

ВЛИЯНИЕ РЕЧНОГО СТОКА НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ОБЛАСТИ ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА ПО ДАННЫМ КОНТАКТНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

© Н.Ф. Кириленко, В.М. Кушнир, Е.М. Лемешко, 2009

Морской гидрофизический институт НАН Украины, Севастополь

The influence of the Danube and the Dnieper river run-off on the ecological situation of the North Western Black Sea shelf was studied on the basis of integrated studies. The following information was used for the analysis: a chlorophyll *a* concentration, vegetation index NDVI, brightness of normalized emergent radiation at various wavelengths, ocean surface temperature based on the data obtained from scanners, of the type SeaWiFS, MODIS, NOAA. Interrelation between the Danube and the Dnieper run-off and variability of a chlorophyll *a* concentration and index of the North Atlantic Oscillations (NAO) is revealed. It is shown that there is a well-marked interrelation between the hypoxia and index NDVI, and at the same time space of hypoxia can be evaluated on the basis of the relations from satellite data. The results obtained can be used for remote monitoring of the ecological conditions of the above-mentioned region.

Введение. В настоящее время опубликовано большое число работ по проблеме изменений экологических условий в северо-западной области Черноморского региона (44–46,8° с. ш., 28,4–34° в. д.), характеризующейся следующими особенностями [1–6]: 1) высокая концентрация крупных городов, промышленных и сельскохозяйственных производств на побережье; 2) значительная площадь мелководной зоны (шельфа) и обменные процессы с основной глубоководной частью Черного моря; 3) сильное влияние речного стока Дуная, Днепра и других рек на физико-биологические (экологические) условия. Многолетние комплексные исследования выявили значительную изменчивость экологии рассматриваемой области региона как под действием естественных процессов, так и в связи с влиянием антропогенных факторов [7]. Эти изменения наиболее отчетливо проявились при изучении оптико-биологических характеристик водной среды [8, 9].

По данным [8], в колебаниях прозрачности морской воды прослеживалась периодичность, близкая к 11-летним циклам солнечной активности, причем она повышалась примерно на 2 м во второй половине цикла, возвращаясь на прежний уровень в первой половине следующего цикла. Такая закономерность наблюдалась до 1980 г., после которого произошло резкое снижение прозрачности, обусловленное, главным образом, резким увеличением концентрации фитопланктона (прозрачность морской воды зависит от содержания органической (фитопланктон, детрит) и минеральной взвеси, а также от концентрации растворенных элементов этих компонентов). К основным причинам данного явления относят резкое увеличение концентрации биогенных элементов в северо-западной части Черного моря, по-

ступивших со стоком Дуная (2/3 стока всех рек в этом районе) и Днепра.

Многолетние (1948–2000) исследования в устье Дуная показали, что за этот период сток биогенных веществ претерпел значительные изменения, связанные как с зарегулированием водного стока в среднем течении, так и с усилением антропогенной деятельности на водосборной площади в 1977–1985 гг. [6]. Например, в 1970–1980-х годах содержание минерального азота, по сравнению с 1950–1960-ми годами, возросло почти в 13 раз, минерального фосфора – в 2, в 1980–1990-х годах – в 18 и 10 раз соответственно.

Негативные изменения экосистемы северо-западной области Черноморского региона, активно начавшиеся в 1970-х гг., продолжают и в настоящее время. Результаты анализа данных наблюдений за период с 1973 по 2000 г. показали, что неблагоприятный кислородный режим в придонных водах северо-западной части Черного моря наблюдался на значительной акватории, особенно в 30–40-мильной зоне, примыкающей к северному и западному побережью [10]. С повторяемостью более 40 % случаев в обширных областях Придунайского района наблюдалась гипоксия Одесской котловины и Приднестровского района. Максимальная повторяемость гипоксии (до 80 % случаев обнаружения) отмечена примерно в 10 милях к востоку от Днестровской банки. В этих областях наиболее вероятны возникновение гипоксии, аноксии и заморозов.

Вертикальное развитие придонной гипоксии на ранней ее стадии (май – июнь) обычно достигает 5–6 м при глубине моря 10–15 м; на последующем этапе к августу – сентябрю при распространении в открытую часть она развивается по вертикали до 12–15 м (при глубинах 30–40 м). В конце

лета на участках шельфа с гипоксией вод отмечаются аноксия и образование сероводорода [11].

Между площадью распространения суммарной за сезон придонной гипоксии и площадью распространения мелководной черноморской водной массы (МЧВМ) выявлена прямая связь (коэффициент корреляции равен 0,83). На базе этой зависимости построена модель прогноза сезонного распределения придонной гипоксии, основными предикторами являются площадь распространения МЧВМ в конце весны и количество суток от начала года до стабильного весеннего перехода температуры воздуха через значение 5 °С (соответственно воды ~3–4 °С) [9].

