

**СЕЗОННАЯ И МЕЖГОДОВАЯ  
ИЗМЕНЧИВОСТЬ  
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ХЛОРОФИЛЛА  
“А” НА ПОВЕРХНОСТИ ЧЕРНОГО  
МОРЯ ПО ДАННЫМ SEAWIFS**

*Ю.В. Артамонов, Е.А. Скрипалева,  
А.В. Шугаев*

Морской гидрофизический институт  
НАН Украины  
г. Севастополь, ул. Капитанская, 2  
E-mail: sea-ant@yandex.ru

*На основе расчетов среднегодовых и среднемесячных климатических значений концентрации хлорофилла “а” по данным массива SeaWiFS за период с 1997 по 2009 гг. исследована ее сезонная и межгодовая изменчивость на поверхности Черного моря. Проводится сравнение климатических сезонных циклов концентрации хлорофилла “а”, полученных по массиву SeaWiFS и массиву, сформированному по данным Атласа [Korelevich et al., 2005]. Полученные результаты анализируются в связи с изменчивостью структуры вод.*

**Введение.** Результаты обобщения спутниковых измерений гидрооптических характеристик на поверхности морей и океанов, выполненных с высокой пространственной дискретностью, позволили существенно расширить наши представления об изменчивости оптических полей в поверхностном слое океана. В работах [1 – 5] на основе расчетов среднемесячных климатических значений концентрации хлорофилла “а” (*Chl-a*) за период с 1998 по 2004 гг. из Атласа [6] исследованы региональные особенности его сезонной изменчивости на поверхности Черного моря. Результаты проанализированы в связи с сезонной изменчивостью структуры вод. Показано, что максимумы амплитуды годовой гармоника ( $A_{\text{год}}$ ) концентрации *Chl-a* в районе п. Одессы и о. Змеиный совпадают с максимумами  $A_{\text{год}}$  солености на поверхности моря (СПМ), что указывает на связь концентрации хлорофилла “а” с сезонной изменчивостью речных стоков Днепра, Буга и Дуная. В Каркинитском заливе, где также выявлены высокие значения  $A_{\text{год}}$  *Chl-a*, влияние речного стока слабее, но отмечается интенсивная

сезонная изменчивость поля температуры на поверхности моря (ТПМ). Повышенные значения  $A_{\text{год}}$  концентрации *Chl-a* у Анатолийского берега отмечаются в области минимальной сезонной изменчивости ТПМ и СПМ. В этом районе сезонные колебания температуры сглаживаются за счет ее осенне-зимнего повышения при ослаблении ОЧТ и летнего понижения при усилении Анатолийского апвеллинга. Внутригодовые колебания солености здесь невелики за счет отсутствия интенсивного речного стока. В то же время здесь наблюдается максимум  $A_{\text{год}}$  зональной составляющей скорости Основного Черноморского течения (ОЧТ). По-видимому, повышение  $A_{\text{год}}$  концентрации *Chl-a* в этом районе связано с динамикой вод.

В настоящее время в МГИ НАН Украины создан новый, более полный массив спутниковых измерений концентрации хлорофилла “а” [7], который позволяет не только подтвердить и уточнить полученные закономерности сезонного цикла концентрации *Chl-a*, но и рассмотреть особенности ее межгодовой изменчивости.

**Материалы и методика.** В данной работе использовался массив средних двухнедельных значений концентрации *Chl-a* [7] с 1997 по 2009 гг. в узлах регулярной сетки  $0.13^\circ \times 0.13^\circ$ . Методика обработки спутниковых данных *SeaWiFS* изложена в работе [8].

