

ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ И ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА НА ПОКАЗАТЕЛИ ФИТОПЛАНКТОНА В СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ

И.В. Ковалева¹, В.В. Суслин²

¹ Севастополь, ФГБУН ФИЦ «Институт биологии южных морей имени А.О. Ковалевского» РАН, отдел экологической физиологии водорослей, науч. сотр., канд. биол. наук; e-mail: ila.82@mail.ru

² Севастополь, Морской гидрофизический институт РАН, отдел динамики океанических процессов, зав. отделом, вед. науч. сотр., канд. физ.-мат. наук; e-mail: slava.suslin@mhi-ras.ru

Исследована совместная динамика показателей черноморского фитопланктона (первичная продукция, удельная скорость роста, биомасса) и количества выпадений атмосферных осадков за период с 1998 по 2015 г. в прибрежных районах и открытом побережье северной части Черного моря. Для анализа использовались спутниковые данные (SG) (GPCPMON) GPCP Версии 3.2, TRMM TMPA (3B42RT), а также SeaWiFS с 1998 по 2010 г., MODIS-Aqua с 2002 по 2015 г. и MODIS-Terra с 2000 по 2015 г. Показатели фитопланктона рассчитывались по ранее разработанным нами моделям. Оценивались среднемесячные значения всех рассмотренных величин, двухнедельные и ежесуточные значения для атмосферных осадков. В результате исследований выявлено, что на обширных акваториях за длительные интервалы времени роль атмосферных выпадений в изменчивости характеристик фитопланктона не значительна, и ей можно пренебречь. Она возрастает в отдельных случаях до 30% в шельфовых районах при наличии стока крупных рек. Также отмечено более заметное влияние атмосферных осадков на биологическую продуктивность фитопланктона на малых, ограниченных, акваториях за короткие временные интервалы. По нашим данным за 18-летний период для открытого побережья Черного моря зимой наблюдалась более заметная корреляция между удельной скоростью роста и осадками, чем в другие сезоны. Для биомассы и первичной продукции сезонная связь с атмосферными осадками менее выражена. Из трех исследуемых показателей фитопланктона удельная скорость роста более других коррелировала с количеством выпавших осадков. Для трех районов повышение количества атмосферных осадков относительно предыдущего уровня со среднемесячными величинами от 0,6 мм/сут приводили к повышению удельной скорости роста или поддержанию ее на том же уровне. Возрастание удельной скорости роста происходило не одинаково и не пропорционально атмосферным выпадениям. Это свидетельствует о влиянии множества факторов на показатели фитопланктона, однако, осадки могут оказывать дополнительно стимулирующую роль.

Ключевые слова: первичная продукция, удельная скорость роста, биомасса, модельные расчеты, спутниковые наблюдения

DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.4.3

ВВЕДЕНИЕ

Процессы, протекающие в морской системе, создают условия для круговорота соединений азота, фосфора и кремния в море. Кроме того, поступление биогенных веществ может происходить с береговым стоком, в результате антропогенного воздействия, а также из атмосферы. Вопрос влияния атмосферных осадков на водные экосистемы рассматривался в ряде работ [Guerzoni et al., 1999; Burlakova et al., 2003; Шадрин и др., 2004; De Fommervault et al., 2015; Вареник и др., 2016; Medinets, Medinets, 2012; Миничева и др., 2018; Вареник и др., 2019]. Оценивалось поступление питательных веществ из атмосферы в море и их вклад в первичную продукцию фитопланктона [Guerzoni et al., 1999; De Fommervault et al., 2015; Вареник и др., 2016]. Роль атмосферных осадков не велика по сравнению с конвективными потоками в водной

толще, а также поверхностным стоком, но считается, что их влияние растёт от прибрежной области к глубоководной [Guerzoni et al., 1999; Вареник и др., 2016]. Однако исследований по этому вопросу недостаточно, в особенности отражающих связь с биологическими показателями. Также сложно сказать в каких масштабах влияние осадков на водную экосистему и биологическую продуктивность более заметно. Путем отбора проб и прямых измерений оценки были бы более точны на локальных участках, но трудоемки и недостаточно точны при распространении на обширные акватории. Модельные оценки и данные спутниковых наблюдений имеют свои допущения, но могли бы дать ответы касательно вариаций исследуемых показателей на больших пространствах морской поверхности. Однако, проведено мало исследований как первым, так и вторым способом.

Кроме влияния атмосферных осадков на первичную продукцию, оценки изменчивости других показателей фитопланктона, которые могут давать отклик на поступление питательных веществ из атмосферы, в Черном море не проводились. Например, кроме первичной продукции представляют интерес такие характеристики, как биомасса и удельная скорость роста. В работе [Finenko et al., 2019] отмечалось, что оценка этих величин могла бы расширить возможности для анализа циклов биогенных элементов. Биомассу фитопланктона можно определять в единицах органического углерода или азота. Удельная скорость роста водорослей чувствительна к изменению внешних факторов, зависит от питательного состава среды, удельного содержания хлорофилла *a* в клетках, от размера клеток и видового состава [Marañón, 2015; Стельмах, Мансурова, 2017]. На видовое разнообразие влияет изменчивость питательной среды в естественных условиях, что, соответственно, будет отражаться на удельной скорости роста фитопланктона. Совместная оценка указанных характеристик помогла бы выявить роль атмосферных осадков в вариабельности различных биологических показателей и процессы, протекающие в экосистеме под влиянием атмосферных осадков.

Шельфовая зона Черного моря используются в хозяйственных, рекреационных и прочих целях, что делает особенно важным исследование этих районов. Кроме того, на биологическую продуктивность шельфовой зоны оказывает влияние береговой сток и наличие рек. Под воздействием атмосферных осадков сток будет усиливаться, и соответственно увеличиваться поступление биогенных веществ. Разделить эти два фактора в прибрежных районах довольно сложно, так как они воздействуют в комплексе. Соответственно, здесь влияние атмосферных осадков будет больше, чем в акваториях, отдаленных от берега. Наша задача – оценить общий вклад осадков и стока во время дождя на характеристики фитопланктона в шельфовой зоне.

Цель данного исследования – провести совместную оценку и анализ изменчивости атмосферных осадков, первичной продукции, биомассы и удельной скорости роста фитопланктона по многолетним спутниковым данным и модельным расчетам.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данные по атмосферным осадкам, полученные со спутникового датчика (SG) (GPCPMON) GPCP версии 3.2 пакет GPCPV3, состояли из ежемесячных и ежесуточных продуктов с пространственным разрешением $0,5 \times 0,5^\circ$, осредненных за месяц (в мм/сут). Рассматривался период с 1998 по 2015 г. Входные данные состояли из файлов орбиты GPROF SSMI/SSMIS, которые используются для калибров-

ки осадков на основе ИК-излучения PERSIANN-CDR в диапазоне 60° с. ш. и, в свою очередь, калибруются с учетом месячного 2,5-градусного продукта METH. Оценки PERSIANN-CDR/TOVS/AIRS затем объединялись в области $35\text{--}58^\circ$ с. ш. и совмещались с анализом GPCC по наземным измерениям для получения конечного продукта [GPCP Version 3.2..., 2022].

