ИЗМЕНЧИВОСТЬ СОДЕРЖАНИЯ ХЛОРОФИЛЛА А В СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ В СОВРЕМЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Н.Ф. Кириленко¹, В.П. Евстигнеев^{1,2}

¹ Севастопольский центр по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды, РФ, г. Севастополь, ул. Советская, 61

E-mail: kyrylenkonatalya@gmail.com

² ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

РФ, г. Севастополь, ул. Университетская, 33

E-mail: vald_e@rambler.ru

В статье исследуется изменчивость содержания хлорофилла а в поверхностном слое северо-западного района Черного моря под влиянием гидрометеорологических факторов в современный климатический период по доступным данным спутникового зондирования за период 1997–2015 гг.

Ключевые слова: хлорофилл а, спутниковая информация, реконструкция массивов, Черное море

Введение. Исследование влияния гидрометеорологических параметров водной и воздушной сред на экологическое состояние морей является актуальной задачей, в связи с наблюдающимися изменения климата и растущей антропогенной нагрузкой как на глобальную климатическую систему, так и на отдельные регионы. Перспектива этого направления заключается в разработке методов мониторинга и прогнозирования изменений экологических условий морских вод под влиянием внешних факторов. Особенную актуальность эти исследования приобретают для мелководной северо-западной части Черного моря – региона с интенсивным судоходством и развитым рыболовным хозяйством.

Хлорофилл а – первичный фотосинтезирующий пигмент фитопланктона, концентрация которого может использоваться для характеристики содержания фитопланктона. Этот параметр является ключевой характеристикой для расчета первичной продукции океанов и морей. Развитие методов спутникового зондирования позволяет исследовать содержание пигмента в поверхностном слое, а, значит, и состояние морских экосистем, в широком диапазоне пространственных и временных масштабов. Для этих целей установлены эмпирические соотношения между концентрацией хлорофилла (Хла, мг/м³) и спектральными характеристиками восходящего излучения в отдельных каналах цветовых сканеров, напри-

мер, 490, 510 и 555 нм. В результате сопоставления подспутниковых данных по хлорофиллу с данными сканеров, предложен ряд эмпирических глобальных алгоритмов пересчета в зависимости от типа поверхностных вод (для вод типа 1 цветность определяется только содержанием пигмента, для вод второго типа – содержанием также растворенного и взвешенного веществ). Стандартные алгоритмы неудовлетворительно описывают абсолютные величины Хла в Черном море [1, 2], вследствие повышенного содержания в воде желтого вещества, а также в неадекватном описании свойств аэрозоля при атмосферной коррекции [3]. В этой связи особую актуальность приобретает разработка региональных алгоритмов [1].

Однако в случае если в исследовании не преследуется цель оценки абсолютных значений содержания Хла, вполне допустимо использовать данные, полученные стандартными алгоритмами [4]. В настоящей работе была поставлена задача исследования изменчивости поля Хла в северо-западной части Черного моря под влиянием гидрометеорологических факторов в современных климатических условиях по доступным данным дистанционного зондирования.

Данные и методы обработки. В работе использованы месячные массивы полей Хла, сформированные в рамках проекта GlobColour Европейского космического агентства (ESA) по данным

сканеров SeaWiFS, MODIS, MERIS, VIIRS, объединенные методом Garver-Siegel-Maritorena (GSM) [5]. Архив полей Хла за период 1997–2015 гг. представлен в единой сетке пространственного разрешения ~4 км и доступен для скачивания на сайте www.globcolour.info.

Для проведения исследований за максимально возможный период лет использовались данные Хла, соответствующие водам первого типа. Учитывая, что для этого типа данные представлены за наиболее длительный период лет с 1997 г., их использование позволяет провести более полный анализ пространственно-временной изменчивости хлорофилла в поверхностном слое Черного моря.

