seas from satellite data), *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2015, Vol. 8, No. 1, pp. 7–16.
8. Cokacar T., Oguz T., Kubilay N., Satellite detected early summer coccolithophore blooms and their inter-annual variability in the Black Sea, *Deep-Sea Research*, 2004, Part I, Vol. 51, pp. 1017–1031.
9. Gordon H. R., Boynton G. C., Balch W. M., Groom S. B., Harbour D. S., Smyth T. J., Retrieval of coccolithophore calcite concentration from SeaWiFS imagery, *Geophysical Research Letters*, 2001, Vol. 28, No. 8, pp. 1587–1590.
10. Kopelevich O. V., Burenkov V. I., Sheberstov S. V., Lukyanova E. A., Prokhorenko O. V., *Bio-optical characteristics of the seas of Russia from data of the SeaWiFS satellite ocean color scanner*, Moscow: P. P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, 2005.
11. Kopelevich O., Burenkov V., Sheberstov S., Vazyulya S., Kravchishina M., Pautova L., Silkin V., Artemiev V., Grigoriev A., Satellite monitoring of coccolithophore blooms in the Black Sea from ocean color data, *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 146, pp. 113–123.