Для анализа показателей черноморского фитопланктона использовались спутниковые данные [SeaWiFS..., 2019]. Измерения спутниковым сканером SeaWiFS проводились с 1998 по 2010 г. (R2018), приборами MODIS-Aqua – с 2002 по 2015 г. (R2018) и MODIS-Terra – с 2000 по 2015 г. (R2018). Спутниковые наблюдения осреднялись за месяц по ежесуточным данным за 18-летний период, полученные с наиболее точной коррекцией. Пространственное разрешение составляло ~ 1 км в надире. Данные второго уровня включали время измерения, географическую привязку и ряд стандартных продуктов в физических единицах: спектр коэффициента яркости моря; концентрацию хлорофилла, рассчитанную на основе алгоритма, разработанного в Морском гидрофизическом институте (для SeaWiFS и MODIS) [Suslin et al., 2016]. По результатам статистического анализа, алгоритм восстановления концентрации хлорофилла *a* по данным спутниковых измерений в видимом диапазоне спектра на основе доступных измерений *in situ* за период с 1997 по 2015 г. дает относительную ошибку ($\sim 30\text{--}40\%$) [Суслин и др., 2018]. Используемые коэффициенты яркости моря на трех длинах волн 490, 510 и 555 нм для SeaWiFS и 488, 531 и 548 нм для MODIS учитывают изменение поглощения окрашенного растворенного вещества и слабо чувствительны к ошибкам атмосферной коррекции и обратному рассеянию света взвесью [Suslin et al., 2016]. Модель МГИ [Suslin et al., 2016] позволяет лучше учитывать цветение диатомовых водорослей в весенний период.

Температура в поверхностном слое для 1998–1999 гг. получена из спутниковых наблюдений [SeaWiFS, 2019], для 2000–2015 гг. – MODIS-Aqua/Terra, интенсивность ФАР в диапазоне 400–700 нм [MODIS-Aqua..., 2019].

Для расчета первичной продукции фитопланктона, а также биомассы и удельной скорости роста использовались модели, подробно описанные в работах [Финенко и др., 2018; Finenko et al., 2019]. Чистая суточная продукция фитопланктона ($\text{мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$) определялась как

$$P = X_{\text{л}0} \cdot P_m \cdot \text{th} \left(\frac{\alpha^B \cdot E_0}{P_m} \right), \quad (1)$$

где $X_{\text{л}0}$ – концентрация хлорофилла в поверхностном слое, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-3}$; P_m – максимальная скорость фото-

синтеза, нормированная на единицу хлорофилла, $\text{мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{сут}^{-1}$; α^B – тангенс угла наклона кривой фотосинтез–свет, нормированный на концентрацию хлорофилла, $\text{мгС} \cdot \text{мгХл}^{-1} \cdot \text{моль квантов}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$; E_0 – фотосинтетически активная радиация (ФАР), моль квантов $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$.

$$P_m = \alpha^B \cdot E_k \quad (2)$$

где E_k – начало светового насыщения фотосинтеза, моль квантов $\cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{сут}^{-1}$. По экспериментальным данным, полученным в поверхностном слое Черного моря для температуры 6,5–23°C [Finenko et al., 2002], E_k равно:

$$E_k = c \cdot \exp(b \cdot T) \cdot s \cdot DL, \quad (3)$$

где T – температура, °C; DL – продолжительность дня, ч; c и b – коэффициенты, полученные экспериментально: $c = 17,4$, $b = 0,066$. Для данного уравнения $r^2 = 0,7$.

Тангенс угла наклона кривой фотосинтез–свет, нормированный на концентрацию хлорофилла, определялся как

$$\alpha^B = w \cdot \frac{X_{\text{Л}}^v}{s}, \quad (4)$$

где коэффициенты w и v получены экспериментально: $w = 0,11$, $v = 0,29$. Коэффициент детерминации – $r^2 = 0,95$.

Биомасса фитопланктона в единицах органического углерода ($\text{мгС} \cdot \text{м}^{-3}$) рассчитана как [Финенко и др., 2018]:

$$B = \frac{X_{\text{Л}}}{X_{\text{Л}} : C}, \quad (5)$$

где $(X_{\text{Л}} : C)$ – величина отношения хлорофилл – органический углерод в водорослях (для уравнения (4) $r^2 = 0,78$).

Если весь органический углерод, образованный в процессе фотосинтеза, используется на рост водорослей, то B_T можно определить как

$$B_T = B + P. \quad (6)$$

Значения удельной скорости роста (m , сут^{-1}) рассчитывается как

$$m = \log_2 \left(\frac{B_T}{B} \right). \quad (7)$$

Статистическая обработка данных осуществлялась в пакетах программ Sigma Plot 12.5, Grapher, Excel. Проводился регрессионный анализ.

Указанные характеристики анализировались для районов, представленных на карте (рис. 1).

Для дополнительной оценки связи атмосферных осадков и удельной скорости роста в 2010 г. проводилось осреднение удельной скорости роста за двухнедельный период для квадратов

2,5×3,5 км вблизи Крымского побережья на участке от 33,055° в. д. 44,299° с. ш. до 35,400° в. д. 44,450° с. ш. По пространству для выбранного участка данные не осреднялись с целью выявления вклада атмосферных осадков на незначительных масштабах акватории. Для диапазона этих же координат по спутниковым данным выделялись квадраты 0,25×0,25° и определялось количество осадков (мм/день) по ежесуточным данным, которое осреднялось за двухнедельный период. Суточные данные накопления осадков создавались на основе трехчасового мультиспутникового анализа осадков TRMM TMPA (3B42RT) в режиме реального времени и взяты с сайта [EarthData, TRMM (TMPA-RT), дата обращения 20.02.2022].

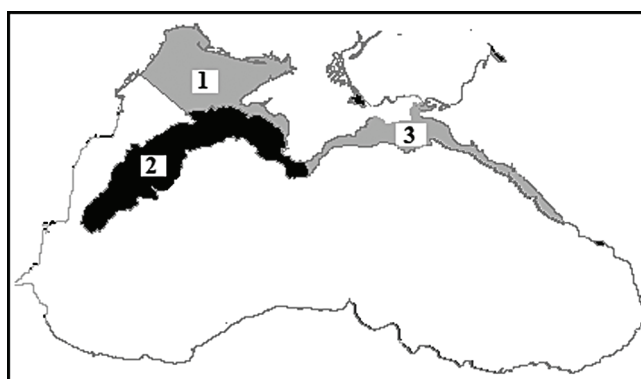


Рис. 1. Карта исследуемых районов:

- 1 – Приднепровский район северо-западного шельфа;
2 – область свала глубин от 50 и 500 м; 3 – область Кавказского и Крымского побережий

Fig. 1. Map of the studied area:

- 1 – the Dnieper region of the northwestern shelf; 2 – the drop-off area from 50 and 500 m; 3 – the region of the Caucasian and Crimean coasts

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для анализа влияния атмосферных осадков на физиологические показатели фитопланктона нами были выбраны шельфовые районы, имеющие различные гидрологические особенности, связанные с глубиной, речным стоком и течениями. Также рассматривался район свала глубин (см. рис. 1). При анализе мы исходили из того, что вклад в изменчивость характеристик фитопланктона будет комплексным от атмосферных осадков и берегового стока во время дождей. Поэтому роль осадков в прибрежной зоне более заметна, чем в глубоководной. В выделенный район 1 впадают крупные реки Днепр и Буг. Область свала глубин 2 подвержена влиянию стока рек, хоть и в меньшей степени, чем область 1. Для района 3 характерно отсутствие крупных рек, близость

глубоководной зоны, относительно узкая область основного черноморского течения и довольно быстрая его скорость [Иванов, Белокопытов, 2011]. Из-за возможного возрастания погрешности ближе к берегу наши модельные расчеты параметров фитопланктона проводились с использованием данных спутниковых наблюдений для акватории с границей на расстоянии от берега ~4 км, что может влиять на снижение роли поверхностного стока в районе 3. Поэтому изменчивость параметров фитопланктона в районе 3 более, чем в других рассматриваемых районах, близка к вариациям в глубоководной зоне [Finenko et al., 2019; 2022], тогда как поверхностный сток во время дождей может вносить свой вклад в непосредственной близости от берега. Сезонные среднемесячные изменения исследуемых показателей за 18 лет представлены на рисунке 2.