Карты полей Хла содержат участки потерянной информации вследствие действия ряда факторов (облачность, ошибки алгоритма атмосферной коррекции и пр.). Согласно известным оценкам [6] минимум облачного покрова над Черным морем достигается в летний период (в среднем до 40–50% потерянных данных), в зимний период среднее число потерянных данных может достигать значений 90%. Наиболее высокая степень облачности приходится на Азовское море и северо-запад Черного моря.

Для массива ESA полей содержания хлорофилла в поверхностном слое Черного моря основные потери информации также приходится на холодное полугодие. На северо-западном шельфе, по крайней мере, для месяцев зимнего сезона отсутствует до 40–50% информации (для отдельных узловых точек), хотя именно в этой зоне Черного моря отмечается наибольшая сезонная изменчивость хлорофилла (рис. 1).

Для того, чтобы минимизировать эффект неполной информации приходится прибегать к процедурам восстановления пропущенных участков данных. В настоящей работе использовалась методика восстановления эмпирическими ортогональными функциями (DINEOF) [7], позволяющая с высокой степенью точности восстанавливать поля с большим количеством пропусков. Согласно выводам [7] метод DINEOF позволяет добиться высокой степени точности восстановления, причем процедура занимает в 30 раз меньшее расчетное время, чем метод оптимальной интерполяции. Все вычисления выполнены в специализированной программной среде R (www.r-project.org).

Рис. 1. Коэффициент вариации среднемесячной концентрации хлорофилла а в Черном море (а) и доля отсутствующей информации о содержании пигмента (б)

Районирование северо-запада Черного моря. Ревизия рис. 1 приводит к выводу о необходимости районирования северо-западной части Черного моря вследствие неравномерной динамики поля Хла. Так, изменчивость содержания пигмента позволяет выделить на качественном уровне отдельные районы, прилегающих к устьевым областям рек Дунай и Днестр, и области Днепро-Бугского лимана, и глубоководный район. Вклад Днестра в общий приток речной воды в район северо-запада незначителен. Изменчивость хлорофилла в узкой прибрежной полосе, прилегающей к днестровскому лиману, вообще говоря, может объясняться не только вкладом речного стока Днестра, но и днепровскими водами, вовлеченными в общую циркуляцию вод северо-западного шельфа. В связи с этим, нам показалось резонным объединить Днестровский и Днепро-Бугский районы в один. Со стороны открытого моря районы ограничены водами Основного Черноморского течения, проходящей по разделу глубоководных и шельфовых вод, и в этой связи эта зона выделяется в третий район.

Рис. 2. Районы северо-запада Черного моря, выделенные для исследования изменчивости содержания хлорофилла а в поверхностном слое; границы районов заимствованы из работы [8]

Представленное районирование на основании только признака вариабельности содержания хлорофилла находится в полном соответствии с имеющимися в научной литературе примерами райо-

нирований по комплексу параметров, отражающих многолетние изменения различных фитопланктонных и гидрохимических характеристик в ответ на антропогенные и природные изменения. Так в работе [8] было представлено районирование для биопродукционных исследований на основе разделения акватории на шельфовую (<50 м) и глубоководную части (>200 м). Районы из [8] были использованы в настоящей работе для определения положения границ в северо-западной части Черного моря (рис. 2). В своих исследованиях авторы [8] также определили, что Регион 1 находится под влиянием речного стока, в основном Днестра, Южного Буга и Днепра – рек, которые впадают в лиманы. Лиманы, вследствие своей фильтрующей функции, изменяют соотношение биогенных веществ (элементное отношение Si:N:P:C) в речной воде, поступающей на черноморский шельф. Регион 2 находится под непосредственным влиянием реки Дунай, приносящей более 60% речной воды в море. Динамика же содержания пигмента в третьем «глубоководном» районе в меньшей степени определяется речным стоком.

Расчет характеристик изменчивости поля Хла по выделенным районам составит основу результатов, представленных в следующих разделах статьи.