Многолетние исследования показали, что речной сток Дуная и Днестра [12] характеризуется сложной изменчивостью. Анализ ряда среднегодовых расходов воды Дуная в вершине его дельты за 163-летний период выявил заметные многолетние изменения годового стока. Средняя многолетняя величина стока воды за весь период наблюдений 1840–2002 гг. составила 199 км³/год, но в отдельные периоды она заметно отличалась от этого значения. Период 1840–1920 гг. был относительно маловодным (194 км³/год); период 1961–2002 гг. оказался значительно многоводнее (211 км³/год). При этом за весь период наблюдений 1840–2002 гг. наибольшие средние годовые расходы воды отмечены в 1941 г. (9950 м³/год), 1970 (9620 м³/с) и 1940 г. (9520 м³/с), наименьшие – в 1863 г. (3610 м³/с), 1921 (3910 м³/с) и 1990 г. (4190 м³/с). Возрастание водности Дуная во второй половине XX в. связывают в основном с изменчивостью климата [12].

Многолетняя изменчивость стока Днестра рассмотрена по годовым расходам за период с 1851 по 2000 г. Климатическая норма расхода воды за 150 лет составила 50,5 км³/год. Абсолютный максимум в годовой величине расхода воды приходился на 1970 г. – 98 км³/год, а абсолютный минимум – 23 км³/год – на 1921 г. Высокие расходы воды приходились на 1853–1882, 1924–1935 и 1968–1982 гг., а низкие – на 1884–1892, 1944–1965 и 1995–1997 гг.

Приведенные выше известные факты подтверждают определяющую роль речного стока Дуная, Днестра и других рек в изменениях экосистемы северо-западной области региона вследствие биогенного загрязнения водной среды, развития эвтрофикации и гипоксии. Однако до сих пор не существует четких представлений о количественной связи между стоковыми характеристиками указанных рек и параметрами, характеризующими экологическое состояние рассматриваемого морского региона. Поэтому целью данной работы является установление таких количественных характеристик и соотношений, которые можно будет использовать как для анализа текущего экологи-

ческого состояния и эффективного мониторинга, так и для прогноза состояния экосистемы северо-западной области Черноморского региона. Для выполнения указанных задач необходимо привлекать современные спутниковые данные высокого разрешения в качестве входных параметров и развивать методы оценивания области трансформированных прибрежных вод с высоким содержанием биогенных элементов и площади гипоксии на шельфе.

Материалы и методы. В качестве исходных данных использовались среднемесячные расходы воды рек Дунай (г/п Рении) и Днепр (г/п Каховская ГЭС) за период с 1985 по 2006 г. включительно.

Основой для получения этих данных служат значения уровня (H), пересчитываемого в расход воды (Q) с помощью эмпирической зависимости $Q = f(H)$, которая корректируется по данным непосредственных измерений, причем такая корректировка в обязательном порядке выполняется при прохождении пика каждого паводка. Отклонения точек измеренных расходов воды (посредством гидрометрической вертушки) от построенных соответствующих кривых не должны превышать следующих пределов: в нижней части кривой ± 12 , в остальной части кривой $\pm 8-10\%$ [13, 14].

Оценки концентрации хлорофилла a получены по данным дистанционных измерений цветовыми сканерами типа SeaWiFS и MODIS, которые свободно распространяются NASA (USA) по сети ИНТЕРНЕТ (Level 3 <http://reason.gsfc.nasa.gov/OPS/Giovanni/ocean.seawifs.2.shtml>). Для анализа использованы временные реализации концентрации хлорофилла a с осреднением за один месяц и по пяти характерным зонам северо-западной области региона. Их координаты указаны в табл. 1.

Таблица 1. Координаты зон северо-западной области Черноморского региона, для которых выполнено осреднение концентрации хлорофилла a

Обозначение	Северная широта, град.	Восточная долгота, град.
М-1	44 – 46,8	28,4 – 34
М-2	44 – 46,8	28,4 – 32
М-3	44 – 46,8	28,4 – 31
М-4	44 – 46,8	28,4 – 30
М-5	44 – 46,8	28,4 – 29

Зона М-1 охватывает всю северо-западную область региона, зона М-5 примыкает к северо-западному берегу моря на расстоянии 30–50 км, т. е. находится в области основного влияния речного стока, остальные зоны занимают промежуточное положение.

Из общих соображений следует ожидать, что величины речного стока Дуная, Днестра и других рек зависят от количества и интенсивности атлан-

тических циклонов, которые перемещаются из Северной Атлантики в районы водосбора этих рек. Траектории и характеристики циклонов связаны с временной изменчивостью индекса NAO (North Atlantic Oscillation Index) [7]. Соответствующие данные имеются в ИНТЕРНЕТе на веб-сайте <http://www.cpc.noaa.gov/products/precip/CWlink/pna/norm.nao.monthly.b5001.current.ascii.table>. Они использованы для взаимного спектрального анализа с аналогичными характеристиками расходов воды рек Дунай и Днепр и концентрацией хлорофилла *a* в выделенных зонах северо-западной области региона.

