

ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ,
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 574.52:551.464

КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ
ЭКОСИСТЕМЫ В ЧЕРНОМ МОРЕ С УЧЕТОМ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ
И ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ¹

© 2022 г. С. Б. Крашенинникова^а, *, Н. И. Минкина^а, И. Г. Шокурова^б, Э. З. Самышев^а

^аФИЦ Институт биологии южных морей им. А.О. Ковалевского РАН,
Севастополь, 299011 Россия

^бФИЦ Морской гидрофизический институт РАН,
Севастополь, 299011 Россия

*e-mail: svetlanabk@mail.ru

Поступила в редакцию 27.01.2021 г.

После доработки 29.06.2021 г.

Принята к публикации 29.06.2021 г.

Проведен анализ распределения компонентов экосистемы (фитопланктона, ракообразного эпи-, батипланктона и желетелого планктона) с учетом гидрохимических и гидрометеорологических условий на основе данных комплексных съемок в Черном море. Учитывались следующие факторы среды: гидрохимические – биогенные элементы (нитраты, нитриты, фосфаты, кремний) как лимитирующие факторы роста биомассы фитопланктона и гидрометеорологические (скорость и направление ветра, экмановская накачка, апвеллинги, плотностные фронты), влияющие на распределение и концентрацию биогенов. Получено, что пространственное распределение биогенных элементов и фитопланктона хорошо согласуется с сезонными изменениями вертикального подъема вод – экмановской накачки, связанной с неоднородностью поля ветра над морем. Анализ межгодовой изменчивости экмановской накачки за период 1979–2016 гг. показал, что зимой над всей глубоководной частью моря преобладает циклоническая завихренность в поле ветра, сопровождающаяся вертикальным подъемом вод, что создает благоприятные условия для обогащения вод верхнего слоя моря биогенными элементами. В летний сезон циклоническая завихренность ветра в основном преобладает над восточной частью моря, внося вклад в подъем глубинных вод. Над западной частью моря летом преобладает в среднем антициклоническая завихренность, препятствуя подъему глубинных вод.

Ключевые слова: фитопланктон, зоопланктон, биогены, ветер, экмановская накачка, плотностные фронты, Черное море.

DOI: 10.31857/S0321059622010096

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании функционирования экосистемы Черного моря актуально изучение пространственно-временной изменчивости компонентов экосистемы и их трофических связей в верхнем фотическом слое [5, 10, 17, 32]. Кроме того, остается важным вопрос о зависимости численности и биомассы компонентов экосистемы от условий их среды обитания. Известно, что биомасса фито- и зоопланктона меняется по сезонам

и неоднородно распределена по акватории Черного моря, что связано с действием на экосистему различных факторов [16, 18, 22, 32]. К числу таких факторов относятся: гидрологические (температура, соленость, градиенты плотности морской воды), гидрометеорологические (потоки тепла на поверхности, скорость ветра, экмановская накачка, прибрежный апвеллинг), гидрохимические (биогены, поллютанты), оптические (освещенность). Кроме того, трофические связи внутри экосистемы и сезонные вариации гидрометеорологических условий приводят к изменениям не только численности, но и видов фитопланктона в течение года [1, 21].

Анализ согласованности пространственно-временной изменчивости компонентов экосистемы и факторов среды – наиболее информативный способ выявления связей между ними. В настоящее время имеются непрерывные ряды данных,

¹ Работа выполнена в рамках программы исследований ФИЦ ИнБЮМ “Функциональные, метаболические и токсикологические аспекты существования гидробионтов и их популяций в биотопах с различным физико-химическим режимом” (0556-2021-0003) и программы ФИЦ МГИ “Фундаментальные исследования процессов взаимодействия в системе океан–атмосфера, определяющих региональную пространственно-временную изменчивость природной среды и климата” (0555-2021-0002).

позволяющие анализировать изменчивость гидрометеорологических факторов. Однако анализ изменчивости компонентов экосистемы за счет влияния факторов среды затруднен из-за отсутствия регулярных данных о численности и биомассе фито- и зоопланктона, а также о концентрации биогенных элементов [12, 16, 18, 32]. Поэтому для таких целей часто используют численные модели [6, 26]. В последнее время изменчивость отдельных компонентов экосистемы также изучают на основе спутниковых наблюдений, имеющих регулярный характер [11, 13]. Тем не менее натурные данные – основной индикатор состояния экосистемы моря. Анализ межгодовой изменчивости компонент экосистемы по натурным наблюдениям показывает важность влияния на нее климатических факторов, метеоусловий и концентрации биогенных элементов [18, 22]. В большинстве ранних исследований рассматривается влияние единичных факторов на изменчивость отдельных компонентов экосистемы. В настоящей работе ставится задача учета комплекса факторов, одновременно влияющих на работу нескольких компонентов экосистемы. Выполненные в разные сезоны 1992 г. уникальные комплексные съемки гидрологических, оптических, биологических и гидрохимических характеристик, включая съемку CoMSBlack'92 [4, 24], а также данные атмосферного реанализа [19] позволяют учесть наибольшее число факторов и наиболее полно проанализировать их влияние на распределение основных компонентов экосистемы.