Сезонная изменчивость содержания пигмента. На рис. 1, а представлен коэффициент вариации содержания хлорофилла, рассчитанного для каждой узловой точки спутниковых карт. Из рисунка следует, что наибольшие изменения Хла претерпевает в зонах, близких к устьям и лиманам основных рек региона. Приток биогенных веществ с речным стоком приводит к увеличению биомассы фитопланктона и соответствующему пику содержания хлорофилла. Наибольшая изменчивость, как и следовало ожидать, приходится на придунайскую зону. В работе [9] был показан высокий уровень когерентности расхода воды Дуная и концентрации хлорофилла а в прилегающей акватории, относящийся к диапазону периодов 6–12 мес. Отсутствие

резких максимумов на спектре концентрации хлорофилла а и обширная область высокой когерентности позволили авторам сделать вывод о сложном характере проявления взаимосвязи между расходом воды Дуная и концентрацией хлорофилла а, а также, в частности, о том, что цветение фитопланктона определяется не только расходом воды Дуная, но и, очевидно, другими факторами – температурой, освещенностью, притоком биогенных элементов и пр.

Рис. 3. Сезонный ход гидрометеорологических параметров и средней концентрации Хла в поверхностном слое в северо-западной части Черного моря

На рис. 3 представлен результат расчета среднего многолетних значений объема стока рек Дунай, Днепр и Южный Буг за период 1980–2012 гг., температуры воды на морских береговых пунктах Приморское и Очаков, Черноморское, Севастополь за период 1980–2013 гг. и средняя концентрация хлорофилла а, сгруппированным по районам северо-западного региона Черного моря согласно рис. 2. Наибольшее содержание

пигмента соответствует придунайскому району, в Днепро-Бугском районе содержание Хла меньше в среднем в 1,7 раза, в глубоководном районе – в 3,5 раза меньше, чем в придунайском.

Как видно из рис. 3 среднеемноголетний максимум содержания пигмента Хла приходится на июнь, что составляет двухмесячное запаздывание по отношению к максимуму стока Дуная и одномесячное по отношению к максимуму суммарного стока Днепра и Южного Буга. К аналогичным результатам пришли авторы [9], у которых запаздывание максимумов было определено в диапазоне от 2,5 до 1,5 мес. Среднеемноголетний максимум Хла в июне в северо-западном регионе был также отмечен в [10].

Смена биологических сезонов фитопланктона обусловлена температурным и световым режимом и сопровождается также изменениями в его вертикальной структуре [11]. В весенний период приток биогенных веществ с речным стоком в пик весеннего половодья и интенсивный прогрев верхнего слоя стимулирует бурное развитие мелкоклеточных организмов у поверхности моря и соответствующий рост содержания хлорофилла. Пик содержания пигмента напрямую связан с пиком солнечной радиации (июнь), приходящей к поверхности, и максимумом скорости изменения тепло-содержания моря. Пик Хла в этот период присущ всем исследуемым районам северо-запада Черного моря.

Летом с максимальным прогревом вод в июле-августе в верхнем квазиоднородном слое наступает период стагнации в развитии фитопланктона, при этом в термоклине и нижних слоях его численность существенно возрастает [11]. Для придунайского и глубоководного района снижение Хла в июле-августе имеет резкий характер, в то время как для Днепро-Бугского района Хла постепенно снижается на протяжении осени и вплоть до зимних месяцев.

В отличие от Днепро-Бугского в других районах северо-запада Черного моря осенью наступает новый период в развитии фитопланктонного сообщества, что

обусловлено «размыванием» сезонного термоклина и, как следствие, притоком биогенов в верхние слои моря. Однако по мере приближения к зимнему периоду интенсификация конвективного перемешивания приводит к размыванию слоев скоплений водорослей равномерно по всей толще вплоть до глубин 60 м [11]. Этот фактор, а также снижение температуры воды и потока солнечной радиации, приводит к уменьшению численности фитопланктона и снижению его видового богатства в поверхностном слое моря. Тем не менее, для глубоководного района в зимние месяцы (декабрь-январь) наблюдается вторичный пик содержания пигмента, который, возможно, связан с интенсификацией циркуляции вод вследствие увеличения завихренности касательного напряжения трения ветра над Черным морем [12]. В результате в исследуемый район поступают воды с большим содержанием пигмента.