Сезонная динамика первичной продукции, биомассы фитопланктона и удельной скорости

роста имеют некоторые отличия в годовом цикле, но у всех трех показателей можно отметить в большинстве лет менее или более выраженный зимний максимум (см. рис. 2). Первичная продукция и биомасса фитопланктона в районах 2 и 3 имеют сходную сезонную динамику с характерным максимумом в зимне-весенний период и меньшим нерегулярным в летний. Межгодовая динамика в этих районах также имеет сходный характер. В районе 1 наоборот летний максимум более отчетлив. Сезонная вариабельность удельной скорости роста в приднепровском районе и области свала глубин имеет регулярный летний максимум и несколько меньший зимний или весенний. В районе 3 девять лет из восемнадцати наблюдался наиболее выраженный зимний максимум, обусловленный развитием диатомовых водорослей в холодный период, как и в глубоководной области [Финенко, Крупаткина, 1993; Стельмах, 2017; Микаэлян, 2018].

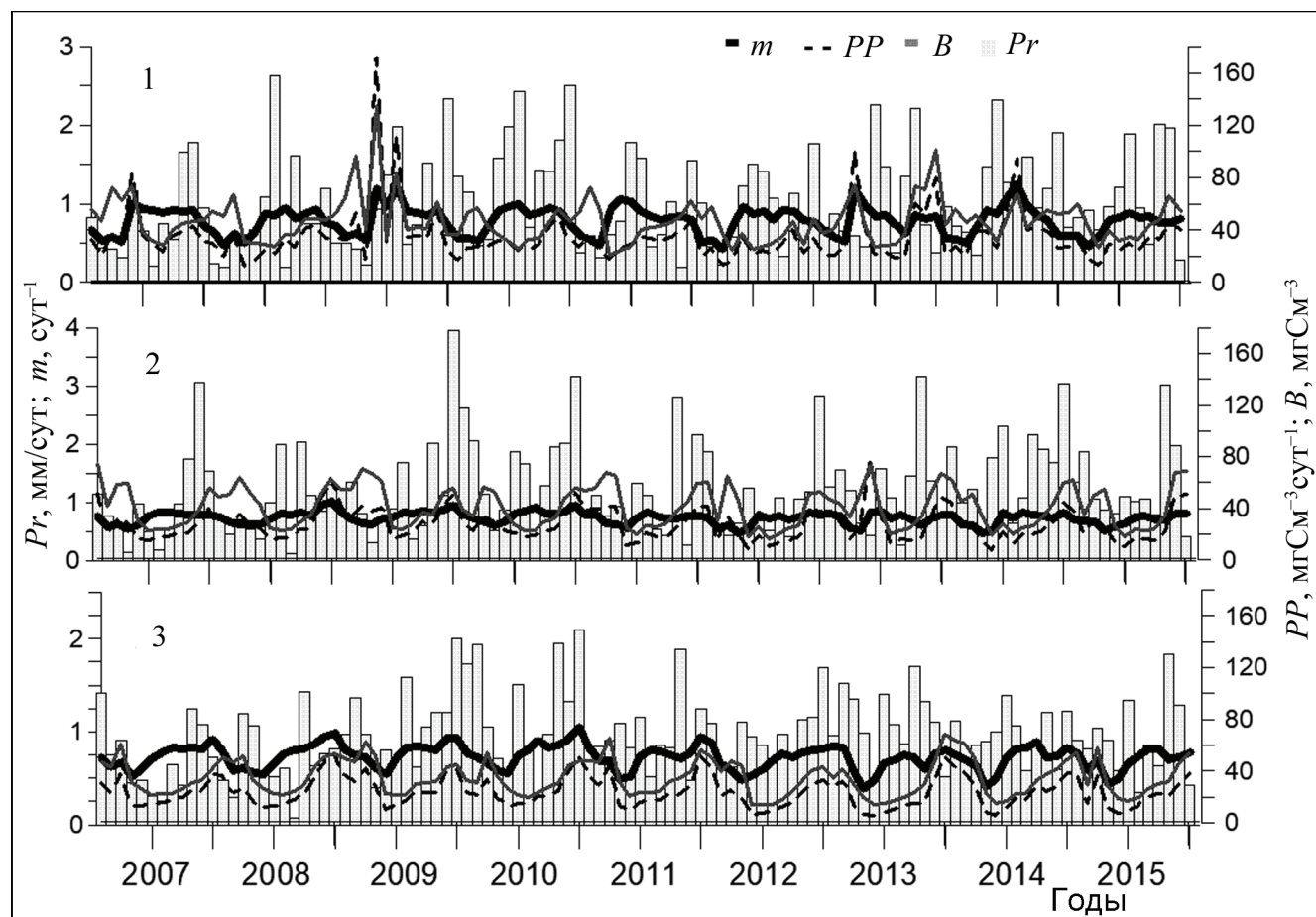


Рис. 2. Сезонные изменения атмосферных осадков, удельной скорости роста, биомассы и первичной продукции фитопланктона в Черном море в северной части шельфа в трех районах: m – удельная скорость роста, сут^{-1} ; PP – первичная продукция, $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{сут}^{-1}$; B – биомасса, $\text{мгС} \cdot \text{м}^{-3}$; Pr – атмосферные осадки, мм/сут

Fig. 2. Seasonal changes in atmospheric precipitation, specific growth rate, biomass and primary production of phytoplankton in the northern part of the Black Sea shelf in three areas: m – specific growth rate, day^{-1} ; PP – primary production, $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$; B – biomass, $\text{mgC} \cdot \text{m}^{-3}$; Pr – precipitation, mm/day

Сезонная изменчивость атмосферных осадков не циклична, как у физиологических параметров, хотя в рассматриваемых регионах в зимний сезон выпадение осадков происходит чаще и их среднемесячные значения выше, чем в другие сезоны в большинстве лет (см. рис. 2). Возможно поэтому в трех районах по результатам регрессионного анализа среднемесячных данных по сезонам наиболее заметная положительная связь (от 5 до 30%) между атмосферными осадками и удельной скоростью роста фитопланктона наблюдалась зимой. В меньшей мере это отмечено для биомассы и первичной продукции. В остальные сезоны связь не была выражена. Для первичной продукции и биомассы фитопланктона и менее для удельной скорости роста в районах 1 и 2 слабая корреляционная связь наблюдалась для лета (3–16%), однако полученные зависимости не значимы статистически. Предполагаемого повышения роли осадков для развития фитопланктонного сообщества в летний период из-за стратификации водной толщи [Вареник и др., 2016] по среднемесячным данным на относительно больших акваториях не выявлено.

По результатам сравнительного и регрессионного анализа многолетней динамики указанных характеристик выраженной связи между атмосферными осадками и показателями фитопланктона не отмечено. Коэффициенты детерминации для трех районов за 18 лет по осредненным данным не превышали $r^2 = 0,2$.

Согласно исследованиям [Вареник и др., 2016], по данным, полученным в районе Южного берега Крыма (пгт Кацивели, Черноморский гидрофизический полигон), указано, что благодаря поступлению биогенных веществ из атмосферы увеличение первичной продукции в Черном море возможно до 2,5%. Авторами предполагалось, что все вещества, поступившие в море, пойдут на прирост первичной продукции. Оценка велась по соотношению Редфилда. Однако, даже в этом случае величина слишком мала по сравнению с другими факторами, влияющими на биологическую систему в Черном море. По другим данным [Burlakova et al., 2003; Guerzoni et al., 1999] для Черного и Средиземного морей предполагалось, что атмосферные осадки обеспечивают прирост первичной продукции более чем на 25%, а в олиготрофных водах их вклад достигает 60% [Guerzoni et al., 1999]. По нашим оценкам, для рассмотренных регионов Черного моря эта величина гораздо меньше и сопоставима с вкладом, указанным в работе [Вареник и др., 2016].