Цель работы – анализ влияния гидрохимических и гидрометеорологических факторов среды на распределение основных компонентов экосистемы (фито- и зоопланктона) в Черном море.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В работе использовались следующие данные:

биомасса фитопланктона, ракообразного эпитипланктона и желетелых организмов (мг/м^3); концентрация биогенных элементов – нитратов (мг/л), нитритов, кремния, общего фосфора (мкг/л); температура ($^{\circ}\text{C}$) и соленость (psu), полученные в рейсе № 60 научно-исследовательского судна погоды (НИСП) “Г. Ушаков” в марте 1992 г. и рейсах № 57 и 61 научно-исследовательского судна (НИС) “Э. Кренкель” в мае и июле 1992 г. [5]; все съемки выполнены по единой схеме станций во всей северной половине Черного моря;

температура ($^{\circ}\text{C}$) и соленость (psu) из банка данных Морского гидрофизического института РАН (ФИЦ МГИ РАН) [3];

скорость ветра на высоте 10 м с дискретностью 6 ч по реанализу ERA-Interim ($0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$, 6 ч) [19].

Кроме того, для сравнения и анализа полученных результатов привлекались оценки, представленные в работах [1, 8, 12, 18, 20, 23, 24, 25].

Для анализа изменчивости пространственно-временного распределения компонентов экосистемы предварительно рассчитывалась средняя концентрация биомассы фито- и зоопланктона и биогенов в четырех слоях (поверхностном микрослое, верхнем перемешанном слое, слое термоклина и ниже термоклина до 50 м для фитопланктона и до 100 м для зоопланктона) по методике, изложенной в работе [23]. С учетом суточных вертикальных перемещений фито-, мезозоопланктона и желетелого планктона рассматривалась также средняя концентрация биомассы на каждой станции в слое от поверхности до верхней границы галоклина. Для концентрации биогенов также находились средневзвешенные величины.

Анализировались следующие гидрометеорологические факторы, оказывающие влияние на распределение биогенных элементов: экмановская вертикальная скорость, возникающая в результате неоднородности ветрового поля (завихренности), прибрежный апвеллинг, скорость и направление ветра и плотностные фронты в районах стока рек.

В открытом море распределение биогенных элементов анализировалось на основе его сравнения с распределением экмановской вертикальной скорости (экмановской накачки) на нижней границе экмановского слоя. Вертикальная экмановская скорость вычислялась на основе данных о скорости ветра по формуле [31]:

$$w_E = \frac{1}{\rho_0} \operatorname{rot}_z \frac{\tau}{f}, \quad (\text{м/с}),$$

где ρ_0 , кг/м^3 – плотность морской воды; f , с^{-1} – параметр Кориолиса; $\tau = (\tau_x, \tau_y)$, Н/м^2 – напряжение трения ветра. Для расчета напряжения ветра использована аэродинамическая формула $\tau = \rho_a C_D \mathbf{V} |\mathbf{V}|$, где ρ_a , кг/м^3 – плотность воздуха; $C_D = 1.3 \times 10^{-3}$ – безразмерный коэффициент трения ветра о морскую поверхность; $\mathbf{V} = (u, v)$, м/с – скорость ветра на высоте 10 м.

Изменение концентрации биогенных элементов у берегов анализировалось на примере района моря у Южного берега Крыма (ЮБК) в сравнении с изменениями повторяемости ветров, вызывающих апвеллинг. Наиболее вероятные условия возникновения апвеллинга в прибрежье ЮБК – западные и юго-западные ветры [9]. Для ветров указанных направлений вычислялась среднемесячная повторяемость (%) по отношению к общему числу ситуаций с разным направлением ветра. Направление ветра определялось как направление вектора скорости, полученного осреднением