Взаимный спектральный анализ колебаний стока рек, индекса NAO и концентрации хлорофилла *a* выполнен на основе линейных методов расчета статистических характеристик [15, 16]. Для определения характеристик межгодовой изменчивости указанных параметров в работе использован рекурсивный низкочастотный фильтр Батерворта третьего порядка с эффективным подавлением годовых и более высокочастотных колебаний [17].

Результаты. Статистические характеристики расходов воды крупнейших рек северо-западной области Черноморского региона по данным за период 1985–2006 гг. представлены в табл. 2.

Таблица 2. Статистические характеристики расходов воды рек, м³/с

Величина	Дунай	Днепр
Средняя	6503	1303
Максимальная	14100	3350
Минимальная	2330	342
Стандартное отклонение	2491	585,9

Приведенные данные показывают, что основной вклад в речной сток вносит р. Дунай. Основные особенности изменчивости расходов воды Дуная и Днепра состоят в следующем. На спектрах частот, вычисленных с числом степеней свободы 18, выделяются основные периоды, соответствующие сезонному циклу с периодом 12 мес и вторая гармоника с периодом 6 мес, которая более четко выражена для Днепра. Взаимосвязь этих колебаний характеризуется относительно высоким уровнем когерентности (0,7 и 0,6 соответственно). Фазовый сдвиг между 12-месячными колебаниями равен $-0,5$ рад, между колебаниями с периодом 6 мес $-0,25$ рад. Это соответствует периодам, примерно равным 1 мес и 7 сут.

Для определения характеристик взаимосвязи речного стока Дуная и Днепра с индексом NAO были вычислены спектры временной изменчивости указанных параметров. В качестве примера результаты расчетов для р. Дунай показаны на рис. 1.

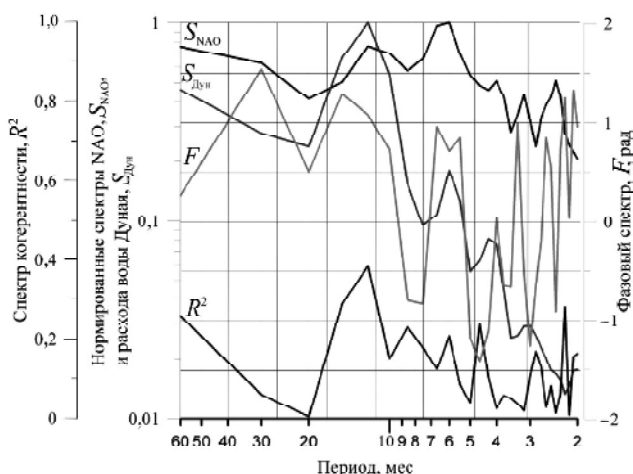


Рис. 1. Спектральные характеристики индекса NAO и расхода воды р. Дунай

Особенность спектра NAO – преобладание амплитуды колебаний с периодом 6 мес над годовой гармоникой. Колебание с периодом 6 мес хорошо выражено на спектре расхода воды Дуная, хотя когерентность с колебаниями индекса NAO на этом периоде низкая. Значительно более высокое значение R^2 соответствует годовому циклу. Фазовый сдвиг на этой частоте равен примерно 1 рад, что соответствует периоду 1,9–2 мес. Для годовых циклов этих параметров когерентность равна 0,4, фазовый сдвиг – 0,6 (соответствует периоду примерно 1 мес).

Таким образом, фазовый сдвиг, между изменениями индекса NAO и расходом воды Дуная соответствует интервалу, равному 2 мес, а для Днепра – примерно 1 мес. Это отвечает приведенным выше данным о запаздывании фазы колебаний расхода воды Днепра по отношению к расходу воды Дуная примерно на 1 мес.

Для анализа взаимосвязи расхода воды Дуная и концентрации хлорофилла *a* в различных зонах северо-западной области региона использованы данные цветового сканера SeaWiFS за период с 1998 по 2006 г. включительно. Композиционные снимки морской поверхности проводились с дискретностью 1 мес и с осреднением по указанным выше зонам. Оценки спектральных характеристик с числом степеней свободы, равным 15, получены для зон М-1 и М-5. Основные особенности этих характеристик состоят в следующем. На спектрах концентрации хлорофилла *a* для зон М-1 и М-5 отсутствует четко выраженный максимум, соответствующий годовому периоду, хотя такой максимум имеется на спектрах когерентности. Фазовые сдвиги между расходом воды Дуная и концентрацией хлорофилла *a* для обеих зон равны 1,25 рад, что соответствует периоду 2,4 мес. Это означает, что максимум концентрации хлорофилла *a* в северо-западной области региона наблюдается через 2,4 мес после максимальной величины речного стока Дуная.

