

УДК 551.463.5

Пространственно-временная изменчивость распределения прозрачности вод в северо-западной части Черного моря

А.С. Кукушкин*

Морской гидрофизический институт РАН
299011, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2

Поступила в редакцию 16.06.2016 г.

На основе данных многолетних (1963–2000 гг.) наблюдений глубины видимости белого диска проанализированы особенности распределения прозрачности вод в северо-западной части Черного моря в годовом цикле и получены статистические оценки сезонных изменений в районах, различающихся по степени влияния на их гидрофизические характеристики речного стока и вод открытой части моря. Внутригодовые изменения прозрачности вод в этих районах хорошо согласуются с внутригодовыми изменениями биомассы фитопланктона и солёности вод. Показано, что на протяжении длительного периода (1950–2013 гг.) межгодовые сезонные изменения прозрачности (по измеренным и восстановленным с помощью модели на основе нейронной сети данным) удовлетворительно согласуются с межгодовыми изменениями гидробиологических параметров. Рассмотрена зависимость изменений этих параметров от региональных гидрометеорологических условий в годы события Эль-Ниньо – Южное колебание и в годы его отсутствия.

Ключевые слова: прозрачность, биомасса фитопланктона, хлорофилл *a*, речной сток, гидрометеорологические условия; transparency, phytoplankton biomass, chlorophyll *a*, river run-off, hydrometeorological conditions.

Введение

Прозрачность воды, зависящая от содержания в ней взвешенных и растворенных веществ, является хорошим индикатором распространения загрязненных береговых стоков в море. Поэтому изучение пространственно-временной изменчивости прозрачности вод в северо-западной части Черного моря (СЗЧМ), в наибольшей степени (по сравнению с другими районами моря) подверженной антропогенному влиянию, приобретает особый интерес.

На основе многолетних (1978–1995 гг.) наблюдений показателя ослабления направленного света (ПОС, ϵ) в работе [1] были изучены особенности распределения прозрачности в поверхностном слое СЗЧМ в годовом цикле и получены статистические оценки сезонных и внутрисезонных изменений ПОС в районах, различающихся по степени влияния на их гидрофизические характеристики речного стока и вод открытой части моря (рис. 1). Также было отмечено их хорошее согласие с вариациями содержания компонентов взвешенного органического вещества и показано, что сезонные изменения ПОС и связанные с ними изменения концентрации хлорофилла *a* зависят от изменчивости объема речного стока, масштабов его распространения на северо-западном шельфе и региональных гидрометеорологических условий, которые, в свою очередь, зависят от крупномасштабных атмосферных процессов

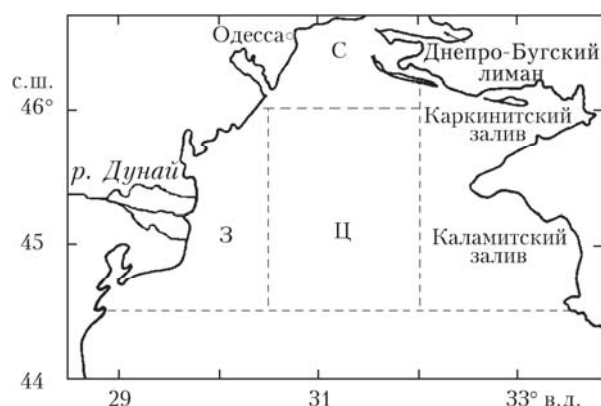


Рис. 1. Районы северо-западной части Черного моря: западный (З), северный (С) и центральный (Ц)

в системе «океан–атмосфера». В [1–4] было показано влияние этих процессов на межгодовые вариации распределения прозрачности в СЗЧМ в зимне-весенний период. При этом немногочисленные данные измерений ПОС в районе влияния стока Дуная в 1978–1995 гг. и неравномерное их распределение по годам и сезонам ограничивали возможности анализа его сезонных межгодовых изменений. Относительно регулярные наблюдения глубины видимости белого диска (Z_0) в 1963–2000 гг. также имели пропуски данных, затрудняющие анализ ее долговременной изменчивости.

Настоящая работа посвящена обобщению и анализу результатов многолетних исследований распределения прозрачности (глубины видимости белого

* Александр Сергеевич Кукушкин (kukushkinas@mail.ru).

Параметры уравнения регрессии ($\varepsilon = a/Z_6 + b$), связывающие показатель ослабления направленного света (ε , m^{-1}) и глубину видимости белого диска (Z_6 , м) в северо-западной части Черного моря

| Параметр | Весна | Лето | Осень |
|-------------------------|--------|-------|-------|
| a | 2,67 | 3,60 | 4,30 |
| b | 0,15 | -0,07 | -0,07 |
| r | 0,87 | 0,83 | 0,92 |
| σ | 0,04 | 0,15 | 0,11 |
| N | 34 | 86 | 78 |
| Пределы изменения Z_6 | 2,5–14 | 3–18 | 3–11 |

Примечание. r – коэффициент детерминации (корреляции); σ – стандартная ошибка регрессии (m^{-1}); N – количество пар ε и Z_6 ; a и b – коэффициенты уравнения регрессии.

диска) вод СЗЧМ, ее сезонной, внутригодовой и межгодовой изменчивости и оценке влияния основных природных факторов на эту изменчивость.

Материалы и методы

В работе использовались следующие сведения из банка данных Морского гидрофизического института РАН:

- значения глубины видимости белого диска (4730 измерений, в том числе более 4000 измерений в Придунайском районе, выполненные в 1963–2000 гг.), ПОС на длине волны 422 нм (623 станции и 3800 миль буксировки прозрачномера, проведенные в 1978–1995 гг.), солености и температуры воды в поверхностном слое СЗЧМ (около 55 тыс. измерений в 1947–2010 гг.);

- среднемесячные данные об объеме расхода стока Дуная с 1950 по 2012 г.;

- среднемесячные данные об атмосферных осадках с 1950 по 2006 г.;

- среднемесячные значения индексов дальнедействующих атмосферных сигналов в системе «океан–атмосфера» за период 1950–2013 гг.: североатлантическое (САК) [5] и южное (ЮК) [6] колебания, являющиеся основными климатическими сигналами межгодового масштаба. Используемые в качестве меры их изменчивости безразмерные индексы САК и ЮК представляют собой нормированную разность приземного атмосферного давления между Азорским максимумом и Исландским минимумом (между о. Таити и портом Дарвин соответственно);

- многолетние данные по биомассе фитопланктона за период 1948–2001 гг. [7, 8].

В связи с использованием значений ПОС и Z_6 для описания прозрачности воды появилась необходимость их сравнения. Было получено линейное уравнение регрессии $\varepsilon = 3,8/Z_6 - 0,05$ [9], пригодное, по мнению авторов, для расчетов ПОС на длине волны 422 нм в годовом цикле во всех районах моря. В то же время известно, что на связь между ε и Z_6 могут влиять различия основных факторов, формирующих поле прозрачности в глубоководных и шельфовых районах моря, и их сезонная изменчивость. Результаты проведенного нами регрессионного анализа между одновременно измеренными значениями ε и Z_6 в СЗЧМ в различные сезоны года представлены в табл. 1. Расхождение между рассчитанными по сезонным уравнениям и измеренными во все сезоны (кроме зимнего) и временные периоды значениями ПОС находилось в пределах 10–30%, а для рассчитанных по всепогодному уравнению по данным 1980-х гг. – в среднем в пределах 20–50%.

