

УДК 551.468.4

Тучковенко Ю. С., к. физ.-мат. н., с.н.с.,

Сапко О. Ю.

Одесский государственный экологический университет

ЭВТРОФИРОВАНИЕ ВОД ОДЕССКОГО РАЙОНА СЕВЕРО-ЗАПАДНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ БЕРЕГОВЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ

Описаны основные черты гидрохимического режима вод акватории Одесского региона северо-западной части Черного моря на основе анализа данных экологического мониторинга. С помощью модели эвтрофикации получены оценки вклада береговых антропогенных источников загрязнения в эвтрофирование вод региона по сравнению с речным стоком. Оценены региональные возможности уменьшения эвтрофикации вод акватории.

Ключевые слова: Черное море, северо-западная часть, Одесский район, эвтрофикация, мониторинг, моделирование, управление.

Постановка задачи. Общеизвестно, что главный источник эвтрофирования вод северо-западной части Черного моря (СЗЧМ) – речной сток. В частности, на качество вод Одесского региона СЗЧМ прямое влияние оказывает речной сток Днестра и Южного Буга [1]. На побережье региона расположены промышленный, портовый и коммунальный комплексы городов Одесса, Ильичевск, Южный, со сточными водами которых в морскую среду также поступает значительное количество эвтрофирующих веществ (рис. 1). Подробное описание и сравнительная характеристика береговых антропогенных источников загрязнения вод Одесского региона приведены в работе [2]. Для разработки стратегии управления рекреационными и биологическими ресурсами этой акватории актуальна задача определения относительного вклада речного стока и береговых антропогенных источников в сложившийся уровень эвтрофикации вод.

Эффективность реализации различных природоохранных мероприятий на региональном уровне, включая нормирование сбросов загрязненных вод и увеличение степени их очистки, в конечном итоге, определяется степенью влияния береговых антропогенных источников загрязнения на качество вод и экологическую ситуацию в исследуемой акватории.

При сравнении вкладов речного стока и береговых антропогенных источников в формирование качества вод Одесского региона необходимо учитывать различную степень гидродинамического разбавления загрязненных вод, а также неконсервативность биогенных элементов, обусловленную их вовлеченностью в разнообразные биогеохимические процессы, протекающие в морской среде. Первая часть этой задачи была решена авторами в работе [3] с помощью численной гидродинамической модели [4]. Однако, как известно, неорганические биогенные вещества в общем случае не являются консервативными и активно утилизируются фитопланктоном при фотосинтезе, а также регенерируются при минерализации органического вещества. Поэтому целесообразно получить аналогичные оценки с использованием трехмерной модели эвтрофикации [5].

Цель представляемой работы заключалась в оценке вкладов береговых антропогенных источников и речного стока Днестра и Южного Буга в эвтрофирование вод Одесского района СЗЧМ на основе данных экологического мониторинга и моделирования с учетом неконсервативности биогенных веществ.

Материалы и методы. Современное экологическое состояние вод Одесского района СЗЧМ оценивалось на основе данных мониторинга, проведенного Одесским филиалом Института биологии южных морей в период 1988-1999 гг. Мониторинг состоял из сезонных гидрохимических съемок. Всего за указанный период была проведена 31 комплексная съемка, с общим числом станций - 557. Программа мониторинга предусматривала ежегодное выполнение от 1 до 6 съемок акватории Одесского региона, на которых в поверхностном и придонном слоях определялись: температура и соленость воды, прозрачность, содержание биогенных и органических веществ, растворенного кислорода, биохимическое потребление кислорода, концентрация хлорофилла «а» (начиная с 1992 г.). Эпизодически отбирались количественные пробы фитопланктона.