Межгодовая изменчивость содержания хлорофилла под влиянием гидрометеорологических факторов. На рис. 4 представлен многолетний ход средней и медианной концентрации Хла по районам северо-запада Черного моря. На графиках, по крайней мере, для Днепро-Бугского и глубоководного районов выделяется период до 2002 г., со значениями Хла в среднем выше, чем за последующий период лет. Стоит отметить, что объединенный массив данных ESA, используемый в работе, до 2002 г. был обеспечен только данными сканера SeaWiFS. Начиная с этого года, стали поступать данные с более совершенных сенсоров MERIS (вплоть до апреля 2012 г.) и MODIS. Таким образом, возникший скачок 2002 г. можно было бы объяснить неоднородностью используемого массива ESA, однако в работе [10] по данным только сканера SeaWiFS был также обнаружен такой скачок, который авторы связали со сдвигом экологического режима в регионе. На наш взгляд, вопросу появления скачка должно быть посвящено отдельное более детальное исследование.

Рис. 4. Многолетний ход концентрации Хла (мг/м^3) в поверхностном слое по отдельным районам северо-запада Черного моря за период 1997–2015 гг.

Таблица 1. Коэффициент вариации (C_v) и отношение дисперсий (F) Хла в отдельных районах северо-запада Черного моря

Характеристика	Районы		
	Днепро-Бугский	Придунайский	Глубоководный
C_v	0,43	0,52	0,50
F	4,4	1,0	13,0

Выделенные районы северо-западной части Черного моря заметно отличаются по степени изменчивости содержания Хла. Так, если коэффициент вариации для трех районов практически совпадает в пределах расчетной ошибки (табл. 1), то отношение дисперсии рассеяния величин Хла отличается в разы. Дисперсия Хла в придунайском районе более чем в 4 раз больше дисперсии в Днепро-Бугском и в 13 раз выше, чем в глубоководном районе.

На графиках рис. 4 можно отметить наличие максимумов Хла, которые, как правило, проявляются только в отдельных районах северо-запада. Для районов

шельфовой зоны выделяются максимумы 1998, 2005, 2009, (отдельно для придунайского района) 2014 гг. и экстремальный 2000 г. Для глубоководной части наиболее экстремальными оказались 2001, описанный, в частности, в [10], и 2010 гг. На протяжении всего 2011 г. наблюдались отрицательные температурные аномалии в регионе, что на не-

сколько месяцев сместило сроки перестроек вертикальной структуры распределения фитопланктона в толще воды [11]. Так, «весенняя» перестройка началась только в мае, а «осенняя» – в октябре, зимняя же наступила уже в декабре. Практически весь год характеризуется минимальными значениями Хла.

Таблица 2. Корреляционная матрица взаимосвязи содержания Хла и гидрометеорологических параметров в отдельных районах северо-запада Черного моря

Корреляция		Районы			$Q_{\text{Дун}}, \text{ км}^3$	$Q_{\text{Дн.}+\text{Буг}}, \text{ км}^3$	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$
		Днепро-Бугский	Придунайский	Глубоководный			
Районы	Днепро-Бугский		0,51*	0,62*	0,17	0,33*	-0,05
	Придунайский	0,51*		0,66*	0,28*	0,30*	0,15
	Глубоководный	0,62*	0,66*		0,33*	0,34*	0,13
$Q_{\text{Дун}}, \text{ км}^3$		0,17	0,28*	0,33*		0,32*	0,08
$Q_{\text{Дн.}+\text{Буг}}, \text{ км}^3$		0,33*	0,30*	0,34*	0,32*		-0,08
$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$		-0,05	0,15	0,13	0,08	-0,08	

Примечание: знаком «*» обозначены значимые на уровне (5%) коэффициенты корреляции