Для восстановления пропущенных в различные годы и сезоны данных измерений Z_6 и определений среднегодовых значений биомассы фитопланктона, необходимых для изучения их межгодовых вариаций, была применена модель нейронной сети. Модель представляла собой однослойный перцептрон с учителем, в качестве которого использовалась часть ряда

данных наблюдений, а ее обучение осуществлялось методом обратного распространения ошибки [10, 11]. В качестве входных сигналов модели выступали индексы глобальных климатических колебаний в системе «океан–атмосфера», которые определяли изменения гидрометеорологических, гидрологических и гидробиологических условий в Придунайском районе СЗЧМ. Для восстановления отсутствующих данных о прозрачности в период 1950–2010 гг. были использованы наиболее статистически обеспеченные наблюдения Z_6 в зимний сезон, а также в мае и августе. Сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений показало, что коэффициент корреляции между восстановленными и измеренными среднемесячными значениями Z_6 и среднегодовыми значениями биомассы фитопланктона в среднем равен 0,9.

Придунайский (западный) район СЗЧМ был выбран основным местом исследований многолетних межгодовых сезонных изменений прозрачности в связи с его высокой обеспеченностью данными по прозрачности, гидрологическим и гидробиологическим характеристикам в сравнении с другими районами СЗЧМ. Для анализа межгодовых изменений указанных выше показателей использовались сведения о стоке Дуная, который оказывает значительное влияние на их изменения в западном районе. Основная трансформация вод других крупных рек региона (Днепр, Южный Буг и Днестр) происходит в соответствующих лиманах (Днепро-Бугском и Днестровском). В основном их влияние распространяется на прилежащие к лиманам участки шельфа.

Результаты и обсуждение

Пространственное распределение. Распределение сезонных значений Z_6 , измеренных и рассчитанных с помощью регрессионных уравнений (см. табл. 1) по данным наблюдений ПОС [1], показаны на рис. 2. На этом рисунке также нанесены изохалины 16 и 17‰, положение которых принято считать границей распространения трансформированных речных вод [12].

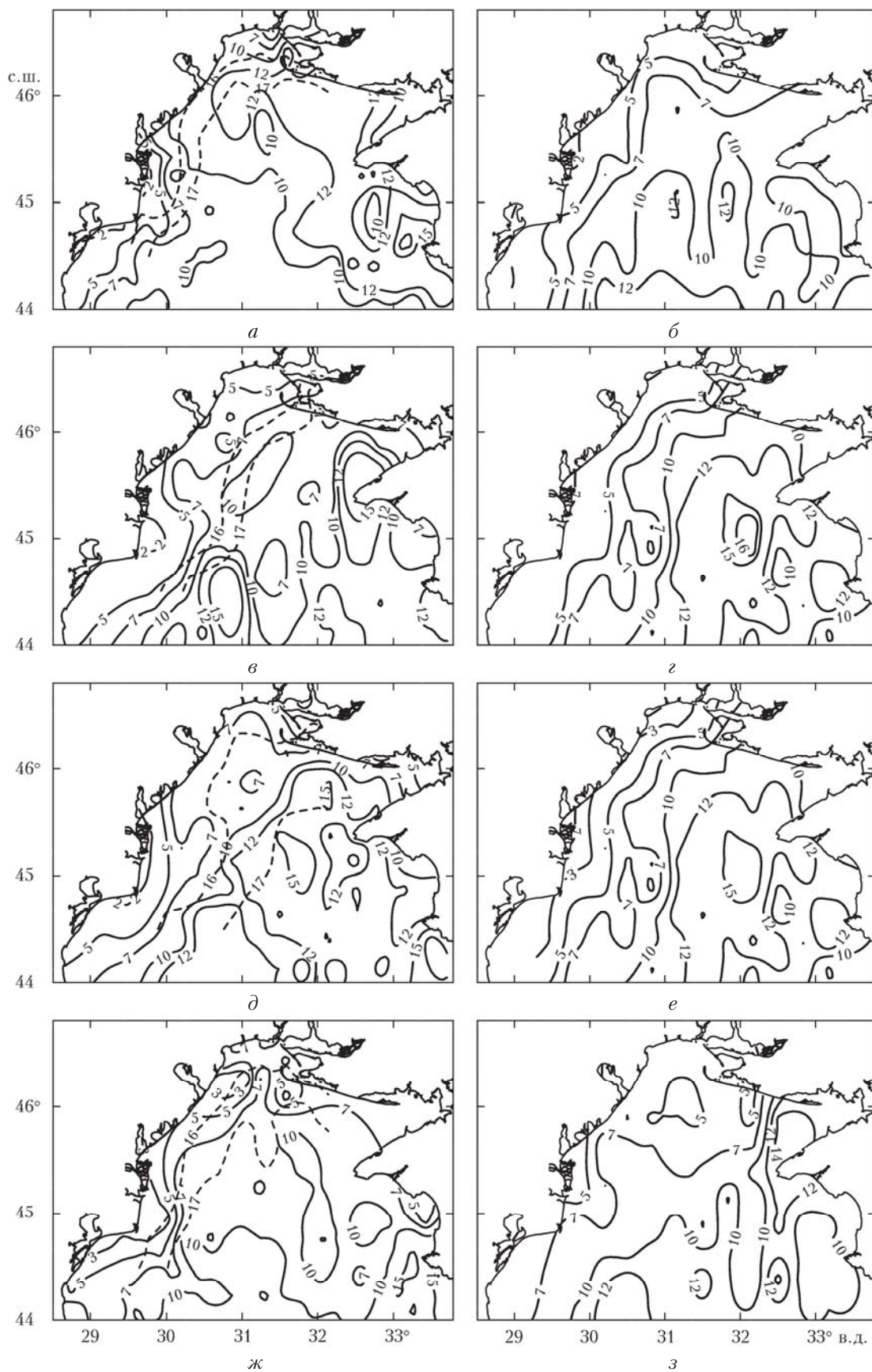


Рис. 2. Распределение измеренных (а, в, д, ж) и рассчитанных (б, г, е, з) значений Z_6 в зимний (а, б), весенний (в, г), летний (д, е) и осенний (ж, з) периоды

В зимний период (январь—март) пониженная прозрачность (2–7 м) была зарегистрирована в предустьевых участках Дуная (западный район) и Днепро-Бугтского лимана (северный район) в зоне трансформации речных вод (рис. 2, а). На большей части северо-западного шельфа Z_6 была равна 10–12 м (табл. 2). Распределения прозрачности, построенные по измеренным и рассчитанным значениям Z_6 , в целом хорошо согласуются. Более однородное ее распределение (рис. 2, б) в западном и северном прибрежных районах объясняется тем, что оно было построено по результатам измерения ПОС с высоким пространственным разрешением, полученным с помощью буксируемого прозрачнотера [1].

Таблица 2

Сезонные изменения глубины видимости белого диска и измеренных ($\epsilon_{\text{изм}}$, по [1]) и рассчитанных ($\epsilon_{\text{расч}}$) значений показателя ослабления направленного света в различных районах СЗЧМ

| Сезон | Параметр | Район | | |
|-------|--|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | западный | северный | центральный |
| Зима | Z_6 , м | $4,8 \pm 1,6$ | $6,2 \pm 1,8$ | $11,2 \pm 2,4$ |
| | $\epsilon_{\text{изм}}$, м^{-1} | $0,6 \pm 0,3$ | $0,86 \pm 0,44$ | $0,38 \pm 0,11$ |
| | $\epsilon_{\text{расч}}$, м^{-1} | 0,74 | 0,66 | 0,41 |
| Весна | Z_6 , м | $4,8 \pm 1,8$ | $4,7 \pm 2,5$ | $10,4 \pm 4,4$ |
| | $\epsilon_{\text{изм}}$, м^{-1} | $0,81 \pm 0,37$ | $0,74 \pm 0,35$ | $0,36 \pm 0,12$ |
| | $\epsilon_{\text{расч}}$, м^{-1} | 0,71 | 0,72 | 0,40 |
| Лето | Z_6 , м | $5,7 \pm 2,4$ | $5,7 \pm 4,0$ | $9,4 \pm 4,1$ |
| | $\epsilon_{\text{изм}}$, м^{-1} | $0,70 \pm 0,38$ | $0,86 \pm 0,27$ | $0,47 \pm 0,31$ |
| | $\epsilon_{\text{расч}}$, м^{-1} | 0,70 | 0,70 | 0,45 |
| Осень | Z_6 , м | $5,9 \pm 1,8$ | $6,2 \pm 3,0$ | $10,0 \pm 4,2$ |
| | $\epsilon_{\text{изм}}$, м^{-1} | $0,37 \pm 0,12$ | $0,48 \pm 0,17$ | $0,34 \pm 0,18$ |
| | $\epsilon_{\text{расч}}$, м^{-1} | 0,65 | 0,62 | 0,36 |

В весенний период (апрель, май) размеры зоны влияния речного стока увеличивались. Воды пониженной прозрачности находились вдоль всего западного побережья на большем удалении от берега, чем в зимний период (рис. 2, в, з). В северном и центральном районах прозрачность несколько понизилась (см. табл. 2), что в основном объяснялось значительным увеличением весной содержания взвешенного органического вещества и хлорофилла a [13].