Совместный анализ трех физиологических параметров показал, что наиболее заметное влияние выпадение осадков оказывает на величину удельной скорости роста. По среднемесячным данным,

за 18 лет атмосферные осадки и сопутствующий береговой сток во время дождей объясняли изменение удельной скорости роста приблизительно на 20% в районе 1, на 10 и 5% в районах 2 и 3 соответственно. Тогда как для первичной продукции в трех районах по результатам регрессионного анализа вклад осадков составлял 5% и менее, эта величина сопоставима с погрешностью модельных расчетов, поэтому ее сложно оценить достоверно. Биомасса фитопланктона показала еще меньшую согласованность с выпадением атмосферных осадков. Исходя из результатов, наибольшую роль в повышении показателей фитопланктона и в особенности удельной скорости роста играло увеличение прибрежного и речного стока во время дождей. Удельная скорость роста фитопланктонного сообщества – величина относительная, она определяется отношением абсолютной суточной скорости роста к среднесуточной биомассе [Стельмах, 2017]. В то же время этот показатель чувствителен к относительным изменениям в питательной среде и зависит от видового состава водорослей, поэтому он более заметно реагировал на незначительные изменения условий.

Для трех районов из сравнительного анализа динамики удельной скорости роста фитопланктона и осадков, проведенного с помощью статистической обработки в Excel, выявлено, что в 60–80% случаев при среднемесячных значениях свыше 0,6 мм/сут увеличение выпадения атмосферных осадков относительно предыдущего уровня приводило к повышению удельной скорости роста или поддержанию ее в пределах установившихся значений. При этом возрастание количества среднемесячных осадков более 2 мм/сут хоть и сопровождалось приростом показателя, однако к дополнительному повышению удельной скорости роста не приводило. Прирост удельной скорости роста незначителен, но его стоит отметить на фоне многих факторов, влияющих на фитопланктон. Для первичной продукции и биомассы фитопланктона подобный характер изменений просматривался слабо. В исследованиях [Вареник и др., 2016; Beverland et al., 1998] указывалось, что относительная концентрация азота и других питательных веществ в соответствующем объеме атмосферных осадков снижается с увеличением количества выпадающих осадков. По-видимому, это обстоятельство могло отразиться на вариациях удельной скорости роста и повышении ее в ряде случаев с ростом атмосферных осадков по среднемесячным данным от 0,6 мм/сут и отсутствием большего повышения при возрастании осадков более 2 мм/сут (см. рис. 2). Однако этот вопрос требует дополнительных исследований путем прямых измерений.

В результате анализа было выявлено, что в крупных масштабах на больших акваториях по осред-

ненным данным влияние атмосферных осадков в Черном море не существенно и часто сопоставимо с погрешностью модельных расчетов. Для дополнительного анализа в локальных случаях на меньших масштабах и с более высоким пространственным разрешением в 2010 г. проводилась оценка связи атмосферных осадков и удельной скорости роста, которая осреднялась за двухнедельный период. Рассматривались квадраты $2,5 \times 3,5$ км вблизи Крымского побережья на участке от $33,125^\circ$ в. д. $43,375^\circ$ с. ш. до $35,330^\circ$ в. д. $44,375^\circ$ с. ш. (рис. 3). Для диапазона этих же координат для квадратов $0,25 \times 0,25^\circ$ по спутниковым данным определялось количество осадков по ежесуточным данным (мм/день), а также осредненное за двухнедельный период. Осреднение за две недели осуществлялось для удобства иллюстрирования (см. рис. 3). Осреднения по пространству не проводилось. На рисунке 3 представ-

лены для примера некоторые двухнедельные периоды. В других исследованиях [Стельмах, Мансурова, 2017; Миничева и др., 2018] тоже рассматривался 2010 г., который выделялся как необычный по условиям развития фитопланктонного сообщества, что связывалось с более высокими температурами воды по сравнению с другими годами и повышенным количеством атмосферных осадков. В работе [Стельмах, Мансурова, 2017] оценивалась удельная скорость роста фитопланктона по данным, полученным путем прямых измерений в районе Севастопольской бухты. Работа [Стельмах, Мансурова, 2017] позволила нам сопоставить результаты наших расчетов с данными, полученными *in situ*. У авторов [Миничева и др., 2018] проводились оценки климатических факторов и развития фитопланктонного сообщества для прибрежной северо-западной части моря, в том числе Приднестровья.

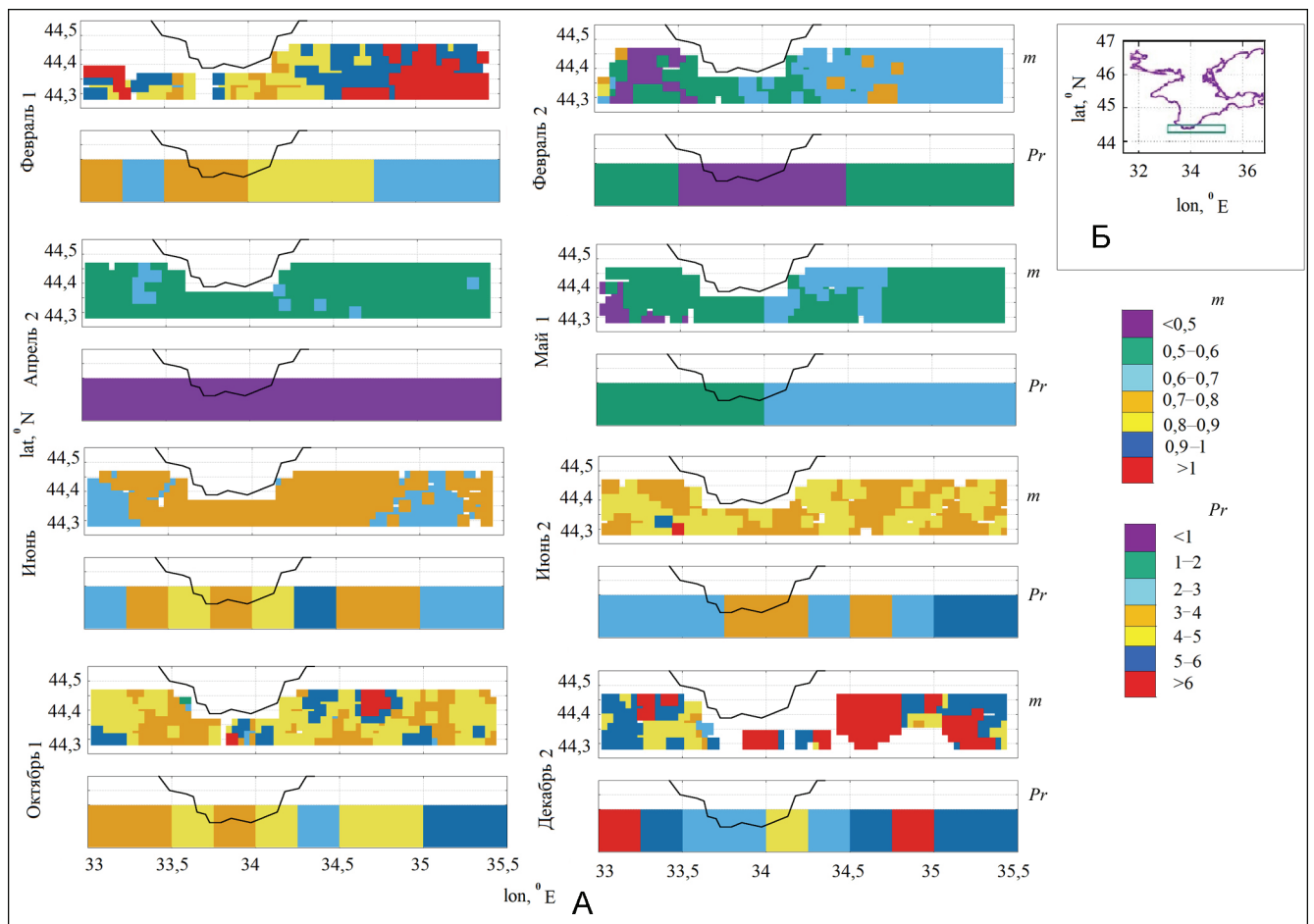


Рис. 3. Двухнедельные изменения удельной скорости роста и атмосферных осадков:

А – регулярные изменения в первой (1) и второй (2) половинах месяца данных удельной скорости роста (m , сут $^{-1}$) (верхняя строка) и количества выпавших осадков (Pr , мм/сут) (нижняя строка) вблизи крымского побережья в 2010 г. в некоторые месяцы; Б – исследуемый район

Fig. 3. Bi-weekly changes of specific growth rate and precipitation:

А – regular changes of specific growth rate (m , day $^{-1}$) (top row) and the amount of precipitation (Pr , mm/day) (bottom line) during first (1) and second (2) half of the month near the Crimean coast for several months of 2010; Б – the study area

По результатам анализа динамики суточных и двухнедельных данных, имевшихся у нас в наличии, для указанных параметров отмечено, что в январе – феврале при увеличении частоты и количества выпадения осадков заметное повышение удельной скорости роста наблюдалось в первой половине февраля. Так, в январе было 16 дней с осадками, в первой половине февраля – 10 дней. Количество осадков в некоторые дни достигало приблизительно 10–25 мм/сут в ряде квадратов анализируемой акватории, а по осредненным за двухнедельный период – 3–5 мм/сут (см. рис. 3). Во второй половине февраля осадки выпадали три дня, и их количество составляло до 10 мм/сут, отмечено и заметное снижение удельной скорости роста. В марте наблюдалась слабая согласованность между выпадением осадков и удельной скоростью роста.

По данным [Стельмах, Мансурова, 2017] в Севастопольской бухте отмечен максимум удельной скорости роста в феврале 2010 г. с величинами 0,6–0,8 сут⁻¹, а на открытом побережье и в марте, что близко к данным, полученным нами. На открытом побережье выделенной нами акватории в первой половине февраля величины удельной скорости роста варьировали от 0,75 до 1,12 сут⁻¹, во второй – от 0,44 до 0,69 сут⁻¹. Во второй половине марта в весеннем максимуме значения варьировали от 0,68–0,83 сут⁻¹. Выявленные максимумы связаны с развитием диатомовых водорослей, преимущественно *Skeletonema Costatum* (Greville) Cleve, 1873 [Стельмах, Мансурова, 2017].

В апреле количество осадков было незначительно, по осредненным двухнедельным величинам в основном не более 1 мм/сут (см. рис. 3). Удельная скорость роста фитопланктона так же постепенно снижалась до первой половины мая, на большей части акватории не превышая 0,6 сут⁻¹. Минимум удельной скорости роста в апреле отмечен и по данным *in situ* для Севастопольской бухты [Стельмах, Мансурова, 2017], который связывают с преобладанием в этот период динофитовых водорослей, слабо развивающихся в условиях невысокой температуры воды.

С 8 мая зафиксировано выпадение осадков до 19 мм/сут, и несколько в меньшем количестве каждый день до 15 мая. Во второй половине мая они практически отсутствовали. Параллельно наблюдалось незначительное увеличение (в 1,03–1,24 раза, в среднем в 1,12 раза) удельной скорости во второй половине мая в 69% рассматриваемых квадратов. На этом повышении отчасти могло отразиться то, что осадки наблюдались ближе к середине месяца и происходило отставание в ответе показателя фитопланктона.

В июне возросло количество осадков, в некоторых квадратах в отдельные дни почти до 50 мм/сут,

а 0 июня – 67 мм/сут (по осредненным двухнедельным значениям до 6 мм/сут). В первой половине месяца отмечено четыре дня, во второй половине – девять дней. Соответственно, отмечен прирост удельной скорости в первой половине июня до $0,71 \pm 0,03$ сут⁻¹ и во второй – до $0,80 \pm 0,02$ сут⁻¹. Июль тоже был относительно влажным. Так, в первые две недели июля при снижении количества осадков относительно июньских значения удельной скорости немного снизились до $0,79 \pm 0,05$ сут⁻¹. Во второй половине июля количество выпавших осадков было больше (от 2 до 30 мм/сут), и наблюдалось возрастание скорости роста фитопланктона в среднем до $0,82 \pm 0,05$ сут⁻¹. В августе количество осадков было менее 1 мм/сут по осредненным двухнедельным данным. Однако удельная скорость роста фитопланктона в первой половине месяца продолжала повышаться по осредненным данным до $0,92 \pm 0,08$ сут⁻¹, варьируя в разных квадратах от 0,86 до 1,27 сут⁻¹. В некоторой степени на этом продолжающемся «цветении» фитопланктона, кроме ряда других факторов, могла отразиться инерция в ответе показателя на выпадение осадков и поступление биогенных веществ в конце июля. Во второй части августа намечилось снижение до $0,85 \pm 0,03$ сут⁻¹ с вариациями в пределах 0,76–0,90 сут⁻¹.

Летние максимумы удельной скорости роста, полученные нами по расчетным данным, также согласуются с данными *in situ* вблизи Севастополя. В течение летнего периода наблюдалось преобладание динофитовых водорослей [Стельмах, Мансурова, 2017]. В то же время севернее исследуемой нами области, по ходу основного черноморского течения, в лиманах северного Причерноморья, с июля наблюдалось массовое «цветение» синезеленых водорослей *Nodularia spumigena* Mertens ex Bornet & Flahault, 1888, вызванное сочетанием высоких температур и обильных осадков, увеличивших речной сток [Миничева и др., 2018]. В июле – августе началось интенсивное «цветение» динофитовых водорослей, а также произошла в целом смена структуры альгосообществ, которая привела к замору гидробионтов [Миничева и др., 2018]. В двух работах [Стельмах, Мансурова, 2017; Миничева и др., 2018] указывалось нетипичное для экосистемы региона интенсивное развитие динофитовых водорослей в 2010 г., чему отчасти поспособствовало интенсивное выпадение осадков. Описанное выше подчеркивает важность оценки атмосферных осадков в прибрежных районах в особенности в локальных зонах вблизи стока крупных рек.

В первой половине сентября выпадение осадков по осредненным данным за две недели составляло 2–3 мм/сут. Во второй половине месяца – <1 мм/сут

в большинстве квадратов. Удельная скорость роста в первые две недели немного повысилась в среднем до $0,86 \pm 0,05 \text{ сут}^{-1}$ с вариациями от 0,77 до $0,95 \text{ сут}^{-1}$. Во второй половине месяца параллельно с малым выпадением осадков величины удельной скорости роста снизились до $0,82 \pm 0,03 \text{ сут}^{-1}$ с крайними значениями от 0,76 до $0,88 \text{ сут}^{-1}$. В октябре было 13 дождливых дней в первой половине месяца с максимальным количеством осадков в различных квадратах от 5 до 42 мм/сут. При этом показатель роста фитопланктона составил $0,81 \pm 0,08 \text{ сут}^{-1}$ с вариациями в квадратах от 0,64 до 1 сут^{-1} (см. рис. 3). Во второй половине месяца отмечалось семь дней с осадками от 4 до 30 мм/сут, удельная скорость роста в среднем возросла до $0,89 \pm 0,07 \text{ сут}^{-1}$ с изменением величин от 0,75 до $1,02 \text{ сут}^{-1}$.