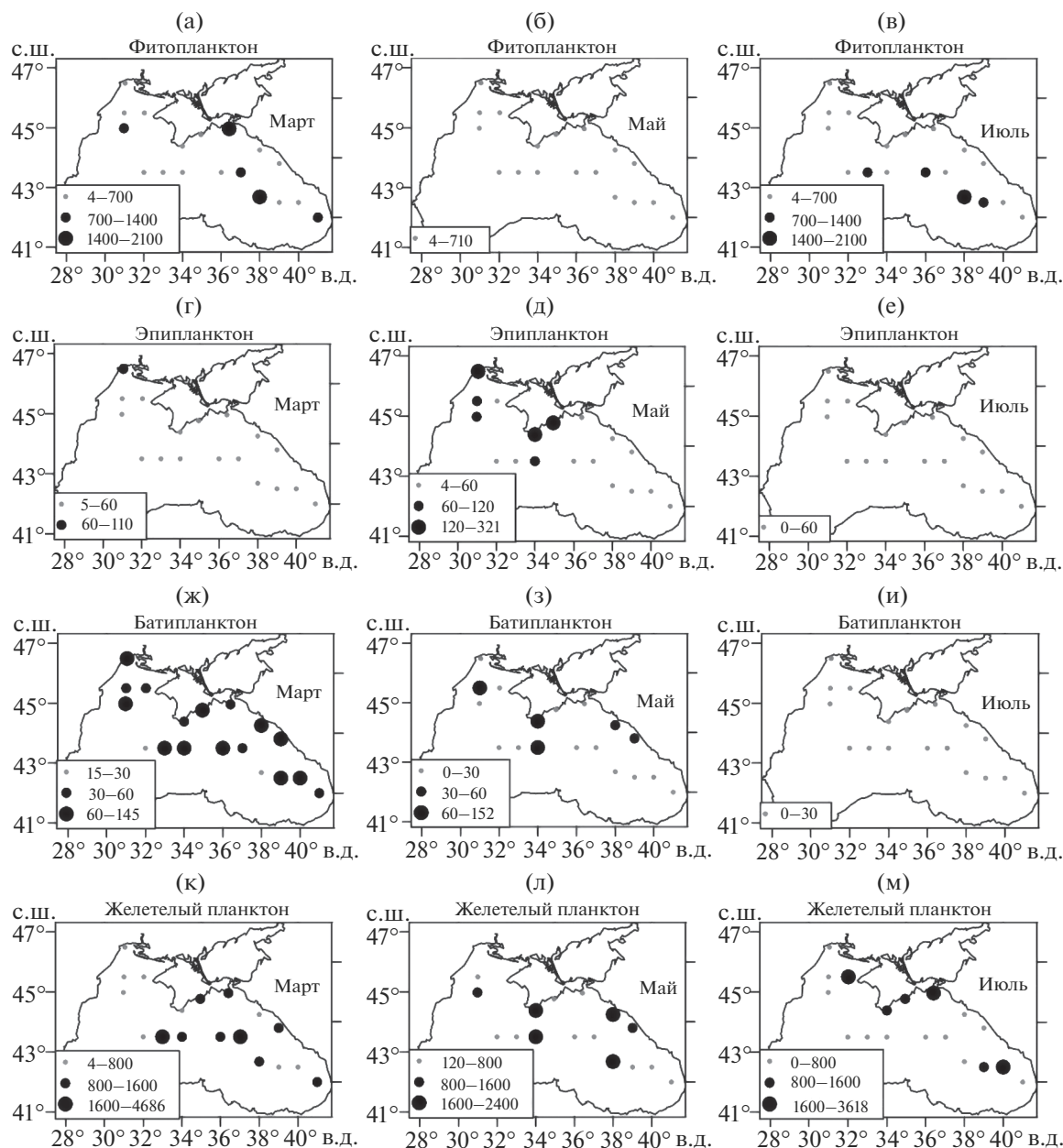


Рис. 1. Пространственное распределение средней концентрации биомассы фитопланктона (а, б, в), ракообразных эпипланктона (г, д, е) и батиопланктона (ж, з, и), желетелого планктона (к, л, м) в марте, мае и июле 1992 г. Величины биомассы выражены в $мг/м^3$.

компонент скорости ветра (u, v) в рассматриваемом районе.

Плотностные фронты определялись путем вычисления горизонтальных градиентов плотности морской воды ρ_0 ($кг/м^4$). Плотность рассчитывалась на основе уравнения ЮНЕСКО по данным о температуре и солёности, предварительно интерполированных на регулярную сетку методом оптимальной интерполяции [2, 27].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Компоненты экосистемы

На рис. 1 представлены пространственные распределения суммарной биомассы фитопланктона, ракообразного эпи-, батиопланктона и желетелого планктона в марте, мае и июле 1992 г.

Большие значения биомассы фитопланктона отмечались в марте и июле, малые – в мае. Средняя по анализируемой области концентрация

фитопланктона в мае была в 3 раза меньше, а в июле — в 1.5 раза меньше, чем в марте (рис. 1а–1в). Высокие значения биомассы микроводорослей в марте и июле в основном наблюдались в центральной и восточной частях моря. В течение года также менялось вертикальное распределение фитопланктона. Наибольшая биомасса фитопланктона была сконцентрирована в поверхностном слое в марте и мае, в подповерхностном слое (в сезонном термоклине) — в июле.

Суммарная биомасса эпи- и батипланктона уменьшалась от марта к июлю, однако их динамика имела свои особенности. В мае средняя биомасса эпипланктона была в 3 раза выше, чем в марте и июле (рис. 1г–1е). Эпипланктон весной в основном располагался в поверхностном слое моря, а в июле в подповерхностном. Средняя концентрация батипланктона (копепод) была в мае в 2 раза меньше, а в июле в 10 раз меньше, чем в марте.

Средняя концентрация желетелого планктона (преимущественно гребневиков *Mnemiopsis leidyi* A. Agassiz, 1865 и *Pleurobrachia pileus* O. F. Müller, 1776) в пелагиали практически не менялась в рассматриваемые месяцы (рис. 1к–1м). Однако она снижалась в поверхностном слое и возрастала в подповерхностном слое от марта к июлю. В марте и мае большие значения биомассы желетелого планктона наблюдались в центре Черного моря. В июле его концентрация увеличилась у берегов Крыма и в районе Батумского антициклонического круговорота, что связано с увеличением загрязнений антропогенного происхождения [28, 30].

Гидрохимические факторы

Пространственное распределение биогенных элементов имеет характер, аналогичный распределению фитопланктона. Большая концентрация нитритов и нитратов отмечалась в марте по всей исследуемой области как в пелагиали, так и в прибрежных районах. К маю она уменьшилась в 2 раза (рис. 2а–2д). В июле концентрации нитритов и нитратов увеличились по сравнению с маем, но в основном в глубоководной восточной части моря и у берегов Крыма.

Концентрации фосфатов в среднем по акватории Черного моря в марте и в июле также оказались выше, чем в мае (рис. 2ж–2и). Большие значения отмечались на северо-западном шельфе в марте и в восточной части моря — в июле.

Гидрометеорологические факторы

Рост обилия фитопланктона — первого звена в пищевой цепи — лимитируется концентрацией биогенных элементов. Распределение биогенных элементов зависит от внешних факторов и их пространственно-временной неоднородности.

К таким факторам относится ветровое воздействие, по-разному проявляющееся в центральных и прибрежных областях, циркуляция вод, сток рек и бытовых отходов, плотностная структура вод.