В летний период (июнь—сентябрь) трансформированные речные воды распространялись на северо-западном шельфе из Придунайского района в восточном направлении, а из северного района — в южном и юго-восточном. Масштаб их распространения на шельфе зависел от объемов речного стока и ветровых условий, обуславливающих характер циркуляции вод в СЗЧМ (циклонический или антициклонический). Прозрачность вод в западном и северном районах несколько повысилась (рис. 2, д, е) по сравнению с ее значениями в этих районах в весенний период, что, видимо, было связано со снижением содержания компонентов взвешенного вещества (примерно в 2–2,5 раза [13]). Прозрачность вод в центральном районе в среднем несколько уменьшилась, но на восточном его участке отмечено ее увеличение.

В осенний период (октябрь—декабрь) из-за уменьшения речного стока граница зоны трансфор-

мации речных вод переместились в западном направлении. Прозрачность вод во всех районах СЗЧМ незначительно повысилась (рис. 2, ж, з). Содержание компонентов взвешенного органического вещества уменьшилось в 1,5–2 раза [13], что, скорее всего, и явилось причиной увеличения прозрачности.

Внутригодовые изменения среднемесячных значений прозрачности, биомассы планктона и солёности в западном и центральном районах СЗЧМ показаны на рис. 3. В западном районе пониженная прозрачность была отмечена в зимне-весенний период (рис. 3, а, в). Минимальные ее значения по данным Z_6 и ПОС были зарегистрированы в мае — первой половине июня. Уменьшение прозрачности в зимне-весенний период наблюдалось при одновременном понижении солёности воды в зоне трансформации речных вод (рис. 3, г) во время весеннего половодья и увеличении биомассы фитопланктона (рис. 3, б). В летне-осенний период (июнь—октябрь) прозрачность воды по данным Z_6 и ПОС увеличилась. В этот период в результате смешения речных и морских вод солёность трансформированных речных вод повышалась, а биомасса фитопланктона постепенно уменьшалась, что было связано с развитием летом мелко-клеточных (пирофитовых) видов фитопланктона. Относительно высокая биомасса фитопланктона в сентябре была получена [7] в годы, когда наблюдения прозрачности не проводились.

В центральном районе внутригодовые изменения описываются U-образной кривой, что хорошо согласуется с одновершинными кривыми распределений ПОС и биомассы фитопланктона. Пониженные значения Z_6 (рис. 3, а) и повышенные значения ПОС (рис. 3, в) в летний период (август, сентябрь) соответствовали повышенным значениям биомассы фитопланктона (рис. 3, б). Благоприятные условия для его развития были связаны с поступлением в центральный район трансформированных речных вод (см. рис. 2, д и 3, з), обогащенных биогенными элементами. В осенний период прозрачность в районе повысилась из-за уменьшения биомассы фитопланктона.

Межгодовая изменчивость. Увеличение массива данных по Z_6 и биомассе фитопланктона, проведенное с использованием модели на основе нейронной сети [11], позволяет более детально проанализировать межгодовую изменчивость прозрачности в западном районе СЗЧМ в период с 1950 по 2010 г. под влиянием различных природных факторов. Для анализа использовались величины аномалий показателей, определяемые как разница между средним сезонным (годовым) и средним многолетним значениями, нормированная на многолетнее среднеквадратическое отклонение.

Для временного хода аномалий среднегодовых значений прозрачности (рис. 4) были характерны изменения различных масштабов. В 1950–1980-е гг. кроме межгодовых изменений просматриваются квазипериодические колебания Z_6 с примерно десятилетним периодом. В этот временной интервал с близким периодом, но, как правило, противофазно,

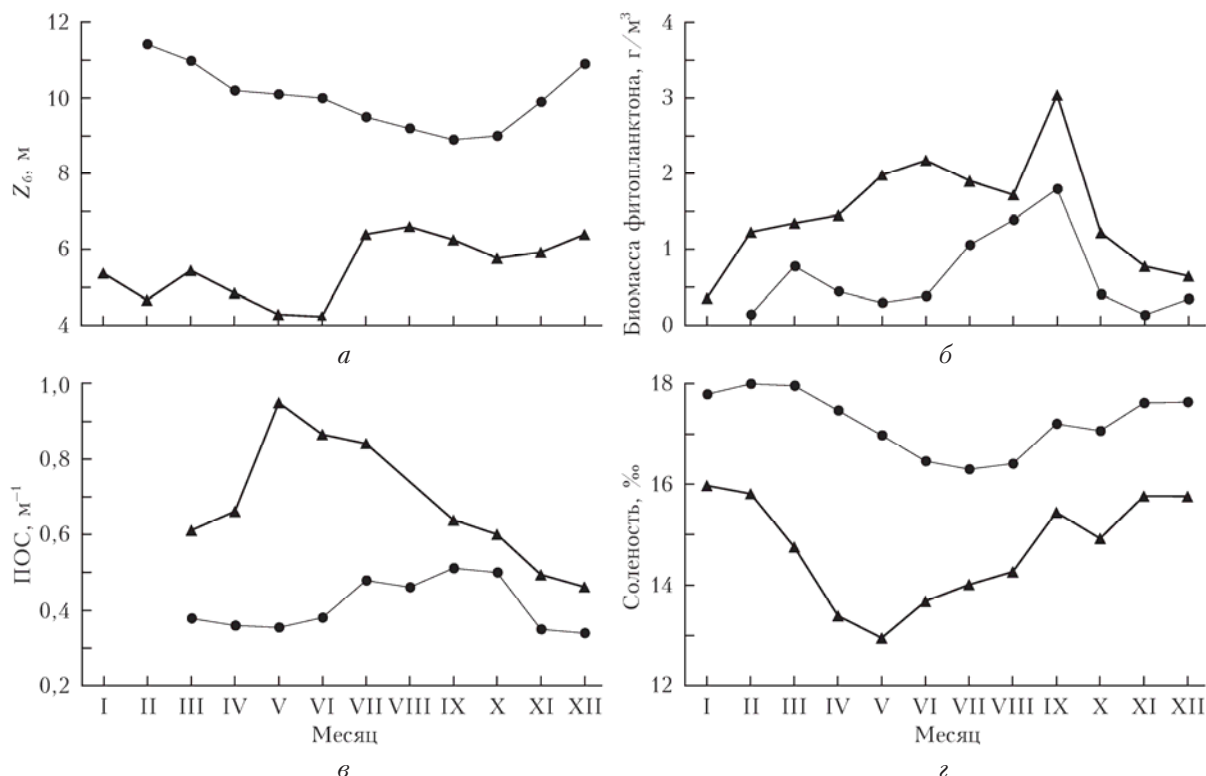


Рис. 3. Внутригодовые изменения среднемесячных значений глубины видимости белого диска (*a*), биомассы фитопланктона в зоне фотосинтеза (*б*), показателя ослабления направленного света (*в*) и солёности (*z*) в центральном (●) и западном (▲) районах СЗЧМ