В первой половине ноября осадки отсутствовали, удельная скорость роста снизилась до $0,87 \pm 0,12 \text{ сут}^{-1}$. Область повышенных значений сместилась западнее по направлению основного черноморского течения. Во второй половине ноября количество осадков повысилось по осредненным данным до 5 мм/сут. Удельная скорость возросла до $0,94 \pm 0,11 \text{ сут}^{-1}$.

Обилию осадков в декабре (18 дней) от 3 до 64 мм/сут в различные дни на отдельных участках сопровождалось увеличением удельной скорости роста фитопланктона в среднем до $0,96\text{--}1,13 \text{ сут}^{-1}$ (см. рис. 3). Максимум отмечен во второй половине декабря, величины варьировали от 0,69 до $1,27 \text{ сут}^{-1}$. Этот максимум вызван кроме выпадения осадков рядом факторов: усилением перемешивания водных масс, приводящих к потоку биогенных веществ из глубинных слоев моря, и относительно высокими для этого периода средними температурами воды – $13\text{--}15^\circ$. Можно предположить, что в открытых водах в это время доминировали диатомовые водоросли, характерные для холодного периода, имеющие довольно высокие скорости роста. По результатам исследований в Севастопольской бухте [Стельмах, Мансурова, 2017] в декабре был отмечен минимум, связанный с преобладанием динофитовых водорослей в этом районе. По нашим данным в квадратах с координатами, более близкими к району Севастополя, также отмечены невысокие значения ($0,69 \text{ сут}^{-1}$), вызванные, по видимому, перемешиванием и неоднородностью величин в исследуемой области, в особенности в первой половине месяца (см. рис. 3). Однако численно полученные нами результаты выше, чем в указанной работе. Эта разница может быть связана с отдаленностью исследуемой нами акватории от берега, осреднением данных в квадрате и отсутствием данных в непосредственной близости с берегом и указанной точкой.

ВЫВОДЫ

По результатам анализа, проведенного для 2010 г., в большинстве месяцев можно отметить сходные тенденции в динамике удельной скорости роста фитопланктона и количества выпавших атмосферных осадков. Наблюдения в 2010 г. показывают, что для повышения удельной скорости роста необходимо несколько дней с выпадением осадков от 8 мм/сут вблизи исследуемой акватории, либо 1–2 дня свыше 15 мм/сут, а по осредненным двухнедельным данным от 3 мм/сут для квадратов $0,25 \times 0,25^\circ$. По результатам анализа ежесуточных данных изменения показателей фитопланктона начинались в течение одной-двух недель после выпадения осадков.

Из трех исследуемых показателей (первичная продукция, удельная скорость роста и биомасса фитопланктона) наиболее выраженная связь с динамикой атмосферных осадков выявлена для удельной скорости роста. Это может быть обусловлено тем, что удельная скорость роста величина относительная. По оценкам комплексного влияния среднемесячных осадков и поверхностного стока во время дождей, по осредненным значениям в выделенных акваториях для удельной скорости роста фитопланктона роль атмосферных осадков возрастала до 30% при наличии крупных рек в исследуемом районе. По нашим данным, за 18-летний период для открытого побережья Черного моря для зимнего сезона наблюдалась более заметная корреляция ($r^2 = 0,29$) между удельной скоростью роста и осадками, чем в другие сезоны.

Для трех районов увеличение выпадения количества атмосферных осадков в 60–80% случаев по сравнению с предыдущим уровнем со среднемесячными величинами от 0,6 мм/сут приводило к повышению удельной скорости роста, или поддержанию ее на том же уровне. Увеличение удельной скорости роста в рассмотренных случаях было не пропорциональным атмосферным осадкам. Осадки оказывают незначительное влияние на эколого-физиологические показатели фитопланктона по сравнению с рядом других физических и биологических факторов, но на малых, ограниченных акваториях в короткие отрезки времени их роль возрастает, и они могут оказывать дополнительную стимулирующую роль на изменения характеристик фитопланктона.

По осредненным данным для обширных акваторий открытого побережья и длительных временных интервалов роль атмосферных осадков может быть сопоставима с погрешностью модельных расчетов, и этим вкладом можно пренебречь. В дальнейших исследованиях в этом направлении предпочтительно было бы уделить большее внимание районам с обильным речным стоком, а также анализу связи

количества атмосферных осадков и удельной скорости роста фитопланктона. Актуальным было бы провести исследования путем прямых измерений всех указанных характеристик.

Благодарности. Авторы благодарят д-ра биол. наук, профессора З.З. Финенко за идею работы. Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ по теме № 121041400077-1 «Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом» и частично в рамках государственного задания по теме FNNN-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений» (шифр «Оперативная океанология»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вареник А.В., Калинин Д.В., Мыслина М.А., Хоружий Д.С. Изменение содержания биогенных элементов в поверхностном слое морской воды после выпадения атмосферных осадков / Моря России: фундаментальные и прикладные исследования. Тезисы докладов всероссийской научной конференции. 23–28 сентября 2019 г. Севастополь: ФГБУН ФИЦ МГИ, 2019. С. 51.
- Вареник А.В., Козловская О.Н., Симонова Ю.В. Оценка поступления биогенных элементов с атмосферными выпадениями в районе Южного берега Крыма (Кацивели) в 2010–2015 годах // Морской гидрофизический журнал. 2016. № 5. С. 65–75. DOI: 10.22449/0233-7584-2016-5-65-75.
- Иванов В.А., Белокопытов В.Н. Океанография Черного моря. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2011. 212 с.
- Микаэлян А.С. Временная динамика фитопланктона глубоководного бассейна Черного моря: дис. ... докт. биол. наук. М., 2018. 266 с.
- Миничева Г.Г., Большаков В.Н., Калашиник Е.С., Зотов А.Б., Маринец А.В. Оценка реакции альгосообществ черноморских экосистем на воздействие климатических факторов // Альгология. 2018. Т. 28. № 2. С. 121–135. DOI: 10.15407/alg28.02.121.
- Стельмах Л.В. Закономерности роста фитопланктона и его потребление микрозоопланктоном в Черном море: дис. ... докт. биол. наук. Севастополь, 2017. 310 с.
- Стельмах Л.В., Мансурова И.М. Униmodalная зависимость скорости роста от объема клеток в культурах черноморских видов микроводорослей // Вопросы современной альгологии. 2017. № 1(13). URL: <http://algology.ru/1101>.
- Суслин В.В., Чурилова Т.Я., Ли М.Е. Мончева С., Финенко З.З. Концентрация хлорофилла а в Черном море: Сравнение спутниковых алгоритмов // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2018. Т. 11. № 3. С. 64–72. DOI: 10.7868/S2073667318030085.
- Финенко З.З., Ковалева И.В., Суслин В.В. Новый подход к оценке биомассы фитопланктона и ее вариабельности в поверхностном слое Черного моря по спутниковым данным // Успехи современной биологии. 2018. Т. 138. № 3. С. 294–307. DOI: 10.7868/S0042132418030079.
- Финенко З.З., Крупаткина Д.К. Первичная продукция в Черном море в зимне-весенний период // Океанология. 1993. Т. 33. № 1. С. 94–104.
- Финенко З.З., Мансурова И.М., Суслин В.В. Временная динамика биомассы фитопланктона в поверхностном слое Черного моря по данным спутниковых наблюдений // Океанология. 2022. Т. 62. № 3. С. 416–427. DOI: 10.31857/S0030157422030042.
- Шадрин Н.В., Голубков С.М., Балушкина Е.В., Орлеанский В.К., Миходюк О.С. Отклик экосистемы гиперсолёного Бакальского озера (Крым) на климатические особенности 2004 года // Морской экологический журнал. 2004. Т. 3. № 4. С. 74.
- Beverland I.J., Crowther J.M., Srinivas M.S.N., Heal M.R. The influence of meteorology and atmospheric transport patterns on the chemical composition of rainfall in south-east England, *Atmos. Environ.*, 1998, vol. 32, no. 6, p. 1039–1048, DOI: 10.1016/S1352-2310(97)00365-8.
- Burlakova Z.P., Ereemeeva L.V., Konovalov S.K. Inventory and fluxes of particulate organic carbon and nitrogen in the Black Sea oxic/anoxic water column, *Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea, Proceeding of the “Second International Conference on Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea: Similarities and Differences of Two Interconnected Basins”*, 14–18 October 2002, Ankara, Turkey, TUBITAK Publ., 2003, p. 514–522.
- Finenko Z.Z., Churilova T.Ya., Sosik H.M., Bastruk O. Variability of photosynthetic parameters of the surface phytoplankton in the Black Sea, *Oceanology*, 2002, vol. 42, no. 1, p. 53–67.
- Finenko Z.Z., Kovalyova I.V., Suslin V.V. Use of Satellite Data for the Estimation of the Specific Growth Rate of Phytoplankton in the Surface Layer of the Black Sea, *Rus. J. of Marine Biology*, 2019, vol. 45, no. 4, p. 313–319, DOI: 10.1134/S1063074019040059.
- Fommervault de O.P., Migon C., Dufour A. et al. Atmospheric input of inorganic nitrogen and phosphorus to the Ligurian Sea: Data from the Cap Ferrat coastal time-series station, *Deep-Sea Research I*, 2015, vol. 106, p. 116–125, DOI: 10.1016/j.dsr.2015.08.010.
- Guerzoni S., Chester R., Dulac F. et al. The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea, *Progr. Oceanogr.*, 1999, no. 44, p. 147–190, DOI: 10.1016/S0079-6611(99)00024-5.
- Marañón E. Cell size as a key determinant of phytoplankton metabolism and community structure, *Annual Review of Marine Science*, 2015, vol. 7, p. 4.1–4.24, DOI: 10.1146/annurev-marine-010814-015955.
- Medinets S., Medinets V. Investigations of atmospheric wet and dry nutrient deposition to marine surface in western part of the Black Sea, *Turkish journal of fisheries and aquatic sciences*, 2012, vol. 12, p. 497–505, DOI: 10.4194/1303-2712-v12_2_42.
- Suslin V.V., Churilova T.Ya. Regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and colored

detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean color scanners, *Intern. J. of Rem. Sens.*, 2016, vol. 37, no. 18, p. 4380–4400, DOI: 10.1080/01431161.2016.1211350.

Электронные ресурсы

GPCP Version 3.2 Satellite-Gauge (SG) Combined Precipitation Data Set (GPCPMON), EarthData, DOI: 10.5067/MEASURES/GPCP/DATA304 (дата обращения 02.10.2022).

MODIS-Aqua, MODIS-Terra, URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/par/> (дата обращения 22.05.2019).

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data; 2018. Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA, DOI: 10.5067/AQUA/MODIS/L2/OC/2018 (accessed on 22.05.2019).

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra Ocean Color Data; 2018. Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA, DOI: 10.5067/TERRA/MODIS/L2/OC/2018 (accessed on 22.05.2019).

NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Ocean Color Data; 2018 Reprocessing. NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA, DOI: 10.5067/ORBVIEW-2/SEAWIFS/L2/OC/2018 (accessed on 22.05.2019).

SeaWiFS, URL: <http://podaac.jpl.nasa.gov/sst/> (дата обращения 22.05.2019).

TRMM (TMPA-RT) Near Real-Time Precipitation L3 1 day 0,25×0,25° V7 (TRMM 3B42RT Daily), EarthData, DOI:10.5067/TRMM/TMPA/DAY-E/7 (дата обращения 02.20.2022).

Поступила в редакцию 07.09.2022

После доработки 16.01.2023

Принята к публикации 22.02.2023

INFLUENCE OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION AND SURFACE RUNOFF ON PHYTOPLANKTON CHARACTERISTICS IN THE NORTHERN PART OF THE BLACK SEA

I.V. Kovalyova¹, V.V. Suslin²

¹ Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas, Russian Academy of Sciences, Department of Algae Ecological Physiology, Scientific Researcher, Ph.D. in Biology; e-mail: ila.82@mail.ru

² Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Department of Dynamics of the Oceanic Processes, Head of the Department, Leading Scientific Researcher, Ph.D. in Physics and Mathematics; e-mail: slava.suslin@mhi-ras.ru

The joint dynamics of the Black Sea phytoplankton parameters (primary production, specific growth rate, biomass) and the amount of precipitation over the period from 1998 to 2015 was studied in coastal areas and the open coast of the northern part of the Black Sea. The analysis used satellite data (SG) (GPCPMON) GPCP Version 3.2, TRMM TMPA (3B42RT), as well as SeaWiFS from 1998 to 2010, MODIS-Aqua from 2002 to 2015 and MODIS-Terra from 2000 to 2015. Phytoplankton indicators were calculated according to the models developed earlier by the authors. The average monthly values of all considered values were evaluated, as well as bi-weekly and daily values for atmospheric precipitation. As a result of the study, it was revealed that the role of atmospheric precipitation for the variability of phytoplankton characteristics is not significant in vast water areas over long time intervals, and it could be neglected. In some cases in the presence of large rivers and coastal runoff it increases up to 30% in the offshore areas. There was also a more noticeable effect of atmospheric precipitation on the biological productivity of phytoplankton in small, limited water areas over short time intervals. According to our data during the 18-year period there was a more noticeable correlation between the specific growth rate and precipitation in winter than in other seasons for the open coast of the Black Sea. The correlation of biomass and primary production with atmospheric precipitation is less pronounced. The specific growth rate correlated more than other studied phytoplankton indicators with the amount of precipitation. In three districts, an increase in the amount of precipitation relative to the previous level with monthly averages above 0,6 mm/day led to an increase in the specific growth rate, or maintained it at the same level. The increase in the specific growth rate was not the same everywhere and was not proportional to the amount of atmospheric precipitation. This indicates the influence of many factors on phytoplankton characteristics; however, precipitation could have an additional stimulating role.

Keywords: primary production, specific growth rate, biomass, model calculations, satellite observations

Acknowledgements. The authors thank Professor Z.Z. Finenko, Ph.D. in Biology, for the idea of the work. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Federal Research Center IBSS on the theme no. 121041400077-1 “Functional, metabolic and toxicological aspects of hydrobionts and their popula-

tions existence in biotopes with different physical-chemical regimes”, and partially within the framework of the state assignment on the theme FNNN-2021-0003 “Development of operational oceanology methods based on interdisciplinary research of the marine environment formation and evolution and on mathematical modeling using data of remote and direct measurements” (code “Operational oceanology”).