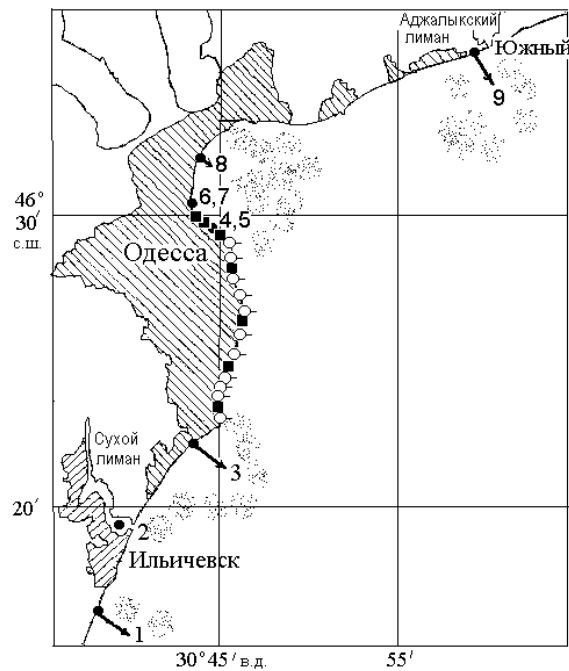


Рис. 1 Основные источники загрязнения морской среды Одесского региона: 1, 2 – г.Ильичевск и Ильичевский морской торговый порт (ИМТП); 3 – СБО «Южная»; ■ – ливневыпуски; О – дренажные выпуски; 4 – объекты Одесского порта; 5 – СРЗ «Украина»; 6 – ЗАО «Одесская сахарная компания»; 7 – ОТЭЦ; 8 – СБО «Северная»; 9 – Одесский припортовый завод (ОПЗ)

Осредненные по пространству полигона данные мониторинга использовались для калибровки параметров численной модели эвтрофикации вод исследуемого района СЗЧМ [5]. Гидродинамический блок модели реализован в криволинейной по вертикали системе координат, оснащен блоком усвоения гидрометеорологической информации на границах расчетной области и позволяет воспроизводить пространственно-временную изменчивость уровня моря, термохалинной структуры вод, полей консервативной примеси, трехмерного поля течений и интенсивности турбулентного обмена на временных отрезках от нескольких суток до годового цикла в акваториях морского шельфа со сложными морфологическими и гидрологическими характеристиками [4]. Характерная особенность модели – возможность ее использования для расчетов динамики вод и распространения примеси на морских акваториях, отдельные участки

которых имеют меньший масштаб в одном из горизонтальных направлений, чем шаг расчетной сетки (например, проливы, каналы, устья рек).

Химико-биологический блок модели эвтрофикации представляет собой замкнутую систему дифференциальных уравнений, которые описывают биогеохимические циклы биогенных элементов, продукцию и деструкцию органического вещества, динамику кислорода в локальной точке водной среды. Переменными блока являются: фитопланктон, фосфор фосфатов, азот аммония, нитратов, растворенный органический фосфор и азот, взвешенный органический фосфор и азот, детритная и растворенная части биохимического потребления кислорода, растворенный кислород.

Результаты экологического мониторинга. Анализ средних сезонных значений гидрохимических характеристик поверхностных вод исследуемой акватории свидетельствует, что минимальные (7-9 мкгР/л) концентрации фосфатов наблюдаются весной и летом. Концентрация аммония минимальна весной (70-80 мкгN/л) и достигает максимальных значений летом – в прибрежной зоне моря (до 164 мкгN/л). Минимум содержания нитритов и нитратов (20-30 мкгN/л) отмечается весной, а максимум (80-90 мкгN/л) – осенью в прибрежной зоне моря. В течение всего года концентрация аммонийного азота доминирует над нитратами.

Сравнение средних сезонных концентраций минеральных форм азота и фосфора в поверхностном слое Одесского региона с их предельными, для лимитирования продукции фитопланктона, значениями (100 мкгN/л и 15 мкгР/л), позволяет предположить, что фотосинтез органического вещества в весенне-летний период может лимитироваться скорее недостатком минерального фосфора, чем азота.