Для анализа связанности межгодовой изменчивости содержания Хла с гидрометеорологическим фактором были вычислены нормированные месячные аномалии содержания пигмента в поверхностном слое моря. Для этого рассчитывались отклонения концентрации хлорофилла от своих среднемноголетних значений и нормировались на стандартное отклонение:

$$\tilde{C}_i = (C_i - \bar{C}_m) / \sigma_m,$$

причём $\bar{C}_m$ и соответствующие величины σ_m были получены для каждого месяца отдельно с целью исключения сезонной составляющей изменчивости биооптической характеристики. Аналогичным образом были получены ряды аномалий для гидрометеорологических элементов: температура воды и объем стока основных рек северо-запада Черного моря. Переход к рассмотрению аномалий обоснован дабы снизить эффект ложной корреляции параметров вследствие их выраженного сезонного изменения.

Для исследования взаимосвязи между аномалиями изучаемых характеристик рассчитывался коэффициент корреляции с учетом автокоррелированности

сравнимых рядов путем определения эффективного числа степеней свободы N_{eff} . Согласно [13] в случае, если «красный шум» является удовлетворительной моделью автокорреляции, для статистик второго порядка (корреляция) N_{eff} может быть аппроксимирована выражением:

$$N_{\text{eff}} = N \cdot \frac{1 - r_1 r_2}{1 + r_1 r_2},$$

где N – длина используемых временных рядов; r_1, r_2 – автокорреляция рядов при сдвиге $\Delta t = 1$. Результат расчета корреляционной матрицы помещен в табл. 2.

Очевидна наибольшая связанность аномалий содержания хлорофилла а между районами. Примерно в 2 раза меньше степень положительной взаимосвязи между аномалиями Хла и аномалиями стока крупных рек региона. При этом связь аномалий Хла Днепро-Бугского района со стоком р. Дунай незначима. Отсутствует связь между аномалиями Хла и температурой воды в регионе, хотя некоторая зависимость прослеживается в зимние месяцы январь-февраль. Результат для двух зимних месяцев может улучшиться, если скачок

2002 г. устранить как имеющий неестественное происхождение (что требует, вообще говоря, надлежащего обоснования). Количественная оценка тесноты такой связи не представляется возможной вследствие малого объема выборки.

Рис. 5. Многолетний ход нормированных аномалий концентрации Хлв в поверхностном слое и температуры воды в январе-феврале для всего северо-западного региона Черного моря за период 1997–2015 гг.

Представленные результаты отражают синхронную связь между параметрами, в то время как обоснованной с точки зрения гидробиологии и гидрофизики следует считать асинхронную связь, что было, в частности, показано при обсуждении сезонной изменчивости исследуемых характеристик. В качестве иллюстрации на рис. 6 приведен график хода нормированных аномалий Хлв (в среднем для всего северо-западного региона) в месяцы максимального содержания пигмента (май-июнь) и суммарного стока трех крупных рек региона в месяцы весеннего пика половодья (апрель-май).

Из графика следует, что основные колебания аномалий Хлв определяются динамикой возникновения аномалий речного стока в регионе в пик половодья. Причем эта динамика определяет не только период колебаний (4-5 лет), но и отрицательный тренд содержания пигмента в своем годовом максимуме.

Рис. 6. Многолетний ход нормированных аномалий концентрации Хлв в мае-июне для всего северо-западного региона Черного моря и суммарного объема стока крупных рек в апреле-мае за период 1997–2015 гг.

Выводы. Изменчивость поля хлорофилла а северо-запада Черного моря в значительной степени определяется факторами внешней среды, среди которых особое место занимает речной сток крупных рек. Сезонная динамика, возникновение экстремумов Хлв для отдельных районов северо-западной части Черного моря неодинакова. Общей характерной чертой для всего региона является формирование пика Хлв в весенне-летний период и снижение содержания пигмента в июле-августе. Однако изменчивость Хлв в осенние и зимние месяцы отличается в зависимости от района.

Анализ корреляции между аномалиями Хлв, температуры воды и объема речного стока позволил установить значимую синхронную связь Хлв со стоком. Однако более обоснованным является анализ асинхронной связи для отдельных сезонов. В частности, прослеживается устойчивая связь между содержанием пигмента в своем годовом максимуме (май-июнь) и аномалиями речного стока в регионе в пик весеннего половодья (апрель-май).