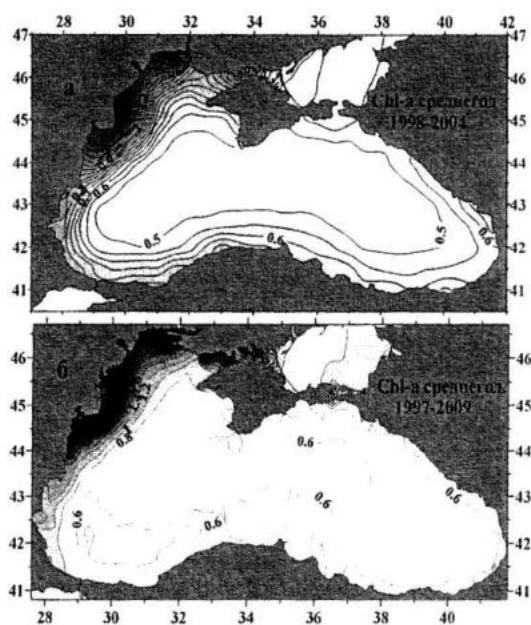
Для исследования сезонной изменчивости в каждом узле сетки вычислялись среднемесячные значения концентрации *Chl-a* и рассчитывались их амплитудно-фазовые характеристики. Для оценки значимости годовой ( $A_{\text{год}}$ ) и полугодовой ( $A_{\text{полугод}}$ ) гармоник поля соответствующих амплитуд были нормированы на стандартное отклонение остаточного ряда. Районы, где уровень полезного сигнала не превышает в два раза уровень шума, на картах заштрихованы. В работе проведено сравнение распределения амплитудно-фазовых характеристик концентрации *Chl-a*, рассчитанных по Атласу [6] (*Sea WiFS* с 1998 по 2004 гг.) и новому массиву [7] (*Sea WiFS* с 1997 по 2009 гг.).

Сезонная и межгодовая изменчивость параметра анализировалась также

на широтно-временных развертках, построенных для меридианов 30°, 31°, 32°, 34°, 36°, 38° и 40° в.д.

**Анализ результатов.** Среднегодовые распределения концентрации *Chl-a*, полученные по двум массивам в результате осреднения по разному объему первичной информации, показывают качественно одинаковую пространственную структуру (рис. 1). Максимальные среднегодовые значения концентрации *Chl-a* наблюдаются несколько восточнее Одессы, в Каркинитском заливе, у берегов Румынии, у о. Змеиный.

К принципиальным количественным отличиям между среднегодовыми значениями концентрации *Chl-a* по двум массивам относятся их значительно большие величины в зоне максимумов в северо-западной части моря. По данным Атласа [6] максимальные значения здесь не превышают 1.55 мг/м<sup>3</sup>, тогда как по новой версии массива *SeaWiFS* [7] они достигают 5.25 мг/м<sup>3</sup>.

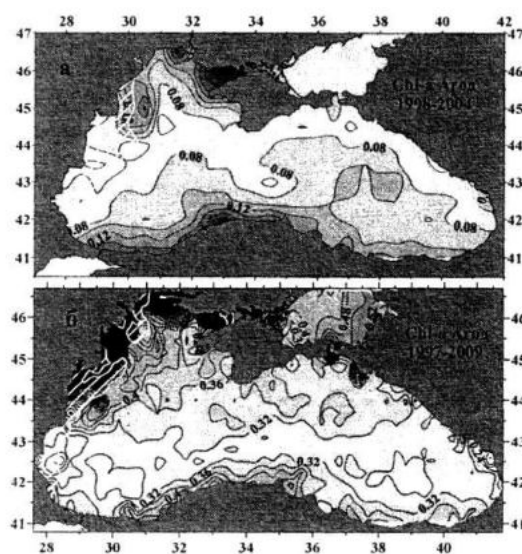


Р и с. 1. Среднегодовое распределение концентрации *Chl-a* за периоды 1998 – 2004 гг. по данным [6] (а) и 1997 – 2009 гг. по данным [7] (б)

Распределения амплитуды годовой гармоники по двум массивам также качественно совпадают (рис. 2). Амплитуда годовой гармоники концентрации *Chl-a* значима на всей акватории Черного моря, кроме районов, прилегающих к берегам Болгарии и Румынии.