В весенне-летний период, когда утилизация биогенных элементов фитопланктоном при фотосинтезе в фотическом слое максимальна, а массообмен между поверхностным и придонным слоями затруднен наличием пикноклина, отличия в средних сезонных концентрациях аммонийного азота между этими слоями не превышают 15 % в прибрежной зоне и 27 % - в мористой части акватории, в то время как для минерального фосфора разница концентраций достигает, соответственно, 65 и 140 %.

Концентрация органических форм азота и фосфора в весенне-летний период года многократно (в среднем в 2-3 раза для фосфора и 3-6 раз для азота) превышает концентрацию их минеральных форм. Осенью соотношение между органической и минеральной формами фосфора уменьшается до 1 и менее, а для азота остается прежним. Максимальное содержание органического азота (730 мкгN/л) и фосфора (27 мкгР/л) отмечается осенью в прибрежной зоне моря.

Соотношение между концентрацией в воде минеральных форм азота и фосфора N:P в течение года составляет в среднем 10:1, в то время как для органического вещества оно повышается до 30:1.

В целом, в фотическом слое прибрежной зоны исследуемой акватории средние концентрации аммонийного азота и фосфатов во все сезоны года превышают концентрации характерные для мористой части акватории (рис. 2). Максимальных значений это превышение достигает в летний сезон в поверхностном слое и составляет 80 % для аммония и 100 % для фосфатов. Прибрежные воды в весенне-летний период года содержат меньше нитратов и нитритов, чем воды открытой части акватории. И только осенью в прибрежной зоне их концентрация больше, чем в мористой части акватории, на 78 % - в поверхностном и 148 % - в придонном слое.

Повышенные концентрации фосфатов и аммония в прибрежной зоне Одесского региона объясняются влиянием коммунально-бытовых, ливневых, дренажных и

промышленных стоков городов-портов Одесса, Южный, Ильичевск (рис. 1), а также особенностями гидрологического режима акватории [1].

Результаты моделирования. Расчетная область (ограниченная координатами $46^{\circ}07' - 46^{\circ}38'$ с. ш., $30^{\circ}30' - 32^{\circ}17'$ в. д.) аппроксимировалась пространственной сеткой 68×32 узла с шагом 2000 м. Использовались десять расчетных уровней по глубине в σ -системе координат. Расчет велся с усвоением гидрометеорологической информации за 1986 г. с первой декады марта по конец августа, с учетом сезонной изменчивости расходов речного стока Днепра и Южного Буга. Не учитывался ливневой сток, который имеет эпизодический характер.