изменялись аномалии среднегодовых значений биомассы фитопланктона и среднегодового стока Дуная (см. рис. 4). Повышенной (пониженной) прозрачности соответствовали повышенные (пониженные) значения объема стока Дуная и биомассы фитопланктона. Заметное снижение прозрачности, зарегистрированное в 1989–1990 гг., совпало с резким уменьшением стока Дуная. В первой половине 1990-х гг. прозрачность была наиболее низкой за весь период наблюдений; во второй половине она несколько повысилась, но все же оставалась низкой. Сток Дуная к 1995 г. увеличился до среднегодовой величины и еще более вырос в следующие годы. Биомасса фитопланктона же в 1990-е гг. изменялась с периодичностью 4–5 лет относительно среднегодового ее значения и не всегда совпадала по фазе с изменениями объема стока Дуная и прозрачности. Учитывая многообразие природных факторов, влияющих на формирование стока Дуная, условия развития фитопланктона, изменчивость распределения прозрачности и их взаимосвязь, вряд ли следует ожидать полного совпадения (или несовпадения) фаз изменения этих показателей.

Временные вариации среднегодовых значений аномалий индексов САК и ЮК, характеризующих меру изменчивости основных глобальных климатических сигналов межгодового масштаба, которые формируют погодно-климатические условия в Европейском регионе [3, 4], отличаются от характера изменчивости вышеописанных показателей. Отчасти это связано с тем, что влияние САК и ЮК на формирование региональных гидрометеорологических

условий максимально выражено в зимне-весенний период. В то же время некоторые зарегистрированные экстремальные значения анализируемых показателей могут быть объяснены с помощью индексов САК и ЮК. Пониженные значения Z_6 в 1960, 1978 и 1979 гг., видимо, объясняются умеренно-теплыми зимами и относительно высоким стоком Дуная, способствующими интенсивному развитию фитопланктона. Кроме того, в 1978–1979 гг. были зарегистрированы события Эль-Ниньо и Южное колебание (ЭНЮК), сопровождаемые соответствующими изменениями индексов САК и ЮК. Низкая прозрачность в 1966 г. наблюдалась после аномально теплой зимы при высоком объеме стока Дуная и во время события ЭНЮК 1965–1966 гг. Низкая прозрачность в 1990-е гг. была зарегистрирована в период долгоживущего события ЭНЮК, когда зимы в 1992 и 1993 гг. были холодными, а сток Дуная низким.

Проведенный анализ не учитывал сезонные изменения рассматриваемых показателей, которые, например, в зимне-весенний период в значительной степени зависят от региональных гидрометеорологических условий, изменчивость которых связана с изменчивостью глобальных атмосферных процессов. Степень их влияния определяет вариации объема речного стока, температуру воздуха и воды, интенсивность циклонов, условия развития фитопланктона и содержание взвешенного органического вещества, которые, в свою очередь, влияют на изменчивость прозрачности воды. Также значимые межгодовые изменения среднегодовых значений анализируемых

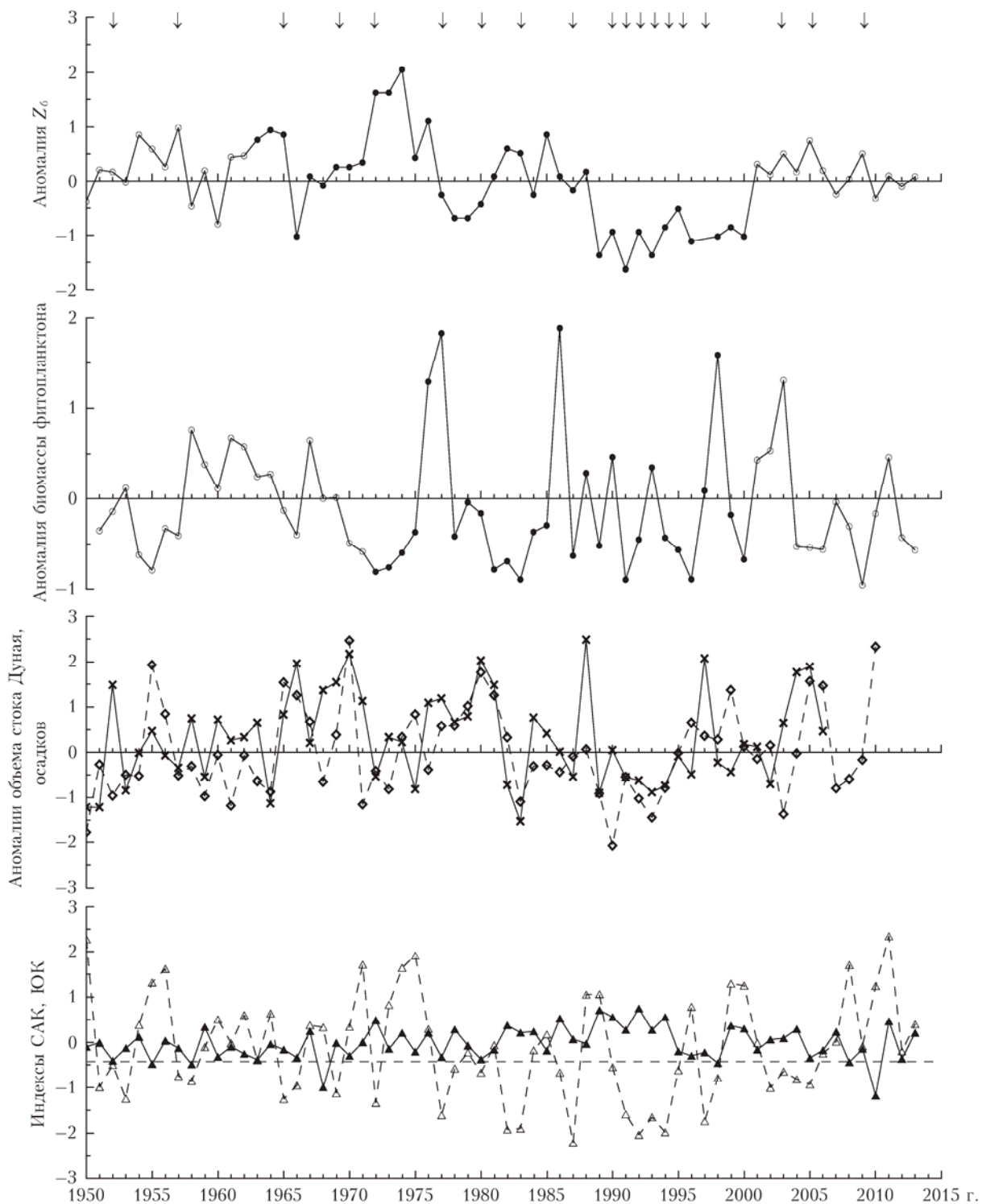


Рис. 4. Межгодовые изменения аномалий среднегодовых значений глубины видимости белого диска и биомассы фитопланктона в зоне фотосинтеза, измеренных (●) и восстановленных (○) в западном районе, объема стока р. Дунай (◇), атмосферных осадков (×) и индексов САК (▲) и ЮК (△). Стрелки обозначают годы событий ЭНЮК

показателей не всегда позволяют наглядно оценить их взаимное влияние. Поэтому было проведено сглаживание сезонных значений аномалий прозрачности, стока Дуная и атмосферных индексов посредством их осреднения по 5-летним интервалам в зимне-весенний период.