Максимальные значения  $A_{\text{год}}$  ( $> 0.25$  мг/м<sup>3</sup> по данным [6] и  $> 4.5$  мг/м<sup>3</sup> по данным [7]) наблюдаются в Каркинитском заливе, несколько восточнее Одессы, у о. Змеиный и вдоль Анатолийского побережья.

Основные различия относятся к величинам  $A_{\text{год}}$ . Максимальные значения  $A_{\text{год}}$  во втором случае в 3 – 4 раза выше в открытой части моря и почти на порядок выше в прибрежных районах. Кроме того, появляются очаги максимальных значений  $A_{\text{год}}$  концентрации *Chl-a* ( $> 4.0$  мг/м<sup>3</sup>) у Керченского пролива и в районе порта Новороссийск.



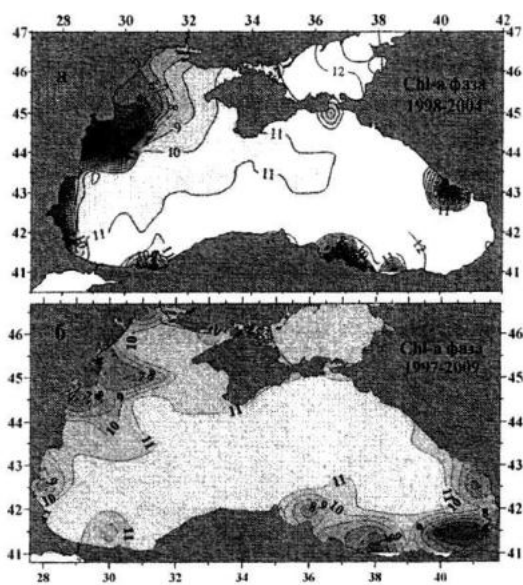
Р и с. 2. Распределение амплитуды годовой гармоники концентрации *Chl-a*, рассчитанной по среднемесячным значениям за периоды 1998 – 2004 гг. по данным [6] (а) и 1997 – 2009 гг. по данным [7] (б)

Расчет фазы сезонного цикла концентрации *Chl-a* показал, что по обоим массивам на большей части акватории Черного моря ее максимальные величины наблюдаются в ноябре-декабре (рис. 3). На северо-западном шельфе максимум сдвигается на август-октябрь. По новой версии массива [7] в юго-восточной части моря появляется область летних максимумов концентрации *Chl-a*, и вместе с тем исчезает локальная область у Кавказского побережья на 43° с.ш., которая проявляется в старой версии массива [6].

Анализ распределения полугодовой гармоники концентрации *Chl-a* показал, что ее значимый вклад ( $> 0.1$  мг/м<sup>3</sup> по [6])

и  $> 0.8 \text{ мг/м}^3$  по [7]) отмечается северо-восточнее устья р. Дунай, а также у берегов Болгарии, Турции. У берегов Румынии и в центре Черного моря  $A_{\text{полугод}}$  концентрации *Chl-a* в основном не значима (рис. 4).

В качестве существенного отличия в распределении  $A_{\text{полугод}}$  по новым данным можно отметить более сильный полугодовой сигнал в Прибосфорском районе и у Анатолийского побережья ( $\sim 0.1 - 0.2 \text{ мг/м}^3$ ). Отмечается появление значительных величин  $A_{\text{полугод}}$  ( $\sim 0.3 \text{ мг/м}^3$ ) в Керченском проливе. В тоже время в открытой части моря наблюдается расширение области, где вклад  $A_{\text{полугод}}$  незначим, в северо-восточном направлении.



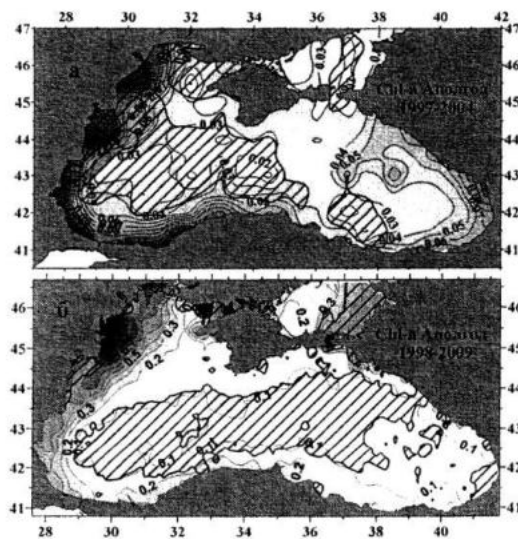
Р и с. 3. Распределение фазы наступления максимума концентрации *Chl-a* по среднемесячным значениям за периоды 1998 – 2004 гг. по данным [6] (а), 1997 – 2009 гг. по данным [7] (б)