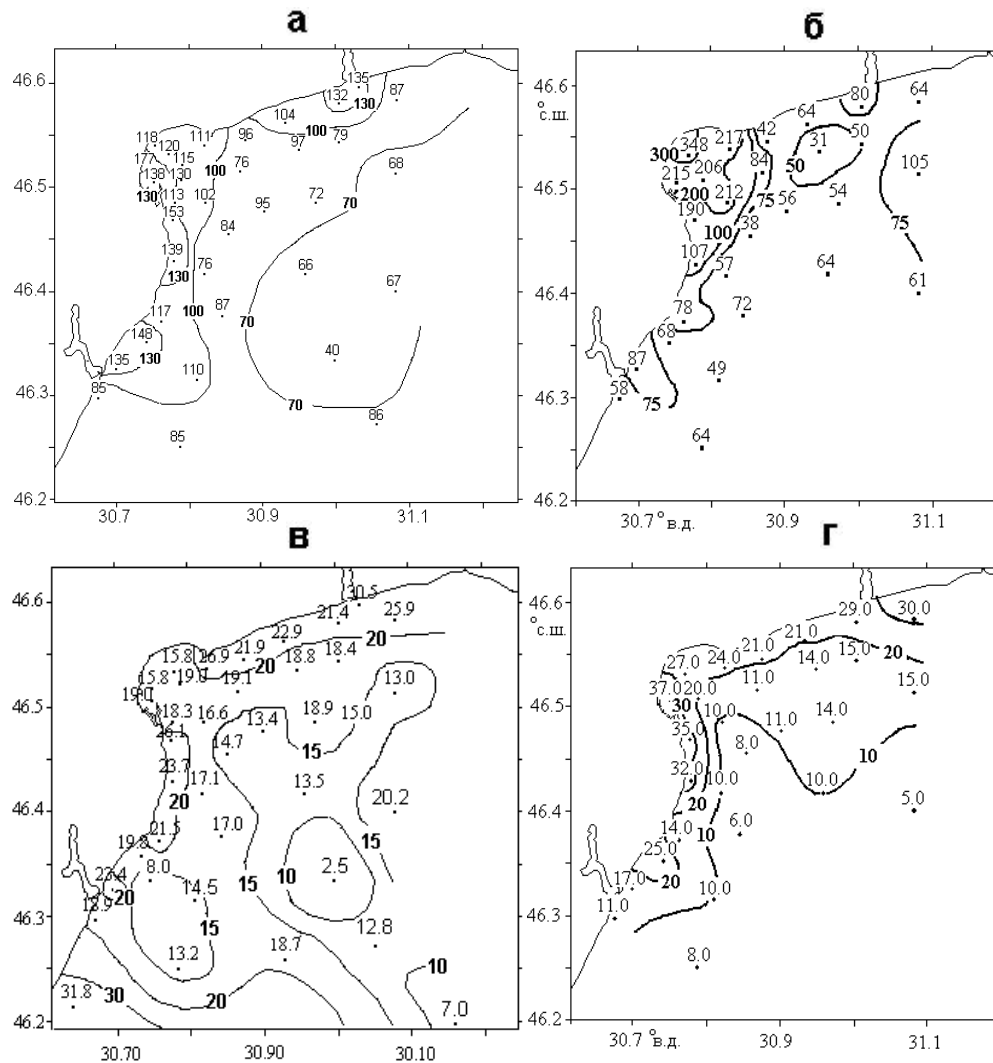


Рис. 2 Распределение в поверхностном слое Одесского региона СЗЧМ аммонийного азота, мкгN/л, за весь период мониторинга (а) и в мае 1998 г. (б), фосфора фосфатов, мкгP/л, за весь период мониторинга (в) и в сентябре 1999 г. (г)

Для оценки относительного вклада береговых антропогенных источников загрязнения в поддержание современного, достаточно высокого уровня трофности вод Одесского региона, использовалось выражение вида:

$$\eta_{i,j} = \left(C_{i,j}^{r+a} / C_{i,j}^r - 1 \right) \cdot 100\% ,$$

где $\eta_{i,j}$ – процент вклада береговых антропогенных источников загрязнения в суммарную концентрацию биогенного вещества в морской среде; $C_{i,j}^{r+a}$ – концентрация биогенного вещества в узле (i, j) расчетной сетки при учете сбросов береговых источников и речного стока, $C_{i,j}^r$ – концентрация биогенного вещества в том же узле при учете только речного стока.