До середины 1980-х гг. изменения аномалий прозрачности и объема стока Дуная находились в противофазе (рис. 5). Понижение прозрачности и одновременное увеличение объема стока Дуная в 1950–1960-е гг. наблюдались на фоне уменьшения индекса САК. Для этого периода было характерно

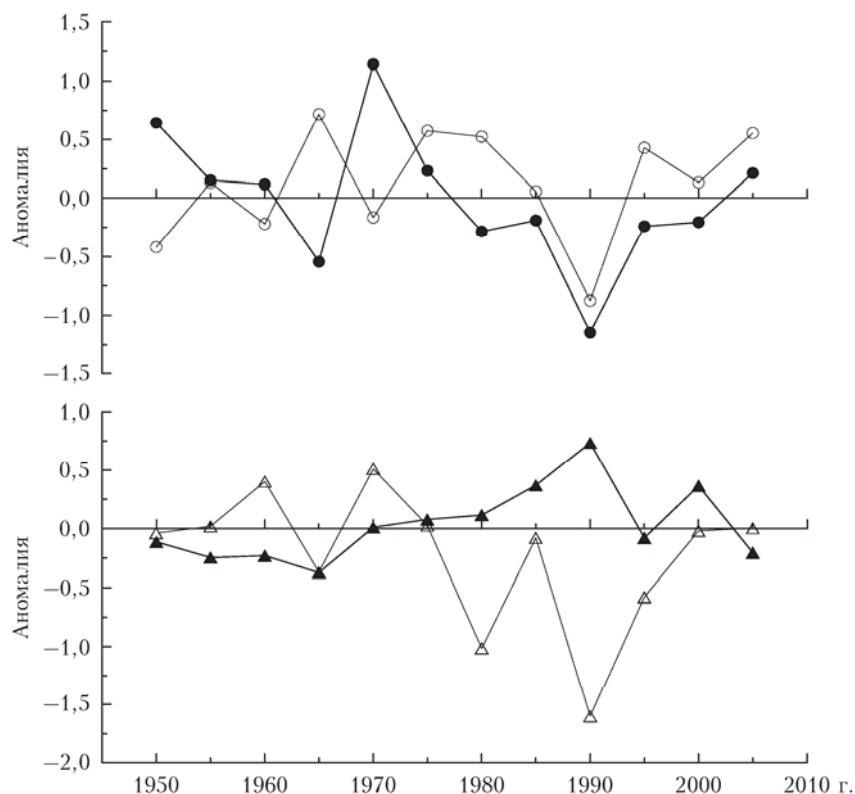


Рис. 5. Изменение средних за 5-летние интервалы значений аномалий глубины видимости белого диска (●) в западном (придунайском) районе, объема стока р. Дунай (○), индексов САК (▲) и ЮК (△) в зимне-весенний период

увеличение частоты зимних циклонов и атмосферных осадков в Черноморском регионе, максимальное количество которых было отмечено во второй половине 1960-х гг. [14]. Наблюдаемая в эти годы активизация атмосферных процессов подтверждалась отрицательными значениями индексов САК и ЮК. Отметим также рост температуры воздуха (аномально теплая зима 1966 г.) [15]. В период с начала 1970-х до середины 1990-х гг. значение Z_6 уменьшалось. Объем стока Дуная до середины 1980-х гг. увеличивался и был выше среднего значения для зимне-весеннего периода, а в последующие годы уменьшался. В 1990–1991 гг. сток был минимальным. Индекс САК в этот временной интервал был положительным и постоянно увеличивался, а индекс ЮК, оставаясь отрицательным, уменьшался. В первой половине 1990-х гг. во время долгоживущего события ЭНЮК 1991–1995 гг. они достигли своих экстремальных значений. Частота зимних циклонов заметно снизилась в начале 1970-х гг. и к середине 1990-х гг. была минимальной. Низкими в эти годы в зимне-весенний период были атмосферные осадки, температура воздуха и воды [15]. Описанные условия не способствовали активному развитию фитопланктона, но при этом прозрачность вод в 1990-е гг. была очень низкой, что требует дополнительных исследований.

Проведенный анализ межгодовой изменчивости различных параметров в зимне-весенний сезоны, осредненных по 5-летним периодам, позволил полу-

чить представление о характере такой изменчивости в течение длительного периода наблюдений (1950–2013 гг.) и оценить влияние различных природных факторов на формирование поля прозрачности. Одновременно с этим в отдельные временные интервалы наблюдались некоторые несоответствия в характере изменения показателей. Так, при относительно низком объеме стока Дуная была отмечена низкая прозрачность и наоборот. Поэтому было желательно более детально рассмотреть межгодовые сезонные изменения этих показателей и оценить влияние на их изменения региональных гидрометеорологических условий. Проведенный анализ таких изменений в отдельные временные интервалы показал следующее.

Визуальное сравнение временного хода аномалий прозрачности и объема стока Дуная в зимний и весенний периоды (рис. 6) показало, что в основном характер их изменений в эти сезоны совпадал. Некоторые различия в абсолютных величинах аномалий вполне закономерны. В то же время в отдельные временные интервалы (1952–1955, 1976–1980, 1987–1989, 1995–1997, 2002–2004 гг.) в зимний и весенний сезоны наблюдались противофазные изменения аномалий прозрачности.

Зимой 1952 г. во время события ЭНЮК при пониженном стоке Дуная прозрачность была повышена (см. рис. 6). Весной атмосферные индексы находились в пределах нормы и после умеренно-теплой зимы [15] сток Дуная увеличился до среднего значения,