Внутригодовое распределение концентрации *Chl-a* по фактическим данным старого массива [6] показывает, что в открытых районах на западе и в центре моря ( $30 - 36^\circ$  в.д.) прослеживаются два минимума концентрации *Chl-a* – в апреле-мае и в июле-августе. Слабый максимум концентрации *Chl-a* наблюдается в июне и более интенсивный – в октябре-декабре (рис. 5). Гармонический анализ сглаживает первый более слабый максимум, делая его статистически незначимым. Вместе с тем, наличие двух-трех максимумов отмечается в сезонном цик-

ле биологических характеристик [8]. Это дает основания считать, что они могут проявляться и в изменчивости концентрации *Chl-a*.

Анализ внутригодовых распределений концентрации *Chl-a* по фактическим данным нового массива [7] не выявил в центральной части моря бимодального сигнала, а минимальные значения концентрации *Chl-a* прослеживаются достаточно длительный период с июня по сентябрь. На наш взгляд, этот результат более достоверен, поскольку новый массив более обеспечен первичной информацией.

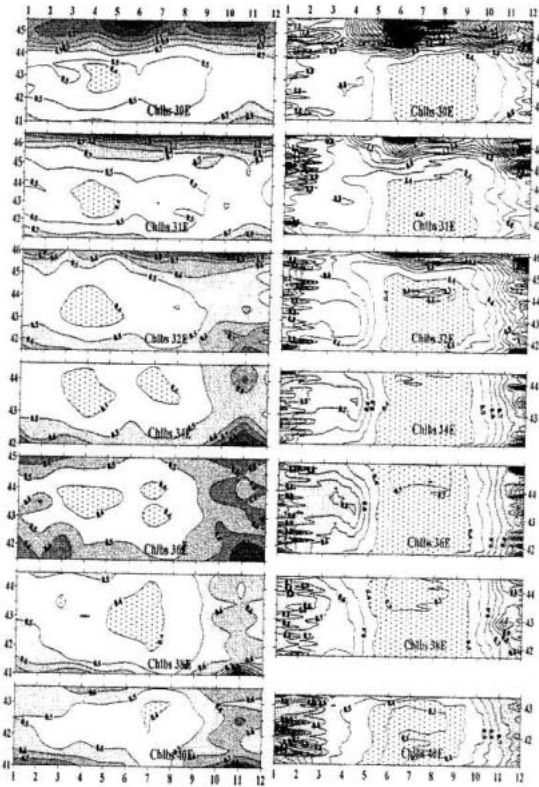
Увеличение значений концентрации *Chl-a* повсеместно начинается в октябре и достигает максимальных значений в ноябре-декабре, что близко к срокам, полученным гармоническим анализом. Характерно, что на меридианах  $30^\circ, 31^\circ, 32^\circ$  в.д. в теплое полугодие большие значения концентрации *Chl-a* в прибрежных районах сопровождаются уменьшением концентрации *Chl-a* в открытой части моря.



Р и с. 4. Распределение амплитуды полугодовой гармоники концентрации *Chl-a*, рассчитанной по среднемесячным значениям за периоды 1998 – 2004 гг. по данным [6] (а) и 1997 – 2009 гг. по данным [7] (б)

Это объясняется тем, что в прибрежных районах повышенные концентрации хлорофилла “а” в значительной степени связаны со стоком рек, тогда как в открытых районах – с сезонной изменчивостью фоновых гидрологических усло-

вий. Увеличение температуры в теплое время года сопровождается понижением концентрации *Chl-a*.