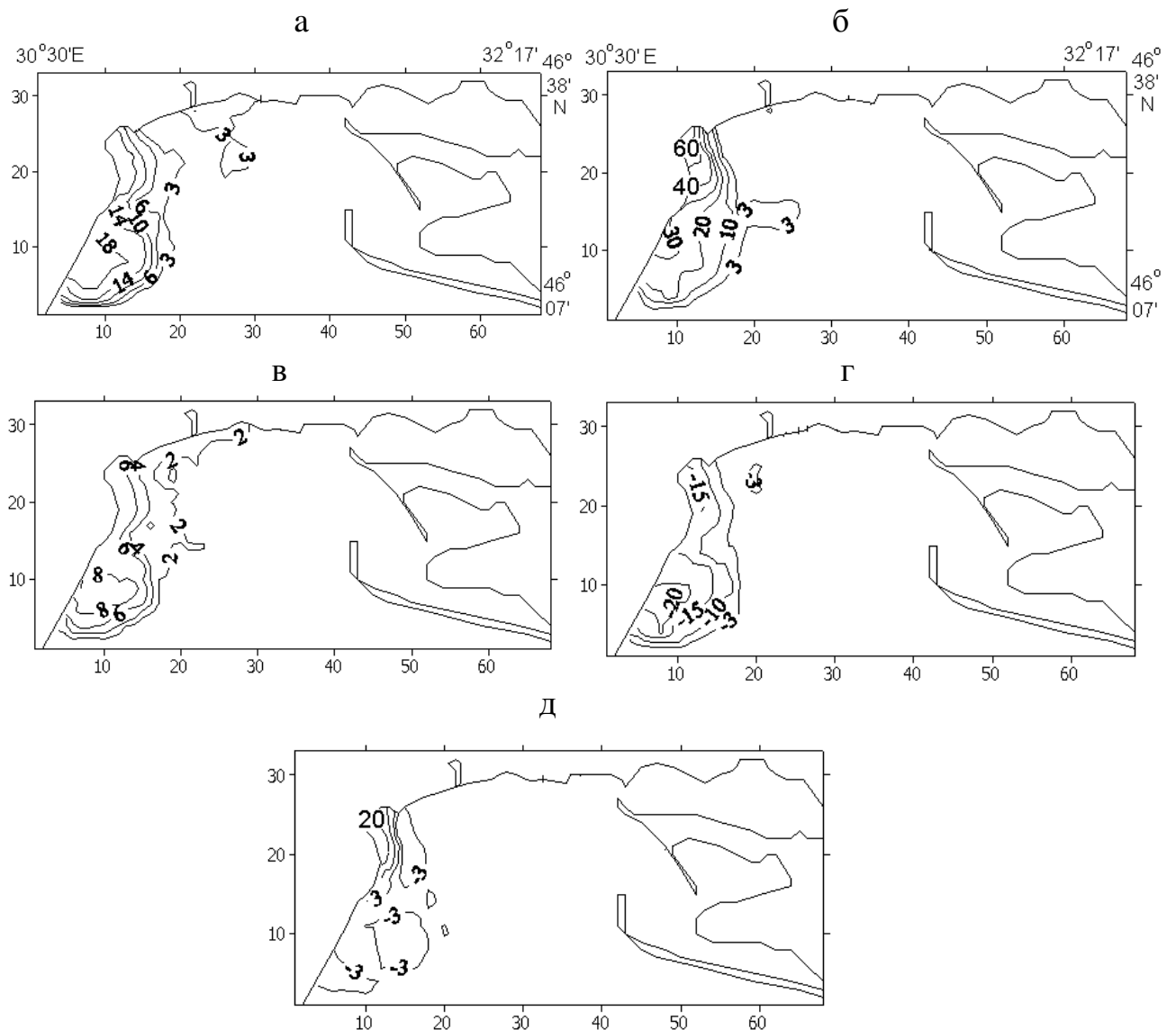


Рис. 3 Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации на конец апреля вклад (в %) береговых антропогенных источников Одесского региона в формирование в фотическом слое СЗЧМ биомассы фитопланктона (а), фосфора фосфатов (б), БПК₅ (в), аммонийного (г) и нитратного (д) азота

Полученные с использованием модели эвтрофикации сезонные оценки вкладов береговых антропогенных источников загрязнения в формирование наблюдаемых в Днепро-Бугском районе СЗЧМ концентраций минеральных форм биогенных элементов и органического вещества приведены на рис. 3 - 4. Видно, что весной (рис. 3), при горизонтальном шаге расчетной сетки 2000 м, сбросы береговых источников обеспечивают прирост биомассы фитопланктона в Одесском регионе от 3 (в мористой части) до 18 % (в прибрежной зоне), содержания БПК₅ – до 8 %, фосфатов – до 30 - 60 % от значений этих характеристик, обусловленных внутриэкосистемными биохимическими процессами трансформации веществ и влиянием речного стока Днепра и Южного Буга.