Такие исследования должны сопровождаться достоверными численными оценками параметров связи, что окажется возможным в будущем при накоплении достаточного фактического материала и спутниковых данных.

Работа выполнена при поддержке фонда РФФИ в рамках проекта № 16-35-00466 мол.а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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. 2008. Т. 7. № 2. С. 24–42.
2. Gregg W.W., Casey N.W. Global and regional evaluation of the SeaWiFS chlorophyll data set // Remote Sens. Environ. 2004. V. 93. P. 463–479.
3. Claustre H., Morel A., Hooker S.B. et al. Is desert dust making oligotrophic waters greener? // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, No 10, doi:10.1029/2001GL014056.
4. Nezlin N.P. Seasonal and interannual variability of remotely sensed chlorophyll, Handbook of Environmental Chemistry. The Black Sea Environment (Eds. A.G. Kostianoy and A.N. Kosarev), Springer Verlag, Berlin, 2008. P. 333–349.
5. Maritorena S., Siegel D.A. Consistent merging of satellite ocean color data sets using a bio-optical model // Remote Sens. Environ. 2005. V. 94. P. 429–440.
6. Alvera-Azcarrate A., Barth A., Sirjacobs D., Beckers J.-M. Enhancing temporal correlations in EOF expansions for the reconstruction of missing data using DINEOF // Ocean Sci. 2009. V. 5. P. 475–485.
7. Alvera-Azcarrate A., Barth A., Rixen M., Beckers J.M. Reconstruction of incomplete oceanographic data sets using empirical orthogonal functions: application to the Adriatic Sea surface temperature // Ocean Model. 2005. V. 9. P. 325–346.
8. Юнев О.А. Оценка многолетних изменений годовой первичной продукции фитопланктона различных районов Черноморского шельфа // Экобезопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Вып. 25, т. 1. С. 311–326.
9. Кириленко Н.Ф., Кушнир В.М., Лемешко Е.М. Влияние речного стока на экологические условия северо-западной области черноморского региона по данным контактных и дистанционных измерений // Геоинформатика. 2009. № 4. С. 1–7.
10. McQuatters-Gollop A., Mee L.D., Raitos D.E., Shapiro G.I. Non-linearities, regime shifts and recovery: The recent influence of climate on Black Sea chlorophyll // J. Mar. Sys. 2008. V. 74. P. 649–658.
11. Serikova I.M., Evstigneev V.P., Tokarev Yu.N., Suslin V.V. Bioluminescence field of the Black Sea as indicator of Dinophyta aggregation, its seasonal and interannual dynamics // Proc. of SPIE. 2017. Vol. 10466, 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics, 104663X, doi: 10.1117/12.2287964.
12. Полонский А.Б., Шокурова И.Г. Многолетняя изменчивость завихренности касательного напряжения трения ветра над Черным морем по данным реанализа // Экобезопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2011. Вып. 24. С. 182–189.
13. Bretherton C. S., Widmann M., Dymnikov V.P., Wallace J. M., Blade I. The effective number of spatial degrees of freedom of a time-varying field // J. Clim. 1999. V. 12. P. 1990–2009.

CHLOROPHYLL A VARIABILITY IN THE NORTH-WESTERN BLACK SEA UNDER THE PRESENT CLIMATE CONDITIONS

N.F. Krylenko¹, V.P. Evstigneev^{1,2}

¹ Sevastopol Center for Hydrometeorology and Environmental Monitoring, Russian Federation, Sevastopol, Sovetskaya St., 61

² Federal State Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University», Russian Federation, Sevastopol, Universitetskaya St., 33

A variability of chlorophyll a in surface layer of the north-western Black sea under the influence of hydrometeorological factors in the present climate conditions have been studied using available data of satellite soundings for the period of 1997–2015.

Keywords: chlorophyll a, satellite data, pattern gap filling, Black sea