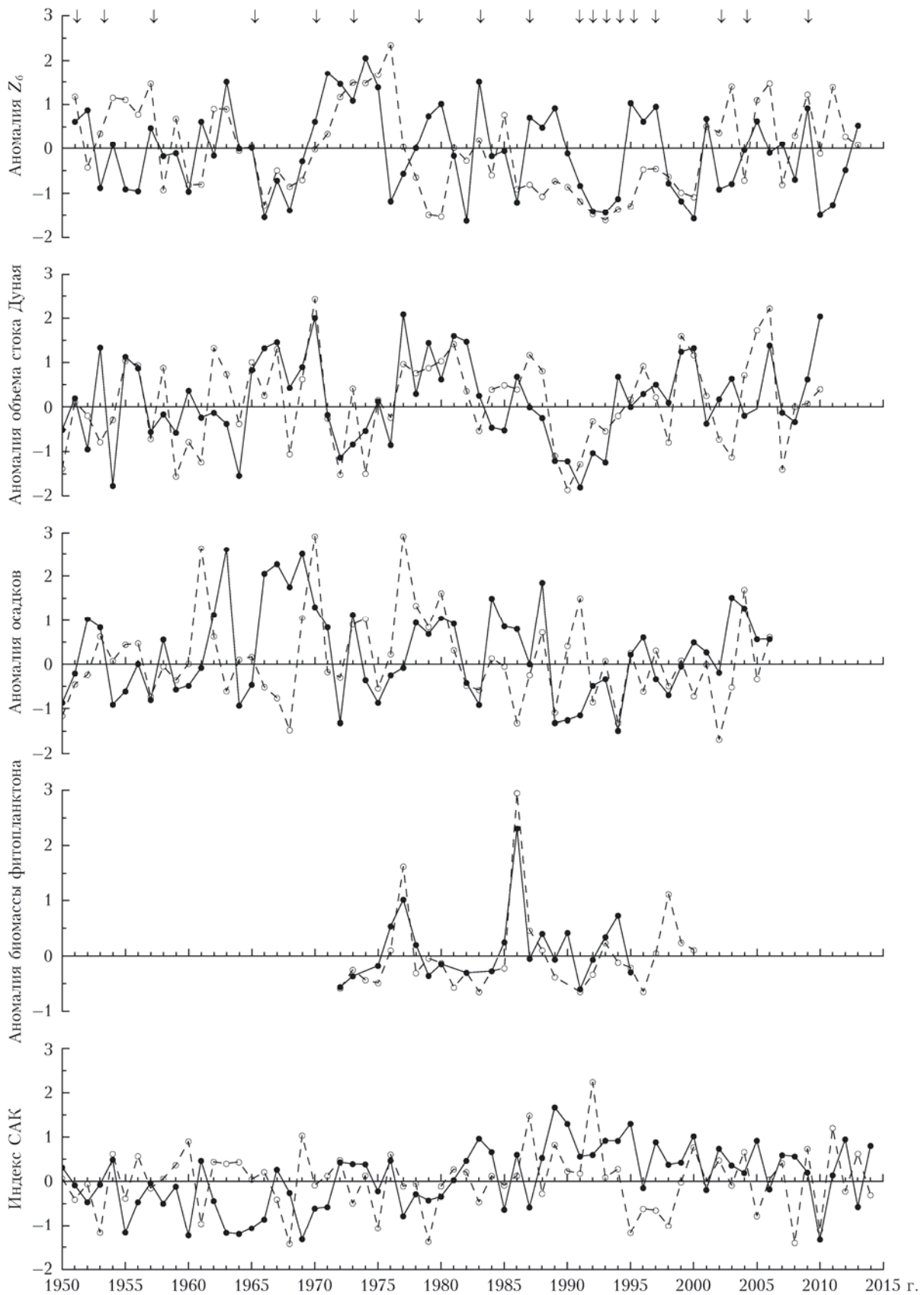


Рис. 6. Межгодовые изменения средних значений аномалий глубины видимости белого диска в западном районе, объема стока р. Дунай, атмосферных осадков, биомассы фитопланктона и индекса САК в зимний (●) и весенний (○) периоды. Стрелки обозначают годы событий ЭНЮК

а прозрачность понизилась. Во время теплой зимы 1953 г. величина индекса САК была в пределах нормы, а ЮК — отрицательной (–1,0), что способствовало увеличению осадков и объема стока Дуная и понижению прозрачности. Весной значения индексов были отрицательными, но после теплой зимы сток Дуная уменьшился, а прозрачность повысилась. В 1954 г. во время аномально холодной зимы сток Дуная был низким, а прозрачность близка к среднему значению в зимний период. Весной относительно низкая температура воздуха и воды, положительные значения индексов САК и ЮК, незначительные осадки и невысокий сток Дуная не способствовали интенсивному развитию фитопланктона. В результате прозрачность весной 1954 г. повысилась. В 1955 г. условия изменились. Зима была аномально теплой, величина индекса САК отрицательной, а индекса ЮК — несколько выше нормы, что сказалось на высоком стоке Дуная. Однако в зимний период прозрачность была низкой, а весной — высокой, что может быть объяснено условиями весеннего развития фитопланктона после теплой зимы 1955 г.

Особенности межгодовых изменений прозрачности в зимне-весенние сезоны в период 1976–1980 гг. также связаны с изменениями климатических условий, влияющих на интенсивность развития фитопланктона и содержание взвешенного вещества. Пониженные значения прозрачности и объема стока Дуная осенью 1975 г. во время холодной зимы в 1976 г. еще несколько уменьшились. В то же время весной этого же года, когда сток Дуная и биомасса фитопланктона были близки к их средним значениям, прозрачность заметно повысилась, что, возможно, было связано с низкой температурой воды. Во время умеренно теплых зим 1977–1980 гг. осадки и сток Дуная были выше средних значений, а температура воды — ниже климатической. При этом концентрации хлорофилла *a*, взвешенного органического углерода, являющегося основным компонентом взвешенного органического вещества [1, 13], и значение биомассы фитопланктона зимой 1978–1980 гг. уменьшались, что, по-видимому, явилось причиной увеличения прозрачности. Весной в указанные годы прозрачность была низкой, что хорошо согласовывалось с относительно высоким стоком Дуная и повышенной концентрацией хлорофилла *a*. Тогда же биомасса фитопланктона была близка к средней величине в весенний сезон. Кроме этого, наблюдалось соответствие повышенной прозрачности зимой 1987–1989 гг. и пониженной — весной с относительно низким и относительно высоким стоком Дуная соответственно. В этот период было отмечено удовлетворительное согласие между прозрачностью и биомассой фитопланктона.

В летне-осенний сезоны в течение всего анализируемого периода наблюдалось приемлемое соответствие межгодовых изменений прозрачности, стока Дуная, биомассы фитопланктона (рис. 7) и содержания взвешенного органического вещества.

Сравнение изменений межгодовых аномалий Z_6 и стока Дуная в различные сезоны (см. рис. 6, 7) показало наличие нескольких характерных ситуаций

подобных изменений. Наиболее часто наблюдались случаи повышенной (положительная аномалия Z_6) прозрачности при пониженном стоке Дуная и пониженной прозрачности как при повышенном, так и при пониженном его стоке.

Повышенная прозрачность при пониженном стоке Дуная в зимне-весенний период отмечалась как в годы с событием ЭНЮК (1957, 1973, 1983, 1987, 1995, 2002, 2003, 2005), так и в годы его отсутствия (1961, 1963, 1964, 1972, 1974–1976, 1988–1990). В эти годы зимние температуры воздуха [15] и воды в основном были ниже климатических. Только в 1961, 1983, 2002 и 2005 гг. отмечались относительно теплые зимы. В весенний период температура воды в годы с событием ЭНЮК была, как правило, ниже климатической, а в годы его отсутствия — выше. Измеренные в 1980–1990 гг. в зимне-весенний период концентрации хлорофилла *a* (по судовым и спутниковым наблюдениям) и компоненты взвешенного органического вещества не превышали средних значений для этого периода [1, 13]. Полученные в 2000-е гг. данные спутниковых (сканер цвета SeaWiFS) наблюдений биооптических параметров (концентрация хлорофилла *a*, показатели поглощения и рассеяния света) в основном были ниже средних сезонных значений [16], что согласовывалось с повышенной прозрачностью воды. Отметим также невысокие значения биомассы фитопланктона, рассчитанные по содержащимся в [7] данным. В летне-осенний период повышенная прозрачность при пониженном стоке Дуная, так же как и в зимне-весенний период, отмечалась в годы с событием ЭНЮК (1953, 1970, 1972, 1973, 1976, 1977, 1982, 1983, 1986, 1987, 2002–2004) и в годы его отсутствия (1963, 1964, 1985, 1990, 1996, 2008, 2010). Температура воздуха и воды в эти годы была выше климатической. Концентрация хлорофилла *a* и величины показателей поглощения и рассеяния, как и в зимне-весенний период, не превышали их средних значений. Также пониженной была биомасса фитопланктона.

Пониженная прозрачность при повышенном стоке Дуная в зимне-весенний период наблюдалась в годы с событием ЭНЮК (1970, 1977, 1978, 1987, 1994, 1995, 1998, 2004) и в годы его отсутствия (1960, 1969, 1973, 1980–1982, 1984, 1986, 1997, 1999, 2000, 2002, 2003, 2006). В эти годы зимние температуры воздуха и воды в основном превышали климатические температуры и только в 1987 и 2003 гг. зимы были холодными. Концентрации хлорофилла *a* и компонентов взвешенного органического вещества, полученные по немногочисленным данным, в 1980-е и 1990-е гг., как правило, были выше средних значений концентраций за упомянутый ранее период [1, 13]. Вместе с тем время значения биооптических параметров и биомассы фитопланктона (см. рис. 6) в отдельные годы (особенно в годы отсутствия события ЭНЮК) были ниже средних значений этих показателей в зимне-весенний период, что более характерно для случаев с повышенной прозрачностью. Отчасти это, видимо, было связано с тем, что для расчета сезонных значений показателей