В центральной части моря основной источник биогенов — их поступление из глубинных вод, так как здесь их концентрация увеличивается с глубиной. Преобладающая в течение всего года циклоническая завихренность ветра над морем обуславливает вертикальный подъем вод и более высокое положение пикноклина в центральной части моря. Наиболее высокие вертикальные скорости подъема вод, обусловленные циклонической завихренностью ветра, отмечаются с января по март (рис. 3а). С этим, по-видимому, связаны высокие концентрации нитритов и нитратов в центральных районах, наблюдаемые в марте (рис. 2а, 2г), и, как следствие, большие величины биомассы фитопланктона (рис. 1а).

На рис. 3г–3е представлено пространственное распределение средней экмановской скорости для марта, мая и июля 1992 г. Точками обозначены локальные районы подъема вод, обусловленного синоптическими ситуациями с циклонической завихренностью ветра, которые сопровождаются положительной вертикальной скоростью $>10^{-5}$ м/с. В марте наблюдались большие значения экмановской скорости во всей глубоководной части моря (рис. 3г), в мае и июле — в восточной части Черного моря и у берегов Турции (рис. 3д, 3е). Повышенные концентрации биогенов (нитритов, нитратов и фосфатов) в июле (рис. 2и, 2м) также локализовались в восточной части моря, где отмечены повышенные значения экмановской накачки (точки на рис. 3е). В июле 1992 г. средняя по акватории величина экмановской накачки была в 3 раза выше, чем в мае (рис. 3а). Этим обстоятельством могут объясняться более высокие концентрации нитратов в июле по сравнению с маем в юго-восточном районе (рис. 2з) и, как следствие, наибольшие значения биомассы фитопланктона (рис. 1в).

На рис. 4 приведены средние значения экмановской вертикальной скорости для января–марта и июня–августа для глубоководных районов западной и восточной частей моря в 1979–2016 гг. В январе–марте, когда над морем усиливается циклоническая завихренность ветра (рис. 3а), вертикальный подъем вод преобладает как в западной, так и в восточной частях моря. Отрицательные значения, свидетельствующие об опускании вод, наблюдаются лишь в некоторые годы в западной части моря. Летом, когда циклоническая завихренность ветра в среднем по морю ослабевает (рис. 3а), величина экмановской накачки для двух частей моря различается по знаку. В восточной части моря преобладает циклоническая завихренность ветра, поэтому экмановская

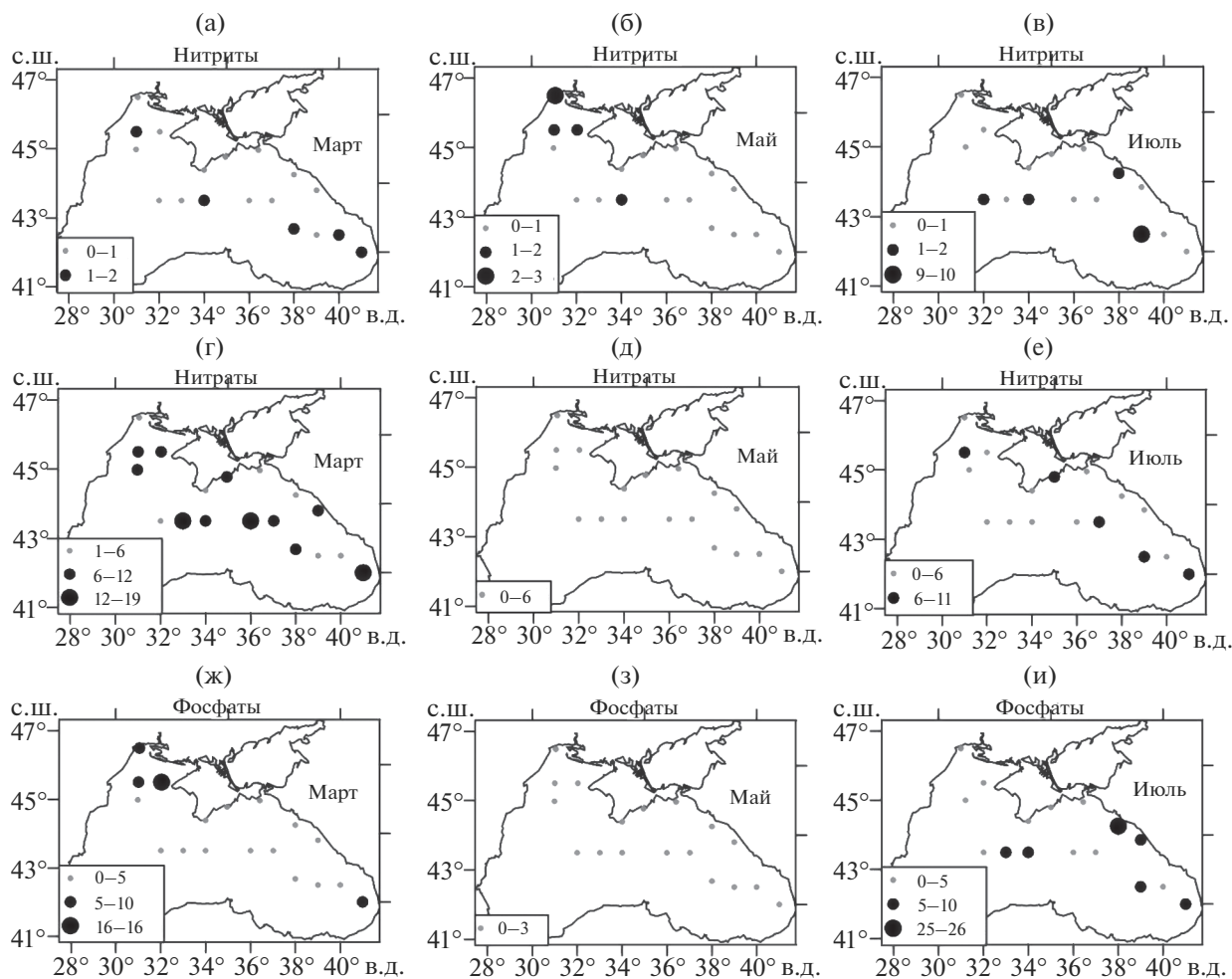


Рис. 2. Пространственное распределение биогенов в пелагиали северной части Черного моря: нитриты NO_2 (а, б, в), мкг/л, нитраты NO_3 (г, д, е), мкг/л, общий фосфор P, (ж, з, и), мкг, для марта, мая и июля 1992 г.