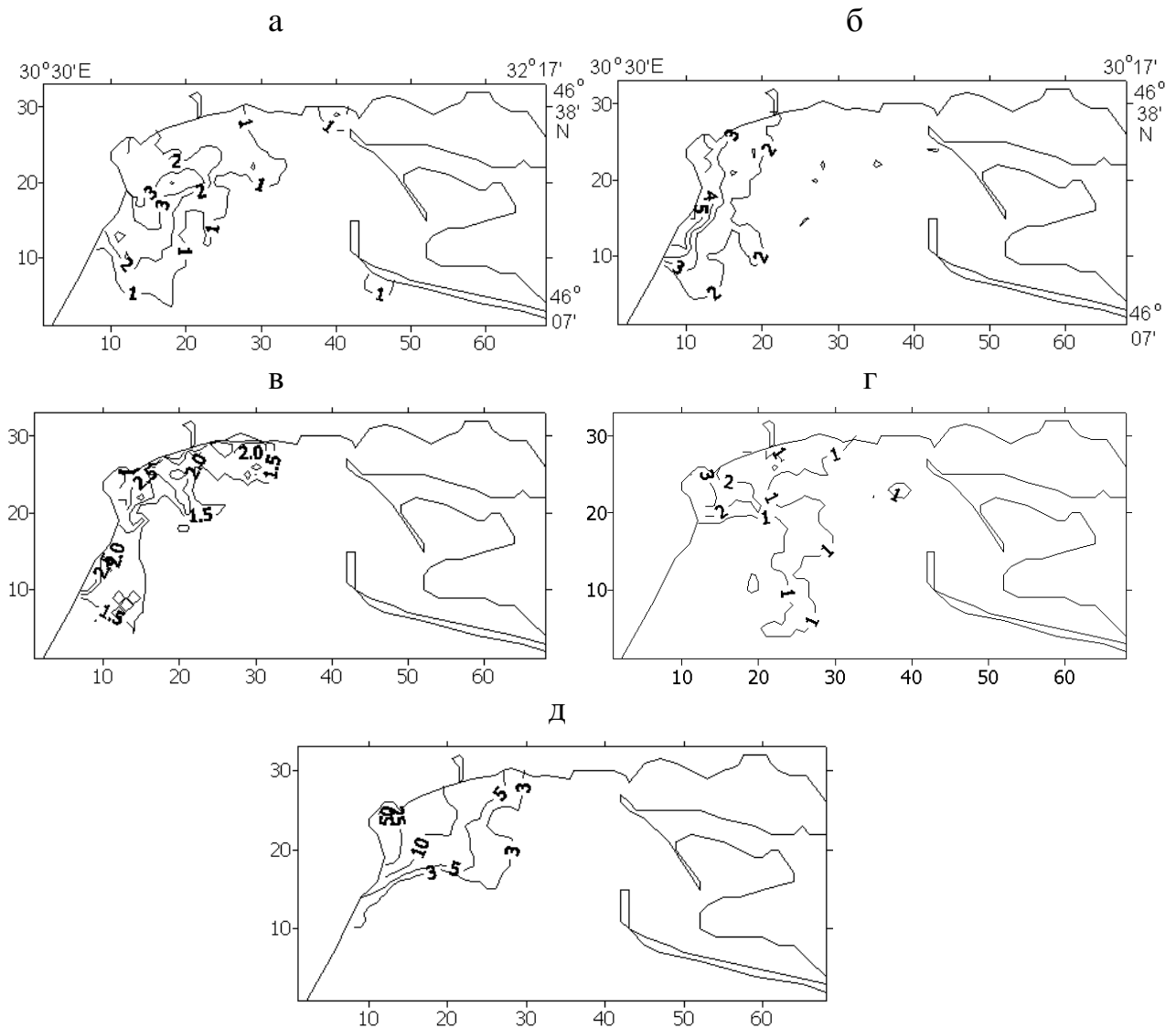


Рис. 4 Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации для середины августа вклад, в %, береговых антропогенных источников загрязнения Одесского региона в формирование в фотическом слое СЗЧМ биомассы фитопланктона (а), фосфора (б), БПК₅ (в), аммонийного (г) и нитратного (д) азота

Интенсивное поступление фосфатов со сточными водами береговых источников приводит к росту темпов синтеза органического вещества и потребления минерального

азота фитопланктоном. В результате, содержание аммонийного азота и, в меньшей мере, нитратов в водах исследуемой акватории снижается. Экстремальные значения вкладов береговых антропогенных источников в загрязнение морской среды соответствуют районам сброса сточных вод СБО «Северная» и «Южная».