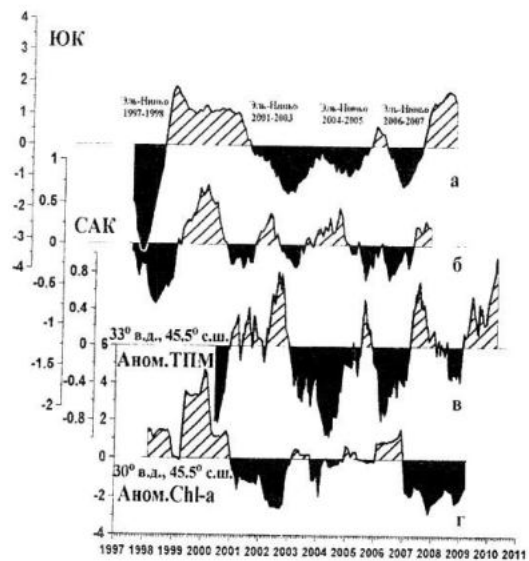
Р и с. 5. Внутригодовое распределение концентрации *Chl-a* по среднемесячным значениям за периоды 1998 – 2004 гг. (слева) и 1997 – 2009 гг. (справа) вдоль меридианов 30°, 31°, 32°, 34°, 36°, 38° и 40° в.д. (сверху вниз)

Совместный анализ межгодовой изменчивости концентрации *Chl-a* и индексов атмосферной циркуляции дает основания полагать, что изменчивость *Chl-a* связана с глобальными колебаниями в системе океан-атмосфера.

За период 1997 – 2009 гг. наблюдались, по крайней мере, четыре Эль-Ниньо (отрицательные значения индекса Южного колебания – ЮК) и три Ла-Нинья (положительные значения индекса ЮК), которые находят свое отражение и в изменчивости индекса Северо-Атлантического колебания (САК), а также в межгодовой изменчивости поля ТПМ и концентрации *Chl-a* в Черном море (рис. 6). Мощное Эль-Ниньо 1997 – 1998 гг. сопровождалось с некоторым запаздыванием отрицательными аномалиями индекса САК (рис. 6, а, б), относительно низкими значениями ТПМ в

Черном море (рис. 7) и положительными аномалиями концентрации *Chl-a* (рис. 6, г). В 1999 г. началось интенсивное Ла-Нинья, которое продолжалось до 2001 г. Индекс САК в это время также характеризовался мощными положительными аномалиями и только в 2002 г. они сменили знак на отрицательный. В последующие годы величины индекса САК заметно уменьшились и явной связи с колебаниями индекса ЮК не прослеживается.

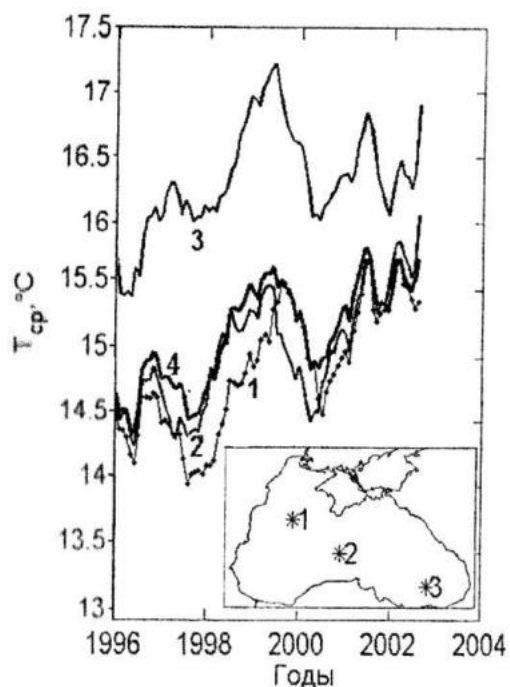
В Черном море начало Ла-Нинья 1999 г. совпало с повышением ТПМ (рис. 7) и минимумом положительной аномалии концентрации *Chl-a* (рис. 6, г). В период основной фазы Ла-Нинья (2000 – 2001 гг.) наблюдались отрицательные аномалии ТПМ (рис. 6, в) и положительные аномалии концентрации *Chl-a* (рис. 6, г). В 2001 – 2002 гг. наблюдалось ослабление Ла-Нинья и развитие следующего Эль-Ниньо. В этот переходный период ТПМ характеризовалась положительными аномалиями, а концентрации *Chl-a* – отрицательными, которые прослеживались вплоть до 2003 г.