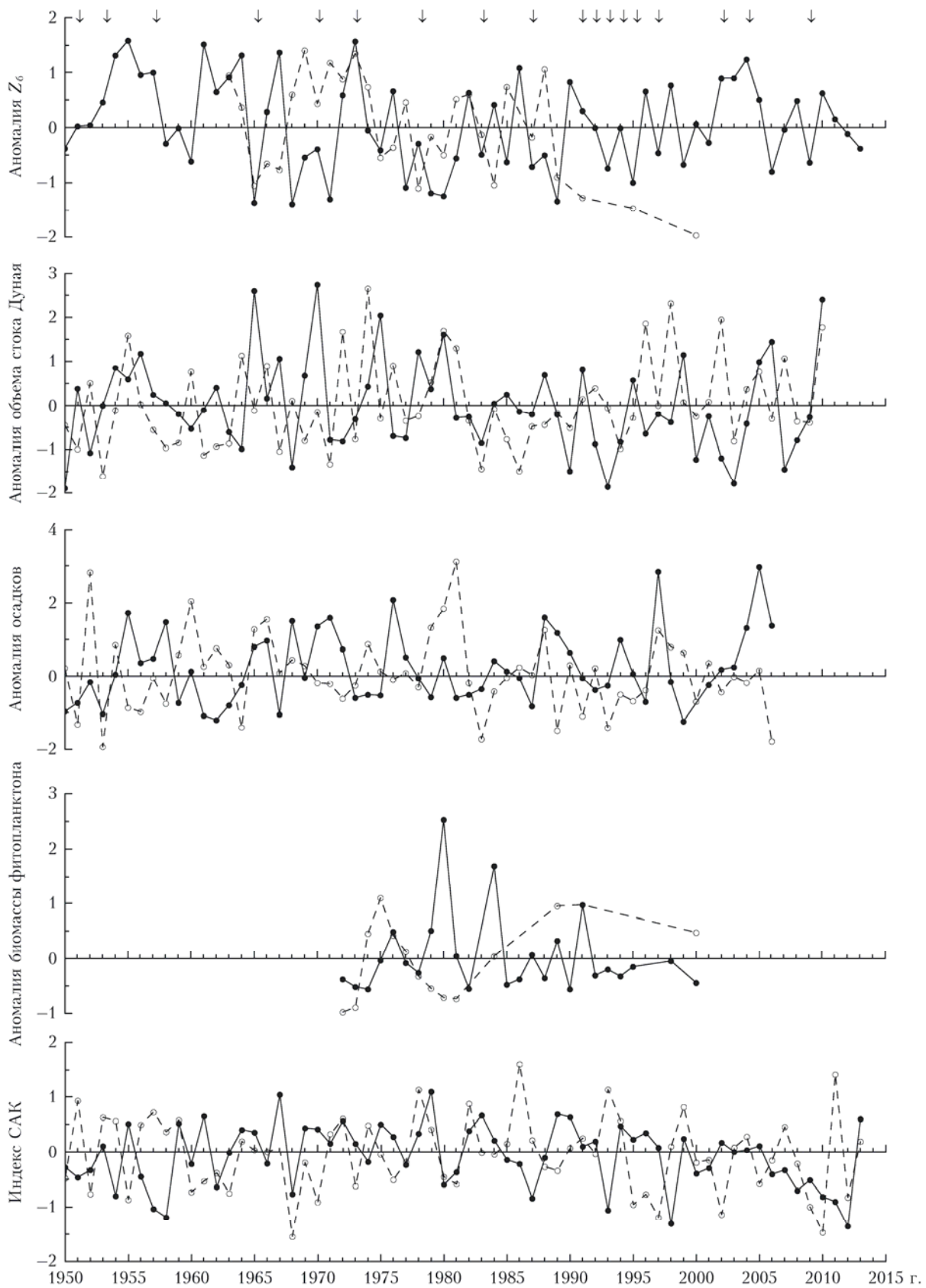


Рис. 7. Межгодовые изменения средних значений аномалий глубины видимости белого диска в западном районе, объема стока р. Дунай, атмосферных осадков, биомассы фитопланктона и индекса САК в летний (●) и осенний (○) периоды. Стрелки обозначают годы событий ЭНЮК

и прозрачности были использованы их значения, полученные в разные месяцы и дни каждого сезона при различающихся условиях развития фитопланктона и формирования взвешенного вещества. Кроме того, местоположение станций для определения биомассы фитопланктона и прозрачности в районе постоянного влияния речного стока в большинстве случаев не совпадало. Проведенное сопоставление полученных в одни и те же месяцы среднемесячных значений прозрачности, биомассы фитопланктона, показателей поглощения и рассеяния света продемонстрировало, что заметно увеличилось количество лет, когда пониженная прозрачность наблюдалась при более высоких значениях биологических параметров.

В годы события ЭНЮК (1969, 1970, 1987, 1991, 1992, 1995, 2006) температуры воздуха и воды в летний период большей частью были выше климатических, а концентрации хлорофилла *a* и компонентов взвешенного вещества и значения биооптических параметров превышали их средние значения. В годы отсутствия события ЭНЮК (1978–1980, 1985, 1999) температуры воздуха и воды соответствовали климатическим нормам (кроме умеренно теплого лета 1999 г.), что, возможно, послужило причиной относительно низкой концентрации хлорофилла *a* и компонентов взвешенного вещества в 1980-е гг. [13]. Биооптические параметры летом 1999 г. были выше средних значений.

Пониженная прозрачность и пониженный сток Дуная в зимне-весенний период были зарегистрированы как в годы события ЭНЮК (1983, 1991–1993, 1998, 2007), так и в годы его отсутствия (1959–1961, 1982, 1984, 1985, 1989, 1990) (см. рис. 6). В 1990-е гг. (в годы события ЭНЮК) зимы были холодными и температура воды в зимне-весенний период не превышала климатическую норму. Это, видимо, явилось одной из причин невысокой биомассы фитопланктона, которая только в 1993 и 1998 гг. превышала среднюю величину. В годы отсутствия ЭНЮК зимние температуры воздуха и воды были выше климатических значений. Температура воды весной также превышала среднее многолетнее значение. Одновременно с этим содержание хлорофилла *a* и компонентов взвешенного вещества и биомасса фитопланктона в эти годы в общем не превышали средние сезонные величины, что не объясняет пониженную прозрачность, наблюдаемую в зимне-весенний период.

В годы события ЭНЮК (1977, 1983, 1992–1995, 1998) и его отсутствия (1959, 1961, 1975, 1981, 1984, 1989, 1990, 2001, 2009) летняя температура воздуха была выше климатической, и только в 1959, 1977 и 1984 гг. лето было прохладным. В то же время биомасса фитопланктона превышала многолетнее летнее значение только в 1984, 1989 и 1994 гг. Пониженные значения биомассы в зимне-весенний и в летний периоды не объясняли относительно низкую прозрачность, зарегистрированную в эти сезоны года. Вероятные причины такого несоответствия значений

прозрачности и биологических параметров рассмотрены нами выше. Преимущественно они могли быть связаны с использованием для расчетов сезонных величин этих параметров данных, полученных неодновременно и на различных расстояниях от устьевой зоны Дуная.

Заключение

Рассмотрены основные особенности пространственных распределений измеренной и рассчитанной (по регрессионным уравнениям между Z_6 и ПОС) глубины видимости белого диска в СЗЧМ в годовом цикле, и получены статистические характеристики их сезонных изменений в западном и центральном районах СЗЧМ. Показано удовлетворительное согласие измеренных и рассчитанных сезонных значений Z_6 .

Характер внутригодовых изменений среднемесячных значений Z_6 и ПОС в западном и центральном районах хорошо согласуется с характером внутригодовых изменений биомассы фитопланктона и солености вод. В западном районе, постоянно находящемся под влиянием речного стока, в зимне-весенний период пониженная прозрачность наблюдалась при одновременном понижении солености трансформированных речных вод во время весеннего половодья и увеличении биомассы фитопланктона. В летне-осенний период прозрачность вод повышалась при одновременном уменьшении биомассы фитопланктона и повышении солености воды. В центральном районе внутригодовые изменения прозрачности описываются U-образной кривой, что хорошо согласуется с одновершинными кривыми распределений ПОС, биомассы фитопланктона и солености воды. Пониженная прозрачность в летний период (август, сентябрь) соответствовала повышенной биомассе фитопланктона, благоприятные условия для развития которого были связаны с поступлением в район обогащенных биогенными элементами трансформированных речных вод.