Оценки вклада береговых источников для летнего сезона приведены на рис. 6. Несмотря на уменьшение речного стока, прямой вклад береговых источников в эвтрофирование вод Одесского региона значительно снижается по сравнению с весенним периодом года. Объясняется это тем, что наблюдаемая летом в фотическом слое температура воды 20 - 23 °С является оптимальной для процессов минерализации органического вещества. Как следствие, обусловленный этими процессами приток минеральных форм биогенных элементов становится сравнимым с поставками береговых антропогенных источников загрязнения.

Описанные выше оценки вкладов получены при масштабе начального разбавления сточных вод 4 км² и, следовательно, справедливы при рассмотрении Одесского региона в целом, как обширного района СЗЧМ, ограниченного траверсами Сухого и Аджалыкского лиманов. Если же рассматривать отдельно прибрежную зону моря, то очевидно, что по мере приближения к источникам загрязнения их вклад в формирование качества вод будет возрастать.

На рис. 4 - 5 приведены оценки вклада береговых антропогенных источников в эвтрофирование вод Одесского региона СЗЧМ, полученные с использованием модели эвтрофикации и формулы (1) при масштабе начального разбавления 0.25 км² (горизонтальный шаг расчетной сетки 500 м). Расчеты проводились только для акватории Одесского региона (см. рис. 1), которая покрывалась горизонтальной расчетной сеткой 61 x 72 узла с пространственным шагом 500 м. Счет велся на 30 суток модельного времени при гидрометеорологических условиях августа 1986 г. Начальное распределение моделируемых характеристик по глубине и их изменчивость на морских границах рассматриваемой акватории задавались исходя из результатов расчетов для всего Днепровско-Бугского приустьевых участка СЗЧМ. Распределение характеристик в горизонтальной плоскости полагалось однородным. Для уменьшения влияния граничных условий на получаемые результаты, расчеты проводились при фиксированной пространственной термической структуре вод, в то время как остальные моделируемые переменные, включая соленость, рассчитывались в прогностическом режиме.

Одним из наиболее мощных, в количественном отношении, береговых антропогенных источников загрязнения вод Одесского региона СЗЧМ является СБО «Северная». Она не оснащена глубоководным выпуском сточных вод и сброс осуществляется на расстоянии 300 м от берега в мелководную прибрежную зону. Поэтому регламент ее эксплуатации в режиме минимизации экологического риска предполагает сброс сточных вод в период с мая до середины сентября не в море, а в Хаджибейский лиман. Именно этот вариант эксплуатации СБО «Северная» рассматривался в предыдущих расчетах. Однако, в последние несколько лет, из-за достижения максимальных критических отметок уровня воды в Хаджибейском лимане, сброс сточных вод с СБО «Северная» в мелководную прибрежную зону моря осуществляется в течение всего года. Поэтому оценка вклада береговых антропогенных источников в формировании уровня трофности вод Одесского региона в летний период выполнялась в двух вариантах: при наличии сброса с СБО «Северная» в море и при его отсутствии.

Расчеты показали (рис. 4 - 5), что как и следовало ожидать, при уменьшении масштаба начального разбавления сточных вод до 0.25 км² и детализации прибрежной зоны моря с горизонтальным пространственным шагом 500 м роль антропогенных

источников в формировании концентраций минеральных форм биогенных элементов и органического вещества возрастает. При отсутствии сброса с СБО «Северная», максимальные значения оценок прироста биомассы фитопланктона ($> 7\%$), БПК₅ ($> 8\%$) и фосфатов (75 %) отмечаются в прибрежной зоне в районе расположения СБО «Южная». Существенный прирост концентраций нитратов (до 40 %) отмечается за счет поступления дренажных вод. Содержание аммонийного азота изменяется незначительно (до 3 %), т.к. он активно усваивается фитопланктоном при интенсификации фотосинтеза, обусловленного дополнительным поступлением фосфатов из береговых антропогенных источников, в результате чего роль лимитирующего продукцию фитопланктона биогенного элемента переходит от минерального фосфора к минеральному азоту.