Р и с. 6. Межгодовой ход индексов Южного (а), Северо-Атлантического (б) колебаний, аномалий ТПМ (в), аномалий концентрации *Chl-a* (г) на поверхности моря

Продолжавшиеся практически без перерыва Эль-Ниньо 2002 – 2003 гг. и 2004 – 2005 гг. сопровождались продолжительной отрицательной аномалией ТПМ и уменьшением аномалий концентрации *Chl-a*. Следующее Эль-Ниньо

2006 – 2007 гг. также характеризуется отрицательной аномалией ТПМ и положительной аномалией концентрации *Chl-a*. В 2008 г. начало развиваться новое Ла-Нинья, которое в Черном море сопровождалось положительной аномалией ТПМ и отрицательной концентрацией *Chl-a*.



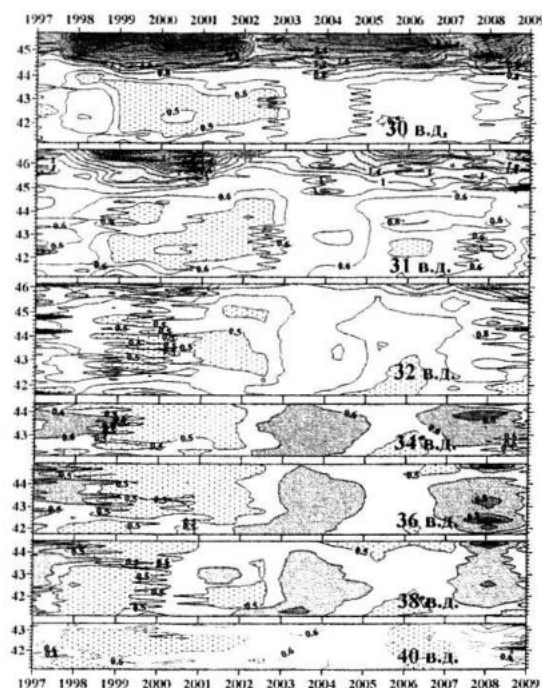
Р и с. 7. Временной ход скользящей средней ТПМ по 12-ти месяцам: 1, 2, 3 – для точек моря, положение которых показано на врезке, 4 – осредненная для всей площади моря по [10]

Таким образом, глобальные межгодовые вариации в системе океан атмосфера имеют свой отклик в бассейне Черного моря. Прослеживается тенденция: при интенсивных Эль-Ниньо в Черном море наблюдаются отрицательные аномалии ТПМ и положительные аномалии концентрации *Chl-a*. Вместе с тем, эта реакция не всегда однозначна по знаку и фазе. Относительно короткая длина используемых рядов, разрешающих только несколько глобальных событий пока не позволяет оценить эти связи на статистическом уровне и дать физическое объяснение наблюдаемых явлений.

Распределение среднегодовых значений концентрации *Chl-a* на разных меридианах (рис. 8) показывает, что ее наибольшие межгодовые вариации наблюдаются в западной части моря (30°,

31° в.д.). На 30° в.д. максимальные среднегодовые значения концентрации *Chl-a* отмечались в 1999 – 2001 гг., когда в Тихом океане наблюдалось мощное Ла-Нинья. Следующее, более слабое повышение концентрации *Chl-a* происходило в 2006 году, когда наблюдалось слабое Ла-Нинья.