скорость в основном имеет положительные значения, т. е. происходит интенсивный подъем вод. В западной части моря преобладает антициклоническая завихренность в поле ветра, поэтому значения экмановской вертикальной скорости в среднем отрицательные и направлены вниз, что ослабляет подъем вод, богатых биогенными элементами в этой части моря.

Таким образом, можно предположить, что летом в глубоководных районах восточной части моря значимый источник поступления биогенных элементов в фотический слой — экмановский подъем вод за счет циклонической завихренности ветра над морем.

Высокие концентрации биогенов в центральных районах моря в июле по сравнению с маем также могут быть связаны с большими скоростями ветра. В результате воздействия сильного ветра происходит механическое перемешивание вод, приводящее к обогащению поверхностных вод биогенными элементами [11]. В июле 1992 г. сред-

няя скорость ветра превышала среднемноголетнюю величину за период 1979–2016 гг. и была выше майской (рис. 3б). Высокие значения скорости и завихренности ветра в июле 1992 г. также сопровождались усилением циркуляции вод в море [8, 23].

Концентрация биогенных элементов в прибрежных районах может меняться за счет апвеллингов, а также за счет сезонного изменения стока рек и бытовых стоков [5, 15]. У ЮБК апвеллинг возникает в основном при западных и юго-западных ветрах [9], отгоняющих поверхностные воды в море, взамен которых поднимаются глубинные воды. Расчет показывает, что в марте 1992 г. повторяемость ветров этих направлений составляла 32%, а в мае и июле была приблизительно одинаковой — 24 и 23% соответственно. Отметим, что в мае 1992 г. повторяемость этих ветров была намного меньше среднемноголетней величины за 1979–2016 гг. (рис. 4в). Высокие концентрации нитратов у ЮБК в марте и июле (рис. 2) могут