Межгодовая изменчивость. Для анализа влияния межгодовой изменчивости расходов воды рек Дунай и Днепр на концентрацию хлорофилла *a* были отфильтрованы колебания этих параметров с периодами один год и меньше для каждой из выбранных зон северо-западного шельфа Черного моря.

На рис. 2 видно, что среднегодовые минимумы расходов воды Дуная наблюдались в 1997, 2001 и 2003 гг., а максимумы – в 1999 и 2006 гг. Концентрация хлорофилла *a* во всей северо-западной области региона (зона М-1) в общих чертах повторяет эти особенности. Наиболее резко изменяется и повторяет межгодовую изменчивость расхода воды Дуная концентрация хлорофилла *a* в зоне М-5, которая соответствует 30–50-километровой области вблизи северо-западного берега Черного моря. Последняя в наиболее сильной степени подвержена влиянию речного стока, главным образом Дуная, что проявляется в изменении как средней концентрации хлорофилла *a*, так и ее стандартного отклонения. Расчеты были проведены для всех пяти зон. Таким образом, изменчивость концентрации хлорофилла *a* (стандартного отклонения) при переходе от прибрежной зоны во всю рассматриваемую зону М-1 изменяется примерно в 4 раза, а средняя концентрация хлорофилла *a* – в 2,5 раза. Приведенные на рис. 2 данные свидетельствуют о том, что, наблюдается сильное влияние расхода воды р. Дунай на изменение концентрации хлорофилла *a* во всей северо-западной области региона, и особенно в 30–50-километровой зоне северо-западного берега.

Развитие гипоксии. К наиболее негативным экологическим последствиям в северо-западной области региона относится развитие локальных зон гипоксии, которая формируется вначале в придонном слое на расстоянии нескольких метров от дна. В дальнейшем при неблагоприятных условиях (высокая температура, интенсивная эвтрофикация) такие слои развиваются, достигая

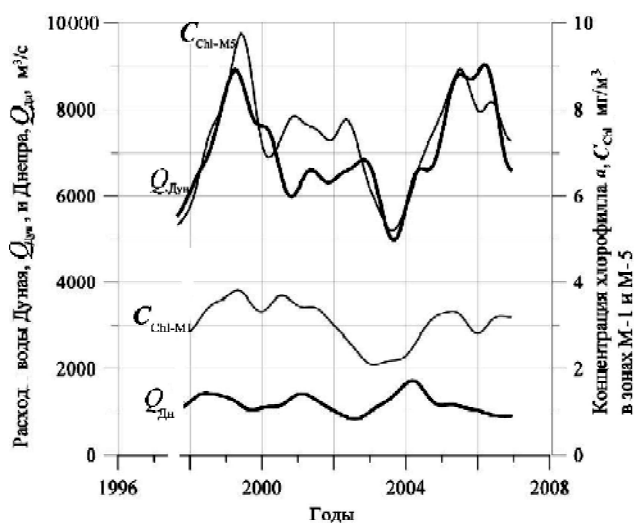


Рис. 2. Межгодовые расходы воды Дуная и Днепра и концентрации хлорофилла *a* в зонах М-1 и М-5

глубины примерно 15 м. В этих слоях возникают локальные очаги сероводородного заражения, происходят гибель придонных биологических сообществ, массовые заморы рыбы.

В статье [10] предложена простая модель прогноза площади $S_{\text{гип}}$ северо-западного шельфа, на которой в летний период развивается гипоксия. Эта величина равна

$$S_{\text{гип}} = 8,1 + 0,6S_{17,5} - 0,15D_{t-5}, \quad (1)$$

где $S_{17,5}$ – площадь распространения шельфовых вод в мае (тыс. км²); D_{t-5} – количество суток от начала года до устойчивого перехода температуры воздуха через значение 5° С, а воды – через значение 4° С. Максимальная ошибка прогностической оценки для развития придонной гипоксии в придонных водах в 1974–1976 гг. составила не более 6,0 тыс. км² (при стандартной ошибке расчета ±2,4 тыс. км²).

Площадь распространения шельфовых вод может определяться по пространственному распределению яркости нормализованного восходящего излучения на различных длинах волн или на основе комбинации соответствующих сигналов. Представляется возможным использовать данные на длине волны 0,67 мкм, $L_{\text{wn}}(0,67)$, так как известно, что эта величина пропорциональна концентрации минеральной взвеси. Это позволяет достаточно четко определить зону шельфовых вод, которая характеризуется относительно высокой мутностью. В качестве другого варианта может быть использован индекс цвета $I(443/555)$ в виде отношения сигналов яркости восходящего излучения на длинах волн 0,443 и 0,555 мкм. Известно, что величина $I(443/555)$ функционально связана с концентрацией хлорофилла *a* и минеральной взвеси. Важным преимуществом использования индекса цвета является то, что в отличие от $L_{\text{wn}}(0,67)$ его величина мало зависит от азимутальных и зенитных углов спутника и Солнца, общей освещенности моря и других факторов. Взаимный анализ величин $L_{\text{wn}}(0,67)$ и $I(443/555)$ для мая 1998 и 1999 гг. показал, что существует достаточно четкая граница, отделяющая шельфовые воды с высокой мутностью от сравнительно прозрачных вод открытой части моря [18]. Эта граница соответствует условиям $L_{\text{wn}}(0,67) \geq 0,1 \text{ мкВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{нм}^{-1}$ и $I(443/555) \leq 1$. В качестве иллюстрации на рис. 3 показано пространственное распределение индекса цвета, отчетливо видно распределение шельфовых вод в зоне с указанными границами $I(443/555) \leq 1$.