Выше было показано, что на сезонном масштабе в теплое полугодие большие значения концентрации *Chl-a* в прибрежных районах сопровождаются уменьшением концентрации *Chl-a* в открытой части моря. В целом эта закономерность повторяется и на межгодовом масштабе. В период 1998 – 2001 гг., когда у берега (30° в.д.) наблюдались высокие концентрации *Chl-a*, в открытом море с запаздыванием примерно в один год отмечались минимальные концентрации *Chl-a*. Эта тенденция прослеживалась и на соседних меридианах (31 – 32° в.д.), хотя межгодовые вариации в целом заметно ослабевают в восточном направлении.



Р и с. 8. Межгодовой ход среднегодовых величин концентрации *Chl-a* вдоль меридианов 30°, 31°, 32°, 34°, 36°, 38° и 40° в.д. (сверху вниз)

**Выводы.** На основе среднемесячных данных двух версий массива *SeaWiFS* [6, 7] выполнен анализ сезонной изменчивости концентрации *Chl-a*. Показано, что

основные закономерности сезонного цикла *Chl-a* по данным двух массивов повторяются, а наблюдаемые различия связаны с разными методиками обработки первичных спутниковых измерений, процедурами осреднения в узлы регулярной сетки и разной временной продолжительностью этих массивов.

Показано, что глобальные изменения в системе океан-атмосфера (Эль-Ниньо, Ла-Нинья) имеют отклик и в Черноморском регионе. Это проявляется в межгодовой изменчивости полей ТПО и концентрации *Chl-a*. Относительно короткая длина используемых рядов пока не позволяет оценить эти связи на количественном уровне. Возможно, привлечение для анализа других индексов атмосферной циркуляции поможет уточнить сложную цепь причинно-следственных связей между глобальными явлениями типа Эль-Ниньо и процессами в Черном море. Для уточнения механизмов формирования областей экстремальной изменчивости *Chl-a* в дальнейшем предполагается проанализировать сезонную и межгодовую изменчивость стока рек.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонов Ю.В., Кукушкин А.С., Скрипалева Е.А., Шугаев А.В. Сезонные особенности распределения хлорофилла "а", показателей поглощения и рассеяния света на поверхности Черного моря // Системы контроля окружающей среды / Средства и информационные технологии. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2007. – С. 173 – 175.
2. 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 / Средства и информационные технологии. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2008. – С. 216 – 219.
3. Артамонов Ю.В., Белокопытов В.Н., Скрипалева Е.А., Шугаев А.В. Особенности сезонной изменчивости биооптических характеристик в крупномасштабных циклонических круговоротах Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – Вып. 18. – С. 305 – 318.
4. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Шугаев А.В. Внутригодовая изменчивость концентрации хлорофилла на поверхности Южной Атлантики по данным эксперимента МОДИС // Системы контроля окружающей среды / Средства и информационные технологии. – Севастополь: МГИ НАН Украины, 2009. – С. 253 – 255.
5. Артамонов Ю.В., Белокопытов В.Н., Кукушкин А.С., Скрипалева Е.А., Шугаев А.В. Исследование сезонной изменчивости биооптических характеристик в Черном море по спутниковым и экспедиционным измерениям // Сб. трудов 2-ой Украинской открытой конференции "Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки (GEO-UA 2010)". – Киев, 2010. – С. 30 – 32.
6. 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 / P.P. Shirshov Institute of Oceanology Russian Academy of Sciences, Moscow, 2005.
7. <http://Blackseacolor.com>.
8. Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Сосик Х.М. Региональный алгоритм расчёта концентрации хлорофилла "а" в Чёрном море по спутниковым данным SeaWiFS // Морской Экологический журнал. – VII. – № 2. – 2008. – С. 24 – 42.
9. Ведерников В.И., Демидов А.Б. Первичная продукция и хлорофилл в глубоководных районах Черного моря // Океанология. – 1993. – 33. – № 2. – С. 229 – 235.
10. Бабий М.В., Букатов А.Е., Станичный С.В. Атлас температуры поверхности Черного моря по спутниковым данным 1986 – 2002 гг. / Севастополь: МГИ НАН Украины, 2005. – 265 с.