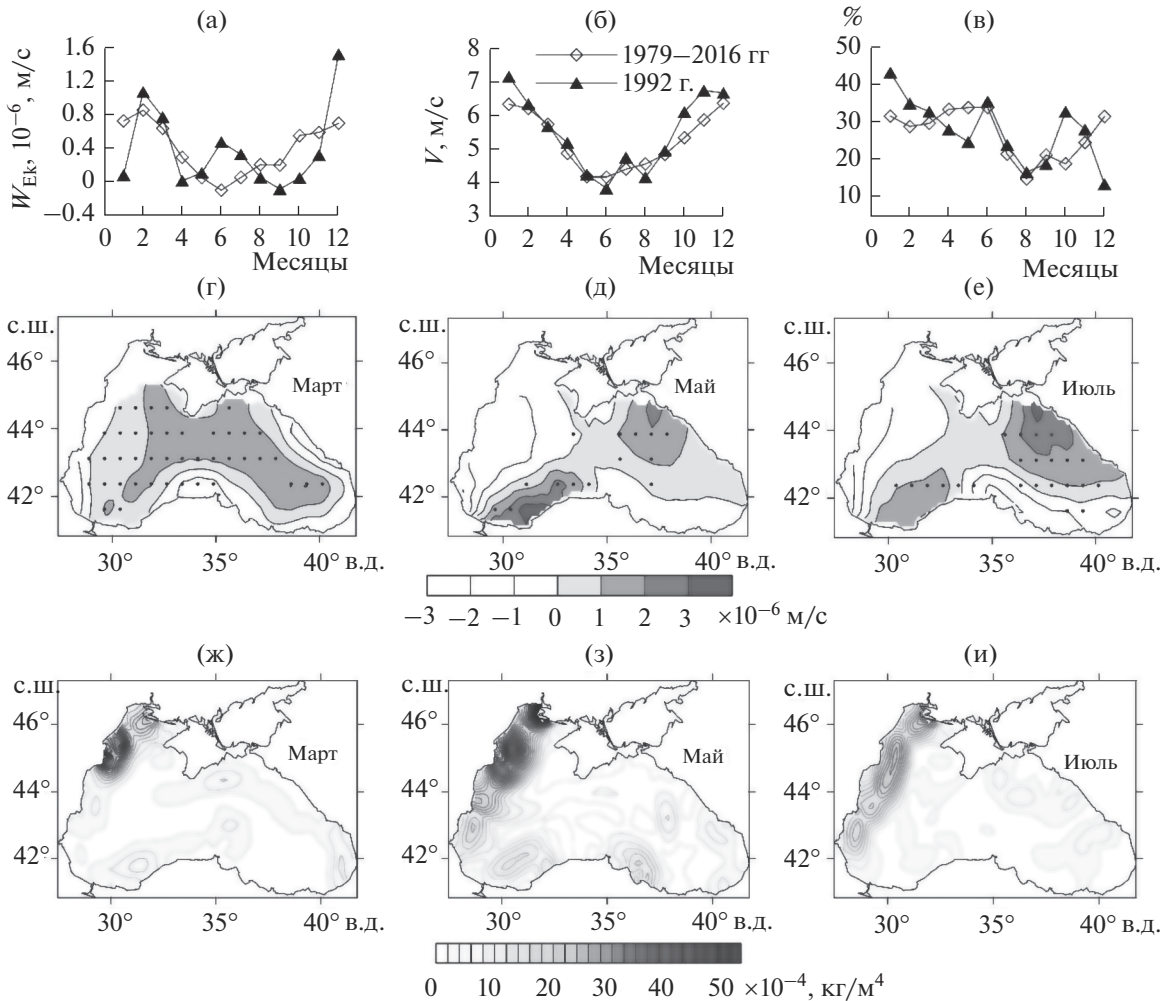


Рис. 3. Сезонный ход экмановской вертикальной скорости (а), м/с, скорости ветра (б), м/с, повторяемости западных и юго-западных ветров, %, у Южного берега Крыма (в); пространственное распределение экмановской вертикальной скорости в марте, мае и июле 1992 г. (г, д, е) соответственно (по данным реанализа ERA-Interim 1979–2016 гг.). Точками на рисунках (г, д, е) обозначены районы, где вертикальная скорость превышала 10^{-5} м/с; Средние горизонтальные градиенты плотности в марте и мае, вычисленные по данным 1980–1992 гг. [3] (ж, з), и в июле по данным 1992 г. [3] (и).

быть связаны с прибрежным апвеллингом, способствующим увеличению концентрации биогенов в прибрежных водах. Высокие концентрации нитритов в мае в районе Северо-западного шельфа связаны, вероятно, с сезонным стоком рек.

Большие горизонтальные градиенты плотности в районах стока рек могут служить барьером для распространения биогенных элементов, поэтому во фронтальных зонах может содержаться повышенная их концентрация [29]. Поступление биогенных элементов через плотностные фронты происходит в основном за счет переноса мезомасштабными вихрями [13]. Плотностной фронт во все месяцы находится вдоль западного побережья моря с наибольшими значениями горизонтального градиента в районах стока рек Дунай и Днепр (рис. 3ж, 3з). В районе фронта в марте на-

блюдались повышенные концентрации нитритов и фосфора, в мае – нитритов (рис. 2).

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенный анализ пространственно-временной изменчивости компонент экосистемы на примере комплексных съемок в 1992 г. показывает влияние всех факторов – гидрометеорологических, гидрохимических и биотических – на продуктивность экосистемы.

Распределение и величина биомассы фитопланктона, по данным всех съемок, хорошо соотносятся с изменчивостью биогенных элементов и величиной экмановской вертикальной скорости, возникающей в результате завихренности в поле ветра (рис. 1а–1в; 2; 3г–3е). Максимальная биомасса фитопланктона и кон-

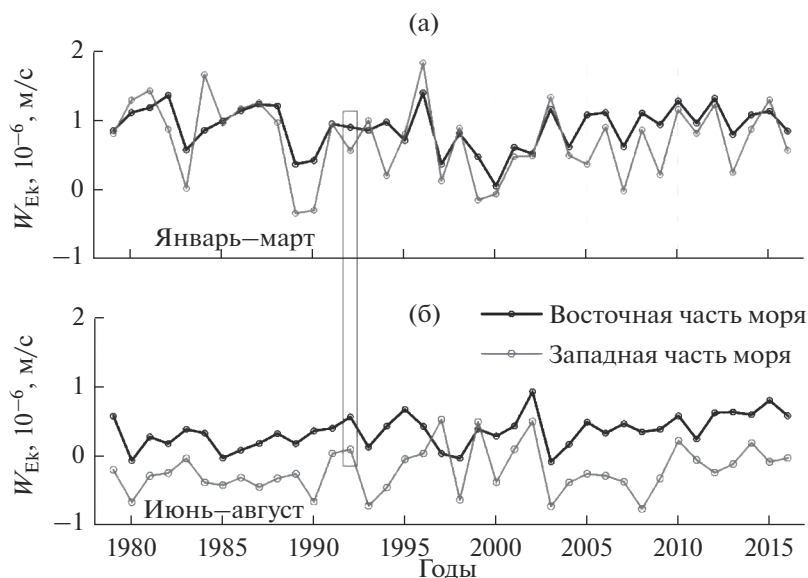


Рис. 4. Экмановская вертикальная скорость, м/с, осредненная для восточной и западной глубоководных частей моря в январе–марте (а) и июне–августе (б).

центрации биогенных элементов в фотическом слое отмечается в марте, когда экмановский подъем вод максимальный. В июле в восточной части моря наблюдались высокие концентрации фитопланктона и фосфора (рис. 1в, 2и). Согласно [1, 20], в июле 1992 г. в восточной части моря наблюдалось цветение кокколитофорид, биомасса которых лимитируется содержанием фосфора [14, 20]. Здесь же за счет циклонической завихренности ветра отмечены высокие значения вертикальной экмановской скорости, не уступающие значениям в марте (рис. 3г, 3е).