В работе [9] приведены экспериментальные данные о развитии локальной гипоксии в 1998–2000 гг. В 1998 г. общая площадь гипоксии была равна $(3-7) \cdot 10^3 \text{ км}^2$, в 1999 – $(13-15) \cdot 10^3 \text{ км}^2$, в 2000 г. – $14 \cdot 10^3 \text{ км}^2$. Оценки площадей, соответствующие условиям $L_{\text{wn}}(0,67) \geq 0,1 \text{ мкВт} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{ср}^{-1} \cdot \text{нм}^{-1}$, $I(443/555) \leq 1$, равны для 1998, 1999 и 2000 гг. со-

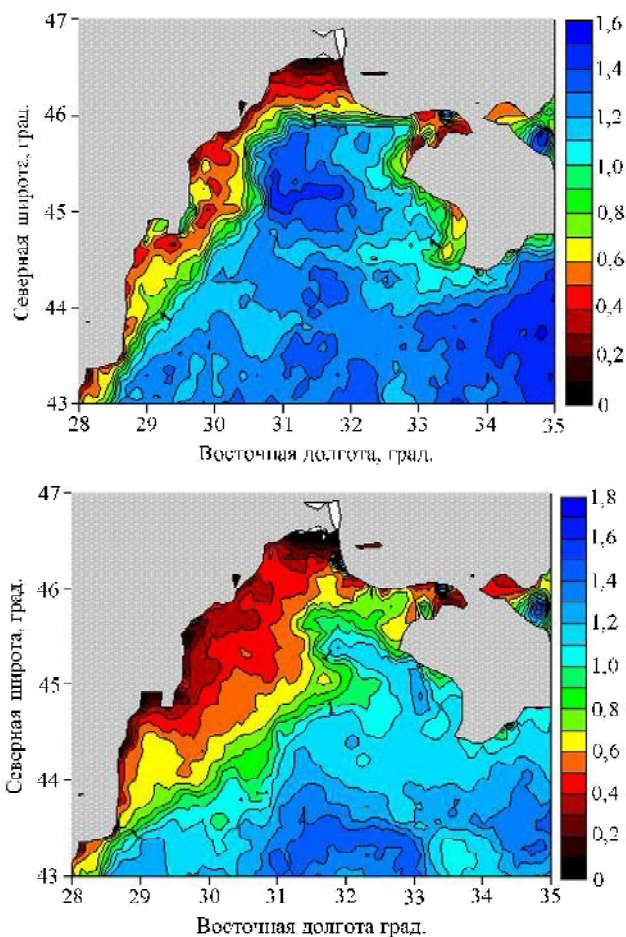


Рис. 3. Пространственные распределения индекса цвета для мая 1998 (а) и 1999 гг. (б)

ответственно 22533, 32898, 46895, 59183, 60762 и 58194 км². Площади гипоксии в 1999 и 2000 гг. и величины D_{t-5} (82 и 83) изменились несущественно, как и площади шельфовых вод, вычисленных из условия $I(443/555) \leq 1$. В то же время оценки площадей, полученных на основе условия $L_{\text{вн}}(0,67) \geq 0,1$ мкВт · см⁻² · ср⁻¹ · нм⁻¹, для 1999 и

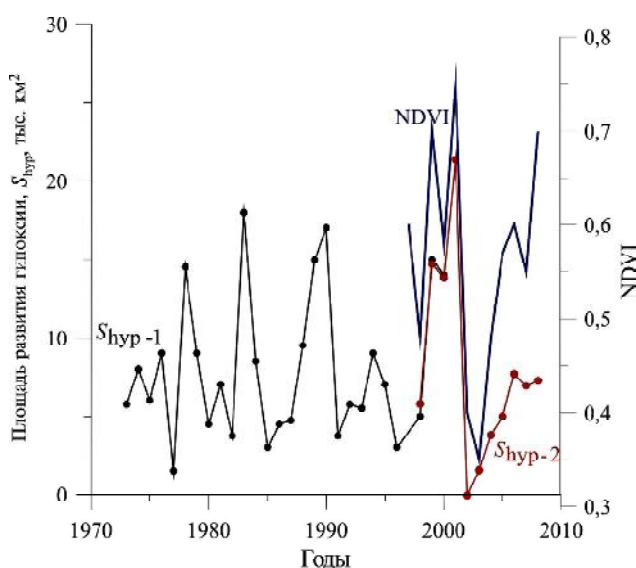


Рис. 4. Площадь развития гипоксии в северо-западной области Черноморского региона и индекс вегетации (NDVI) в южном регионе Украины по данным NOAA (USA)

2000 гг. изменились от 46 895 до 60 762 км², т. е. примерно на 30 %. Это свидетельствует о том, что условие $I(443/555) \leq 1$ позволяет получать более устойчивые оценки площади шельфовых вод и именно его следует использовать для прогноза площадей развития локальной гипоксии.