Анализ межгодовых вариаций прозрачности в западном (Придунайском) районе СЗЧМ и различных гидрометеорологических и биологических параметров показал следующее. В целом изменения прозрачности удовлетворительно согласуются с межгодовыми вариациями биомассы фитопланктона и содержания взвешенного органического вещества, которые зависят от изменчивости региональных гидрометеорологических условий (температуры воздуха и воды, атмосферные осадки, объем стока Дуная), связанных, в свою очередь, с глобальными атмосферными процессами.

В 1950–1988 гг. среднегодовые значения прозрачности, объема стока Дуная и биомассы фитопланктона изменялись, как правило, в противофазе (повышенной/пониженной прозрачности соответствовали пониженные/повышенные значения стока Дуная и биомассы фитопланктона). Заметное сни-

жение прозрачности в 1989–1990 гг. совпало со значительным уменьшением стока Дуная. В 1990-е гг. было отмечено нарушение ранее наблюдавшейся согласованности в характере изменчивости прозрачности, объема стока Дуная и биомассы фитопланктона. В начале 2000-х гг. прозрачность приблизилась к среднегодовому значению.

В результате анализа межгодовых изменений аномалий прозрачности и стока Дуная в различные сезоны было выявлено несколько характерных ситуаций таких изменений: повышенная прозрачность при пониженном стоке, пониженная прозрачность при повышенном стоке и пониженная прозрачность при пониженном стоке Дуная. Повышенная прозрачность при пониженном стоке была отмечена во все сезоны как в годы события ЭНЮК, так и в годы его отсутствия. Зимние температуры воздуха и воды до середины 1990-х гг., как правило, были ниже климатических значений. Более высокие зимние температуры в 2000-е гг. были связаны с наблюдаемым всеобщим потеплением. В летний период температуры воздуха и воды в течение всего интервала наблюдений в основном были выше климатических. Содержание хлорофилла *a*, компонентов взвешенного вещества, биомасса фитопланктона и биооптические параметры в большинстве своем не превышали их средних сезонных значений.

В случае пониженной прозрачности при повышенном стоке Дуная в годы с событием ЭНЮК и его отсутствием зимние и летние температуры воздуха и воды были выше климатических. Концентрации хлорофилла *a*, компонентов взвешенного вещества и биооптические параметры превышали их средние сезонные значения.

Пониженная прозрачность при пониженном стоке Дуная также была отмечена в годы события ЭНЮК и в годы его отсутствия. При этом независимо от зимних (в годы ЭНЮК температура не превышала климатическую норму, а в годы его отсутствия она была ниже) и летних (во все годы температура превышала климатическую) температурных условий содержание хлорофилла *a* и компонентов взвешенного вещества, биомасса фитопланктона и значения биооптических параметров в основном не превышали их средние сезонные значения, что было характерно для случаев с повышенной прозрачностью. Причиной такого несоответствия, скорее всего, явилось использование для расчетов сезонных значений показателей данных, полученных в разные месяцы сезона, для которых условия развития фитопланктона и формирования состава взвешенного вещества могли быть различными. Проведенное сопоставление полученных в одни и те же месяцы среднемесячных значений сравниваемых показателей показало заметное улучшение их ожидаемого соответствия.

1. Кукушкин А.С. Многолетняя и сезонная изменчивость распределения прозрачности в поверхностных водах

- северо-западной части Черного моря // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 2. С. 113–123.
2. Кукушкин А.С., Воскресенская Е.Н., Маслова В.Н. Особенности формирования поля прозрачности в поверхностном слое северо-западной части Черного моря в зимне-весенний период // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 8. С. 730–736; Kukushkin A.S., Voskresenskaya E.N., Maslova V.N. The features of transparency field generation in the upper sea layer // Atmos. Ocean. Opt. 2011. V. 24, N 1. P. 95–101.
 3. Воскресенская Е.Н., Кукушкин А.С., Бурлакова З.П., Еремеева Л.В. О связи крупномасштабных атмосферных процессов с изменчивостью прозрачности и содержания взвешенного вещества в поверхностном слое вод северо-западной части Черного моря в зимний период // Метеорол. и гидрол. 2004. № 12. С. 52–62.
 4. Воскресенская Е.Н., Кукушкин А.С., Михайлова Н.В. Особенности изменчивости распределений прозрачности и содержания взвешенного вещества в северо-западной части Черного моря в весенний период в связи с крупномасштабными процессами в системе «океан–атмосфера» // Метеорол. и гидрол. 2011. № 1. С. 64–77.
 5. Pacific Decadal Oscillation (PDO) // Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean (JISAO). Electronic resource]. URL: <http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest> (last access: 10.02.2016).
 6. Southern Oscillation Index. Archives // Australia's official weather forecasts & weather radar Bureau of Meteorology. [Electronic resource]. URL: <http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtml1.shtml> (last access: 10.02.2016).
 7. Black Sea Data base supplied with Ocean Base 3.07 DBMS // NANO SfP-971818 ODBMS Black Sea Project. July 15, 2003. CD-ROM.
 8. Кривенко О.В., Пархоменко А.В. Пространственная и временная изменчивость биомассы фитопланктона в Черном море за период 1948–2001 гг. // Морск. эколог. ж. 2010. Т. 9, № 4. С. 5–24.
 9. Маньковский В.И., Земляная Л.А. Связь глубины видимости белого диска с показателем ослабления света для вод Черного моря // Комплексные океанографические исследования Черного моря. Севастополь: МГИ АН УССР, 1989. С. 82–85.
 10. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.
 11. Лубков А.С., Воскресенская Е.Н., Кукушкин А.С. Метод восстановления среднемесячных значений прозрачности на примере северо-западной части Черного моря // Оптика атмосф. и океана. 2016. Т. 29, № 4. С. 343–350; Lubkov A.S., Voskresenskaya E.N., Kukushkin A.S. Method for reconstructing the monthly mean water transparencies for the north-western part of the Black Sea as an example // Atmos. Ocean. Opt. 2016. V. 29, N 5. P. 457–464.
 12. Большаков В.С. Трансформация речных вод в Черном море. Киев: Наук. думка, 1970. 328 с.
 13. Кукушкин А.С. Изменчивость содержания взвешенного органического вещества в северо-западной части Черного моря // Океанология. 2013. Т. 53, № 5. С. 626–642.
 14. Гидрометеорологические условия морей Украины. Т. 2. Черное море. Севастополь: УкрНИГМИ, 2012. 421 с.
 15. Матыгин А.С., Сытов В.Н., Попов Ю.И., Ковалышина С.П. Изменчивость климатических характеристик в северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и ком-

A.S. Kukushkin. Spatial and temporal variability of the water transparency distribution in the north-western Black Sea.

According to the long-term (1963–2000) observational data on depth of the Secchi Disk visibility, the main peculiarities of the annual cycle of transparency distribution in the surface water layer of the north-western Black Sea are considered. The statistical estimates of the seasonal variations in the areas differing in the degree of influence of river and open-sea water flow on their hydrophysical parameters are derived. Intra-annual transparency variations in these areas are in a good agreement with the intra-annual variations in phytoplankton biomass and water salinity. It is shown that long-term (1950–2013) intra-annual seasonal transparency variations (according to the data measured and reconstructed by means of a neural network model) show a satisfactory agreement with the intra-annual variations in the hydrobiological parameters. The dependences of the variations in these parameters on the regional meteorological conditions within El Niño – Southern Oscillation period and within the period of its absence are studied.