Согласно [18, 22], биомасса фитопланктона летом 1992 г. — наибольшая за современный период наблюдений с 1960-х гг. По хронологии, введенной в [12], 1992 г. относится к холодному периоду 1984–1996 гг., когда преобладали холодные зимы, за счет зимней конвекции и перемешивания увеличивался поток биогенных элементов из глубинных слоев моря и они накапливались их в верхнем слое моря. Этот же год относят к периоду экологического кризиса 1989–1992 гг., последовавшего за периодом интенсивной эвтрофикации 1985–1988 гг. за счет антропогенной нагрузки [18, 22]. С антропогенной эвтрофикацией вод связывают и низкую прозрачность морской воды, которая в 1992 г. была наименьшей за многолетний период наблюдений (с 1923 г.) — средняя прозрачность снизилась с 23 до 6.2 м [20, 25].

Сравнение величины экмановской вертикальной скорости в 1992 г. со значениями в другие годы показывает, что зимой указанного года вертикальная экмановская скорость в восточной части моря была незначительно выше среднего значе-

ния за 1979–2016 гг., а в западной части — ниже среднего значения (рис. 4а). Летом средняя вертикальная скорость в восточной (0.55×10^{-6} м/с) и в западной (0.08×10^{-6} м/с) частях моря значительно превышала среднемноголетние значения (0.33×10^{-6} м/с и -0.21×10^{-6} м/с соответственно) (рис. 4б). Таким образом, летом 1992 г. метеорологические условия сопровождалось более сильным подъемом вод, чем в среднем за 1979–2016 гг., что может быть одной из причин высокой продуктивности в этот год. В июле максимумы биомассы фитопланктона и концентрации биогенных элементов были в термоклине и под ним. Сильная стратификация в термоклине препятствует проникновению биогенных элементов в верхние слои. Потребление фитопланктоном биогенов, поступающих из нижележащих слоев путем перемешивания, возможно, осуществляется за счет его заглубления.

Трофические связи в экосистеме также вносят вклад во временную и пространственную изменчивость компонент экосистемы. По данным съемок, уменьшение биомассы фитопланктона в мае происходило на фоне больших величин биомассы ракообразного эпипланктона, а его увеличение в июле — при уменьшении суммарной биомассы эпи- и батипланктона. Несмотря на особенности 1992 г., изменение биомассы фитопланктона и зоопланктона от марта к июлю хорошо согласуется с современными представлениями об их сезонном ходе [1, 7, 21, 26].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Черноморская пелагическая экосистема находится под воздействием большого числа факторов среды, что требует комплексного учета их влияния. В настоящей работе на примере данных комплексных съемок, выполненных в марте, мае и июле 1992 г., предпринята попытка комплексного подхода к учету факторов среды, влияющих на основные компоненты экосистемы, таких как фитопланктон, ракообразный эпи-, батипланктон и желетелые организмы. Проведено сопоставление гидрометеорологических факторов (экмановской накачки, скорости ветра, апвеллинга, гидрологических фронтов) и распределения концентраций биогенных элементов и биомассы фитопланктона.

Данные съемок показали, что распределения биогенных элементов и биомассы фитопланктона хорошо согласуются с пространственно-временной изменчивостью вертикальной экмановской скорости. Усиление экмановского подъема вод в марте сопровождалось высокой концентрацией биогенных элементов и, как следствие, высокими величинами биомассы фитопланктона. Высокие концентрации биогенных элементов в июле наблюдались в основном в центральной и восточной частях моря, где отмечены высокие значения экмановской вертикальной скорости.

По расчетам на основе данных атмосферного реанализа ERA-Interim, летом в восточной глубоководной части моря, в отличие от западной, преобладает подъем вод, обусловленный неоднородностью поля скорости ветра над морем, что может вносить значимый вклад в увеличение продуктивности в этой части моря. По расчетам на основе гидрологических данных, в западной части моря и на северо-западном шельфе находится плотностной фронт за счет стока рек Дунай и Днепр, в его районе наблюдается высокое содержание биогенных элементов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Брянцева Ю.В.* Оценка обилия фитопланктона в Черном море и его сезонная динамика в 1992 году // Тр. ЮгНИРО. 1996. Т. 42. С. 184–189.
2. *Гандин Л.С.* Объективный анализ метеорологических полей. Л.: Гидрометеоиздат, 1963. 287 с.
3. *Годин Е.А., Белокопытов В.Н., Ингеров А.В. и др.* Свид. о гос. регистрации базы данных № 2019621 008 “Черное море: гидрология – 2018”.
4. *Грузов Л.Н., Люмкис П.В., Нападковский Г.В.* Исследования пространственно-временной структуры планктонных полей северной половины Черного моря в 1992–93 гг. // Исследование экосистемы Черного моря. Одесса: Министерство охраны окружающей природной среды Украины, Укр. науч. центр экологии моря, 1994. Вып. 1. С. 94–127.
5. *Дзицкий В.С., Минкина Н.И., Орлова И.Г. и др.* Комплексная оценка загрязненности вод Черного моря в 90-е годы прошлого столетия // Системы контроля окружающей среды. Средства, модели и мониторинг. Севастополь: Морской гидрофиз. ин-т, 2011. Вып. 15. С. 265–273.
6. *Дорофеев В.Л.* Моделирование декадной изменчивости экосистемы Черного моря // Морской гидрофиз. журн. 2009. № 6. С. 71–81.
7. *Дорофеев В.Л., Сухих Л.И.* Изучение долговременной изменчивости экосистемы черного моря на основе ассимиляции данных дистанционных измерений в численной модели // Вод. ресурсы. 2019. Т. 46. № 1. С. 58–69.
8. *Иванов В.А., Белокопытов В.Н.* Океанография Черного моря. Севастополь, 2011. с. 212.
9. *Иванов В.А., Михайлова Э.Н.* Апвеллинг в Черном море. С.: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. 92 с.
10. *Крашенинникова С.Б., Минкина Н.И., Самышев Э.З. и др.* Влияние комплекса факторов среды на биомассу фитопланктона и зоопланктона в Черном море в весенний период // Экология и строительство. 2019. № 4. С. 14–21.
11. *Кубряков А.А., Микаэлян А.С., Станичный С.В.* Вертикальная эволюция цветений кокколитофорид и ее влияние на растворенную органику в Черном море по данным буев БИО-АРГО // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2019). 2019. С. 214–217.
12. *Микаэлян А.С.* Временная динамика фитопланктона глубоководного бассейна Черного моря. Дис. ... докт. биол. наук. М.: ИО РАН, 2018. 266 с.
13. *Микаэлян А.С., Зацепин А.Г., Кубряков А.А.* Воздействие мезомасштабной вихревой динамики на биопродуктивность морских экосистем (обзор) // Морской гидрофиз. журн. 2020. Т. 36. № 6. С. 646–675. <https://doi.org/10.22449/0233-7584-2020-6-646-675>
14. *Микаэлян А.С., Силкин В.А., Паутова Л.А.* Развитие кокколитофорид в Черном море: межгодовые и многолетние изменения // Океанология. 2011. Т. 51. № 1. С. 45–53.
15. *Совга Е.Е., Кондратьев С.И., Годин Е.А. и др.* Сезонная динамика содержания и локальные источники биогенных элементов в водах прибрежной акватории Гераклеяского полуострова // Морской гидрофиз. журн. 2017. № 1. С. 56–65.
16. *Стельмах Л.В., Куфтаркова Е.А., Бабич И.И.* Сезонная изменчивость скорости роста фитопланктона в прибрежных водах Черного моря (район Севастополя) // Морской экол. журн. 2009. Т. 8. № 1. С. 67–80.
17. *Финенко Г.А., Романова З.А., Аболмасова Г.И., и др.* Трофические взаимоотношения в планктонном сообществе Черного моря на современном этапе // Экология моря. 2006. Т. 71. С. 50–54.
18. *Юнев О.А., Коновалов С.К., Великова В.* Антропогенная эвтрофикация в пелагической зоне Черного моря: долговременные тренды, механизмы, последствия. М.: ГЕОС, 2019. 164 с. <https://doi.org/10.34756/GEOS/2019.16.37827>