Такой прогноз может быть выполнен на основе приведенных в работе [9] данных о площадях гипоксии в 1998–2000 гг., рассмотренного метода расчета площади шельфовых вод и климатических данных о величине D_{t-5} . Используя общее соотношение (1) и указанные данные, получили следующее прогностическое соотношение:

$$S_{\text{hyp}} = 28,17 + 0,3395S_{\text{sh}} - 0,41D_{t-5}, \quad (2)$$

где S_{sh} – площадь шельфовых вод (тыс. км²) в мае анализируемого года, вычисленная из условия $I(443/555) \leq 1$.

На рис. 4 показаны изменение площади гипоксии в северо-западной части Черного моря за период с 1972 по 2000 г. (данные [9] и расчет по данным дистанционного зондирования с 1998 по 2008 г.), а также зависимость индекса вегетации (NDVI) по данным NOAA (США) для юга Украины.

Видно, что величины S_{hyp} по данным [9] и данным дистанционного зондирования достаточно хорошо согласуются в 1998–2000 гг., а изменение NDVI имеет такой же характер, как изменение S_{hyp} . Это подтверждают зависимость $S_{\text{hyp}} = f(\text{NDVI})$, представленная на рис. 5:

$$S_{\text{hyp}} = 62,926(\text{NDVI})^2 - 28,232(\text{NDVI}) + 3,2017, \quad (3)$$

и коэффициент достоверности $R^2 = 0,714$.

Характер зависимости (3) и значения S_{hyp} по данным дистанционного зондирования в целом совпадают с данными [9], за исключением экстремального выброса в 2001 г., совпа-

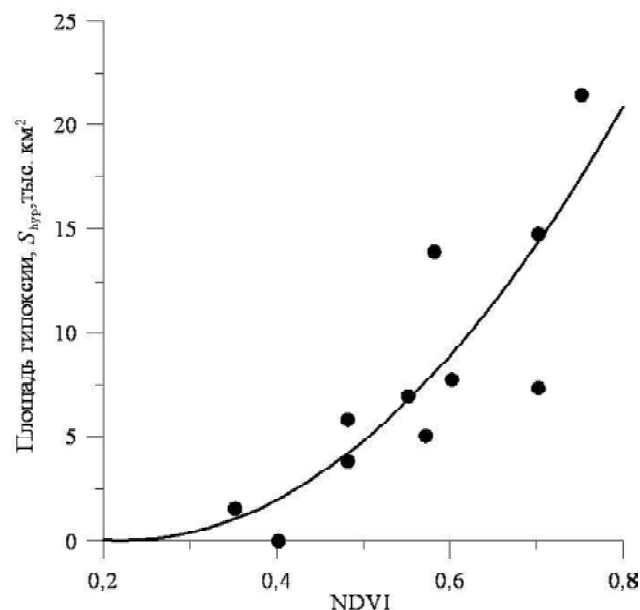


Рис. 5. Зависимость $S_{\text{hyp}} = f(\text{NDVI})$: точки – рассчитанные значения, линия – аппроксимационная

дающего с экстремальной величиной NDVI в мае этого же года.

Обсуждение и выводы. Впервые получена взаимосвязь расходов воды Дуная и Днепра с изменчивостью концентрации хлорофилла *a* и индекса североатлантического колебания NAO на сезонных и межгодовых масштабах. Установлена хорошо выраженная взаимосвязь между площадью гипоксии и индексом NDVI; при этом площадь гипоксии может быть оценена на основе соотношений (2), (3) по спутниковым данным.