REFERENCES

- Beverland I.J., Crowther J.M., Srinivas M.S.N., Heal M.R. The influence of meteorology and atmospheric transport patterns on the chemical composition of rainfall in south-east England, *Atmos. Environ.*, 1998, vol. 32, no. 6, p. 1039–1048, DOI: 10.1016/S1352-2310(97)00365-8.
- Burlakova Z.P., Ereemeeva L.V., Konovalov S.K. Inventory and fluxes of particulate organic carbon and nitrogen in the Black Sea oxic/anoxic water column, *Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea. Proceeding of the “Second International Conference on Oceanography of the Eastern Mediterranean and Black Sea: Similarities and Differences of Two Interconnected Basins”*, 14–18 October 2002, Ankara, Turkey: TUBITAK Publ., 2003, p. 514–522.
- Finenko Z.Z., Churilova T.Ya., Sosik H.M., Bastruk O. Variability of photosynthetic parameters of the surface phytoplankton in the Black Sea, *Oceanology*, 2002, vol. 42, no. 1, p. 53–67.
- Finenko Z.Z., Kovaleva I.V., Suslin V.V. Novyi podkhod k otsenke biomassy fitoplanktona i ee variabel'nosti v poverkhnostnom sloe Chernogo morya po sputnikovym dannym [A New Approach to Estimate Phytoplankton Biomass and Its Variability in the Black Sea Surface Water Layer Based on Satellite Data], *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2018, vol. 138, no. 3, p. 294–307, DOI: 10.7868/S0042132418030079. (In Russian)
- Finenko Z.Z., Kovalyova I.V., Suslin V.V. Use of Satellite Data for the Estimation of the Specific Growth Rate of Phytoplankton in the Surface Layer of the Black Sea, *Rus. J. of Marine Biology*, 2019, vol. 45, no. 4, p. 313–319, DOI: 10.1134/S1063074019040059.
- Finenko Z.Z., Krupatkina D.K. Pervichnaya produktsiya v Chernom more v zimne-vesennii period [Primary production in the Black Sea during winter-spring period], *Okeanologiya*, 1993, v. 33, no. 1, p. 94–104. (In Russian)
- Finenko Z.Z., Mansurova I.M., Suslin V.V. Temporal Dynamics of Phytoplankton Biomass in the Surface Layer of the Black Sea According to Satellite Observations, *Oceanology*, 2022, vol. 62, no. 3, p. 358–368, DOI: 10.31857/S0030157422030042.
- Fommervault de O.P., Migon C., Dufour A. et al. Atmospheric input of inorganic nitrogen and phosphorus to the Ligurian Sea: Data from the Cap Ferrat coastal time-series station, *Deep-Sea Research I.*, 2015, vol. 106, p. 116–125, DOI: 10.1016/j.dsr.2015.08.010.
- Guerzoni S., Chester R., Dulac F. et al. The role of atmospheric deposition in the biogeochemistry of the Mediterranean Sea, *Progr. Oceanogr.*, 1999, no. 44, p. 147–190, DOI: 10.1016/S0079-6611(99)00024-5.
- Ivanov V.A., Belokopytov V.N. *Okeanografiya Chernogo morya* [Oceanography of the Black Sea], NAS of Ukraine, Marine Hydrophysical Institute, Sevastopol, EKOSI-Gidrofizika Publ., 2011, 209 p.
- Marañón E. Cell size as a key determinant of phytoplankton metabolism and community structure, *Annual Review of Marine Science*, 2015, vol. 7, p. 4.1–4.24, DOI: 10.1146/annurev-marine-010814-015955.
- Medinets S., Medinets V. Investigations of atmospheric wet and dry nutrient deposition to marine surface in western part of the Black Sea, *Turkish journal of fisheries and aquatic sciences*, 2012, vol. 12, p. 497–505, DOI: 10.4194/1303-2712-v12_2_42.
- Mikaelyan A.S. *Vremennaya dinamika fitoplanktona glubokovodnogo basseina Chernogo morya* [Temporal dynamics of phytoplankton in the deep-sea basin of the Black Sea], D. Sc. Thesis in Biology, Moscow, 2018, 266 p. (In Russian)
- Minicheva G.G., Bol'shakov V.N., Kalashnik E.S., Zotov A.B., Marinets A.V. Otsenka reaktsii al'gosoobshchestv chernomorskiikh ekosistem na vozdeistvie klimaticheskikh faktorov [Assessment of the response of algae communities to the influence of climatic factors in the North-Western Black Sea ecosystem], *Al'gologiya*, 2018, vol. 28, no. 2, p. 121–135, DOI: 10.15407/alg28.02.121. (In Russian)
- Shadrin N.V., Golubkov S.M., Balushkina E.V., Orlean-skii V.K., Mikhodyuk O.S. Otklik ekosistemy gipersol'nogo Bakal'skogo ozera (Krym) na klimaticheskie osobennosti 2004 goda [Response of the ecosystem of the hypersalted Bakal Lake (Crimea) to 2004 climate pattern], *Morskoi ekologicheskii zhurnal*, 2004, vol. 3, no. 4, p. 74. (In Russian)
- Stel'makh L.V., Mansurova I.M. Unimodal'naya zavisimost' skorosti rosta ot ob'ema kletok v kul'turakh chernomorskiikh vidov mikrovdoroslei [Unimodal dependence of the growth rate on cell volume in the cultures of the Black Sea microalgae], *Voprosy sovremennoi al'gologii*, 2017, no. 1(13), URL: <http://algology.ru/1101>. (In Russian)
- Stel'makh L.V. *Zakonomernosti rosta fitoplanktona i ego potreblenie mikrozooplanktonom v Chernom more* [Patterns of phytoplankton growth and its consumption by microzooplankton in the Black Sea], D. Sc. Thesis in Biology, Sevastopol, 2017, 310 p. (In Russian)
- Suslin V.V., Churilova T.Ya. Regional algorithm for separating light absorption by chlorophyll-a and colored detrital matter in the Black Sea, using 480–560 nm bands from ocean color scanners, *Intern. J. of Rem. Sens.*, 2016, vol. 37, no. 18, p. 4380–4400, DOI: 10.1080/01431161.2016.1211350.
- Suslin V.V., Churilova T.Ya., Li M.E., Moncheva S., Finenko Z.Z. Kontsentratsiya khlorofilla a v Chernom more: Sravnenie sputnikovykh algoritmov [Comparison of the Black Sea chlorophyll a algorithms for SeaWiFS and MODIS instruments], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*, 2018, vol. 11, no. 3, p. 64–72, DOI: 10.7868/S2073667318030085. (In Russian)
- Varenik A.V., Kalinskaya D.V., Myslina M.A., Khoruzhii D.S. [Changes in the content of biogenic elements in the surface layer of seawater after precipitation], *Morya Rossii: fundamental'nye i prikladnye issledovaniya*, Tezisy dokladov vserossiiskoi nauchnoi konferentsii, 23–28 sentyabrya 2019 g., Sevastopol', FGBUN FITs MGI [Seas of Russia: fundamental and applied research, Abstracts of reports of the All-Russian scientific conference,

- September 23–28, 2019, Sevastopol: FGBUN FIT MGI], 2019, p. 51. (In Russian)
- Varenik A.V., Kozlovskaya O.N., Simonova Yu.V. Estimation of nutrient fluxes to the Crimean Southern coast (Katsiveli) supplied by the atmospheric precipitation in 2010–2015, *Physical oceanography*, 2016, iss. 5, p. 61–70, DOI: 10.22449/1573-160X-2016-5-61-70.
- Web sources*
- GPCP Version 3.2 Satellite-Gauge (SG) Combined Precipitation Data Set (GPCPMON) DOI: 10.5067/MEASURES/GPCP/DATA304 (data access 02.10.2022).
- MODIS-Aqua, MODIS-Terra, URL: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/atbd/par/> (access data 22.05.2019).
- NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua Ocean Color Data, 2018 Reprocessing, NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA, DOI: 10.5067/AQUA/MODIS/L2/OC/2018 (access data 22.05.2019).
- NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Terra Ocean Color Data, 2018 Reprocessing, NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA, DOI: 10.5067/TERRA/MODIS/L2/OC/2018. (access data 22.05.2019).
- NASA Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Ocean Color Data, 2018 Reprocessing, NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA, DOI: 10.5067/ORBVIEW-2/SEAWIFS/L2/OC/2018 (access data 22.05.2019).
- SeaWiFS, URL: <http://podaac.jpl.nasa.gov/sst/> (access data 22.05.2019).
- TRMM (TMPA-RT) Near Real-Time Precipitation L3 1 day 0.25×0.25 degree V7 (TRMM_3B42RT_Daily), DOI: 10.5067/TRMM/TMPA/DAY-E/7 (access data 20.02.2022).

Received 07.09.2022

Revised 16.01.2023

Accepted 22.02.2023