19. *Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J. et al.* The ERA-Interim Reanalysis: Configuration and Performance of the Data Assimilation System // Quarterly J. Royal Meteorol. Society. 2011. V. 137. № 656. P. 553–597.
20. *Mankovsky V.I., Vladimirov V.L., Solovev M.V., Besiktepe S.* Optical properties of the Black Sea: results of the CoMSBlack and TU-Black Sea Programs // NATO Sci. Ser. 2 Environ. security. 1998. V. 47. № 2. P. 145–162.
21. *Mikaelyan A.S., Kubryakov A.A., Silkin V. et al.* Regional climate and patterns of phytoplankton annual succession in the open waters of the Black Sea // Deep Sea Res. Pt I. Oceanogr. Res. Papers. 2018. V. 142. P. 44–57.
22. *Mikaelyan A.S., Zatsepin A.G., Chasovnikov V.K.* Long-term changes in nutrient supply of phytoplankton growth in the Black Sea // J. Mar. Sys. 2013. V. 117–118. P. 53–64.
23. *Newhose Y.* Daily euphotic zone primary productivity “Pionner” cruise of the international Indian Ocean expedition // Arch. Oceanogr. Limnol. 1968. V. 16. P. 1–43.
24. *Oguz T., Besiktepe S., Basturk O. et al.* CoMSBlack'92 Physical and Chemical Intercalibration Workshop // Workshop rep. № 98. Erdemli, Turkey: Unesco, 1993.
25. *Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z.* Climatic regulation of the Black Sea hydro-meteorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // J. Mar. Systems. 2006. V. 60. № 3–4. P. 235–254.
26. *Oguz T., Ducklow H.W., Malanotte-Rizzoli P.* Modeling distinct vertical biogeochemical structure of the Black Sea: Dynamical coupling of the oxic, suboxic, and anoxic layers // Global Biogeochem. Cycles. 2000. V. 14. № 4. P. 1331–1352.
27. *Polonskii A.B., Shokurova I.G.* Statistical structure of the large-scale fields of temperature and salinity in the Black Sea // Physical Oceanogr. 2008. V. 18. № 1. P. 38–51.
28. *Purcell J.E., Uye S., Lo W.T.* Anthropogenic causes of jellyfish blooms and their direct consequences for humans: a review // Mar. Ecol. Progress Ser. 2007. V. 350. P. 153–174.
29. *Ragueneau O., Lancelot C., Egorov V. et al.* Biogeochemical transformations of inorganic nutrients in the mixing zone between the Danube River and the north-western Black Sea // Estuarine, Coastal Shelf Sci. 2002. V. 54. № 3. P. 321–336.
30. *Richardson A.J., Bakun A., Hays G.C. et al.* The jellyfish joyride: causes, consequences and management responses to a more gelatinous future // Trends Ecol. Evolution. 2009. V. 24. № 6. P. 312–322.
31. *Tomczak M., Godfrey J.S.* Regional oceanography: an introduction. Delhi: Daya Publ. House, 2003. 401 p.
32. *Yuney O.A., Moncheva S., Carstensen J.* Long-term variability of vertical chlorophyll a and nitrate profiles in the open Black Sea: eutrophication and climate change // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2005. V. 294. P. 95–107.