1. Взаимный спектральный анализ расходов воды рек Дунай и Днепр показал наличие очевидной статистической связи этих параметров на периодах 12 и 6 мес, а также запаздывание колебаний расхода воды Днепра по отношению к колебаниям расхода воды Дуная примерно на 1 мес для основного цикла сезонной изменчивости и 7 сут для изменчивости с периодом 6 мес. Возможное объяснение состоит в том, что бассейны водосбора этих рек находятся в зоне действия атлантических циклонов, причем вследствие более южного положения Дуная это влияние проявляется сначала в бассейне этой реки. Период 7 сут – характерен для синоптической изменчивости, и, вероятно, это запаздывание также связано с прохождением циклонов. Взаимосвязь расходов воды Дуная и Днепра с условиями формирования и траекториями атлантических циклонов проявляется в данных взаимного спектрального анализа этих параметров с индексом NAO (см. рис. 1). Эта взаимосвязь существенна на периодах сезонной изменчивости.
2. Изменчивость концентрации хлорофилла *a* тесно связана с расходом воды Дуная как во всей северо-западной области региона (зона M-1), так и вблизи северо-западного берега (зона M-5). Об этом свидетельствует высокий уровень когерентности расхода воды Дуная и концентрации хлорофилла *a*, относящийся к диапазону периодов 6–12 мес. Значения фазового спектра в указанном диапазоне соответствуют запаздыванию максимумов концентрации хлорофилла *a* от 2,5 до 1,5 мес. Отсутствие резких максимумов на спектре концентрации хлорофилла *a* и обширная область высокой когерентности свидетельствуют о сложном характере проявления взаимосвязи между расходом воды Дуная и концентрацией хлорофилла *a*, а также, частности, о том, что цветение фитопланктона определяется не только расходом воды Дуная, но и другими факторами – температурой, освещенностью, количеством биогенных элементов и др.
3. Негативные экологические изменения в северо-западной области региона вызваны следующими основными факторами:
 - высокая концентрация нитратов и фосфатов, выносимых реками, главным образом Дунаем;

об этом свидетельствует взаимосвязь расходов воды этой реки и концентрации хлорофилла *a* в диапазоне как сезонной изменчивости, так и межгодовых колебаний;

- нарушение естественного биологического равновесия вследствие неконтролируемого вылова планктоноядных рыб и развития организмов-вселенцев;
- изменение температурного режима, в основном раннее потепление и жаркое лето, что приводит к ускорению биохимических реакций, связанных с окислением избыточной органики; в этих условиях высокими темпами потребляется растворенный кислород, развиваются локальные зоны придонной гипоксии и сероводородного заражения, наблюдаются массовые заморы рыбы.

Согласно многолетним исследованиям [9], в грубом приближении площадь гипоксии определяется двумя факторами: площадью ореола трансформированных речных вод, выносимых Дунаем и Днепром в мае, и началом устойчивого потепления воды – при более раннем потеплении устанавливается более высокая температура и более активно развиваются биохимические реакции потребления растворенного кислорода. Впервые показано, что площадь ореола трансформированных прибрежных вод в мае может быть определена по данным цветковых сканеров типа MODIS, SeaWiFS и аналогичных систем, а момент устойчивого повышения температуры – по суточным данным ИСЗ NOAA (<http://poet.jpl.nasa.gov>). В результате получены оценки площади гипоксии на основе соотношения (2). Установлена хорошо выраженная связь между площадью гипоксии и индексом вегетации (NDVI) для южных областей Украины. Возможное объяснение этой связи состоит в следующем. Высокие значения NDVI соответствуют обилию влаги, т. е. увеличению расхода воды основных рек и ливневых стоков в море, низкие значения NDVI соответствуют засухе. Поэтому при относительно больших значениях NDVI увеличивается площадь трансформированных прибрежных вод с высоким содержанием биогенных элементов, что является главной предпосылкой развития гипоксии. Обратный эффект наблюдается при малых величинах NDVI. Эта особенность позволяет, во-первых, прогнозировать площади гипоксии в летний период по данным дистанционных измерений до июня и, во-вторых, контролировать степень антропогенного воздействия на северо-западную область Черноморского региона.

Авторы благодарят проект EU FP6 “Southern European Seas: Assessing and Modelling Ecosystem changes”, контракт № 036949-2 за частичную поддержку Н.Ф. Кириленко, Е.М. Лемешко при выполнении работы.

1. *Виноградов М.Е., Сапожников В.В., Шушкина Э.А.* Экосистема Черного моря. — М.: Наука, 1992. — 112 с.
2. *Зайцев Ю.П.* Экологическое состояние шельфовой зоны Черного моря у побережья Украины (обзор) // Гидробиол. журн. — 1992. — 28, № 4. — С. 3–19.
3. *Селин П.Ю., Айзатулин Т.А., Леонов А.В. и др.* Химическая динамика сероводородной зоны на северо-западном шельфе Черного моря // Водн. ресурсы. — 1998. — № 4. — С. 144–153.
4. *Фащук Д.Я.* Кислородный режим придонного слоя вод северо-западной части Черного моря в летний период // Гидробиол. журн. — 1985. — 21, № 5. — С. 80–84.
5. *Берсенева Г.П.* Сезонная динамика концентрации хлорофилла // Планктон Черного моря. — Киев: Наук. думка, 1993. — С. 92–109.
6. *Берлинский Н.А., Гаркавая Г.П., Богатова Ю.И.* Проблемы антропогенного эвтрофирования и развития гипоксии в северо-западной части Черного моря // Экология моря. — 2003. — Вып. 63. — С. 17.
7. *Oguz T., Dippner J.W., Kaymaz Z.* Climatic regulation of the Black Sea hydrometeorological and ecological properties at interannual-to-decadal time scales // J. Marine Systems. — 2006. — 60. — P. 235–254.
8. *Маньковский В.И., Владимиров В.Л., Афонин Е.И. и др.* Многолетняя изменчивость прозрачности воды в Черном море и факторы, обусловившие ее сильное снижение в конце 80-х — начале 90-х годов // НАН Украины. Мор. гидрофиз. ин-т. — Препр. — Севастополь, 1996. — 32 с.
9. *Орлова И.Г., Павленко Н.Е., Украинский В.В., Попов Ю.И.* Состояние эвтрофированности вод северо-западной части Черного моря по результатам многолетнего комплексного мониторинга // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2007. — С. 32–43.
10. *Орлова И.Г., Белевич Р.Р., Попов Ю.И. и др.* Динамика гипоксических процессов в придонных водах северо-западного шельфа Черного моря // Океанология. — 1999. — 39, № 4. — С. 548–554.
11. *Фащук Д.Я.* Сероводородная зона северо-западного шельфа Черного моря: природа, причины возникновения, механизмы динамики // Водн. ресурсы. — 1995. — 22, № 5. — С. 568–584.
12. *Справочник по гидрологическому режиму морей и устьев рек СССР. Ч. 1. Основные гидрологические характеристики. Т. 4. Черное море. Вып.1. Прибрежная зона моря.* — Киев, 1970. — 358 с.
13. *Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 6. Ч. 3.* — Л.: Гидрометеиздат, 1958. — 292 с.
14. *Михайлов В.Н.* Гидрология дельты Дуная. — М.: Геос, 2004. — 448 с.
15. *Бендат Д., Пирсол А.* Применения корреляционного и спектрального анализа. — М.: Мир, 1983. — 312 с.
16. *Морева И.Н., Федоров С.В., Ожиганов Ю.Г., Кушнир В.М.* Исследования волновых возмущений в опытном бассейне // Сб. науч. тр. СНУЯЭиП. — Севастополь: СНУЯЭиП. — 2006. — Вып. 2(18). — С. 217–226.
17. *Кушнир В.М.* Вертикальная структура океанских течений: методы, средства и результаты экспериментальных исследований / АН УССР. Мор. гидрофиз. ин-т. — Препр. — Севастополь, 1988. — 52 с.
18. *Кириленко Н.Ф.* Межгодовая изменчивость трансформации вод Дуная на северо-западном шельфе Черного моря // Системы контроля окружающей среды. — Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2008. — С. 340–344.

Поступила в редакцию 09.04.2009 г.

Н.Ф. Кириленко, В.М. Кушнир, Е.М. Лемешко

ВЛИЯНИЕ РЕЧНОГО СТОКА НА ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ОБЛАСТИ ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА ПО ДАННЫМ КОНТАКТНЫХ И ДИСТАНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На основе комплексных исследований изучалось влияние речного стока Дуная и Днепра на экологическое состояние северо-западного шельфа Черного моря. Для анализа использовалась следующая информация: концентрация хлорофилла *a*, индекс вегетации NDVI, яркость нормализованного исходящего излучения на различных длинах волн, температура поверхности океана по данным сканеров типа SeaWiFS, MODIS, NOAA. Получена взаимосвязь расходов воды Дуная и Днепра с изменчивостью концентрации хлорофилла *a* и индекса североатлантического колебания NAO. Показано, что имеется хорошо выраженная взаимосвязь между площадью гипоксии и индексом NDVI. Площадь гипоксии может быть оценена на основе полученных соотношений по спутниковым данным. Результаты статьи могут быть использованы для дистанционного мониторинга экологических условий региона.

Н.Ф. Кириленко, В.М. Кушнир, Е.М. Лемешко

ВПЛИВ РІЧКОВОГО СТОКУ НА ЕКОЛОГІЧНІ УМОВИ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОЇ ОБЛАСТІ ЧОРНОМОРСЬКОГО РЕГІОНУ ЗА ДАНИМИ КОНТАКТНИХ І ДИСТАНЦІЙНИХ ВИМІРЮВАНЬ

На основі комплексних досліджень вивчено вплив річкового стоку Дунаю і Дніпра на екологічний стан північно-західного шельфу Чорного моря. Для аналізу використано таку інформацію: концентрація хлорофілу *a*, індекс вегетації NDVI, яскравість нормалізованого вихідного випромінювання на різних довжинах хвиль, температура поверхні океану за даними сканерів типу SeaWiFS, MODIS, NOAA. Отримано взаємозв'язок витрат води Дунаю і Дніпра з мінливістю концентрації хлорофілу *a* та індексу північноатлантичного коливання NAO. Показано, що є добре виражений взаємозв'язок між площею гіпоксії та індексом NDVI. Площа гіпоксії може бути оцінена на основі отриманих співвідношень за спутниковими даними. Результати статті можуть бути використані для дистанційного моніторингу екологічних умов регіону.