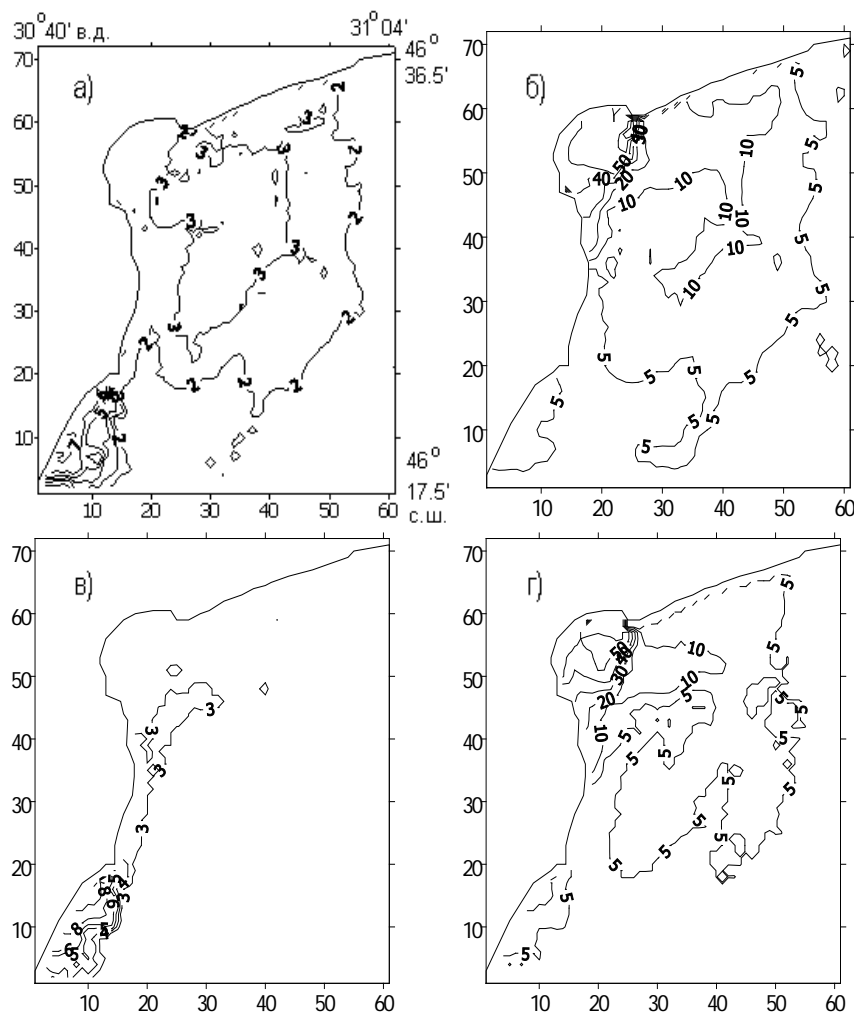


Рис. 7 Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации для середины августа вклад, в %, береговых антропогенных источников загрязнения в формирование в фотическом слое Одесского региона СЗЧМ биомассы фитопланктона (а, б) и содержания БПК₅ (в, г) при отсутствии (а, в) и наличии (б, г) сброса из СБО «Северная»

При сбросе сточных вод с СБО «Северная» в прибрежную зону моря в летний период она является существенным источником эвтрофирования морской среды Одесского региона. Концентрация фосфатов и нитратов в Одесском заливе возрастает до 3 - 5 раз, биомасса фитопланктона и величина БПК₅ – на 50 % (рис. 7 - 8).

Содержание аммонийного азота, в силу указанных выше причин, на большей части акватории уменьшается на 2 - 5 %.

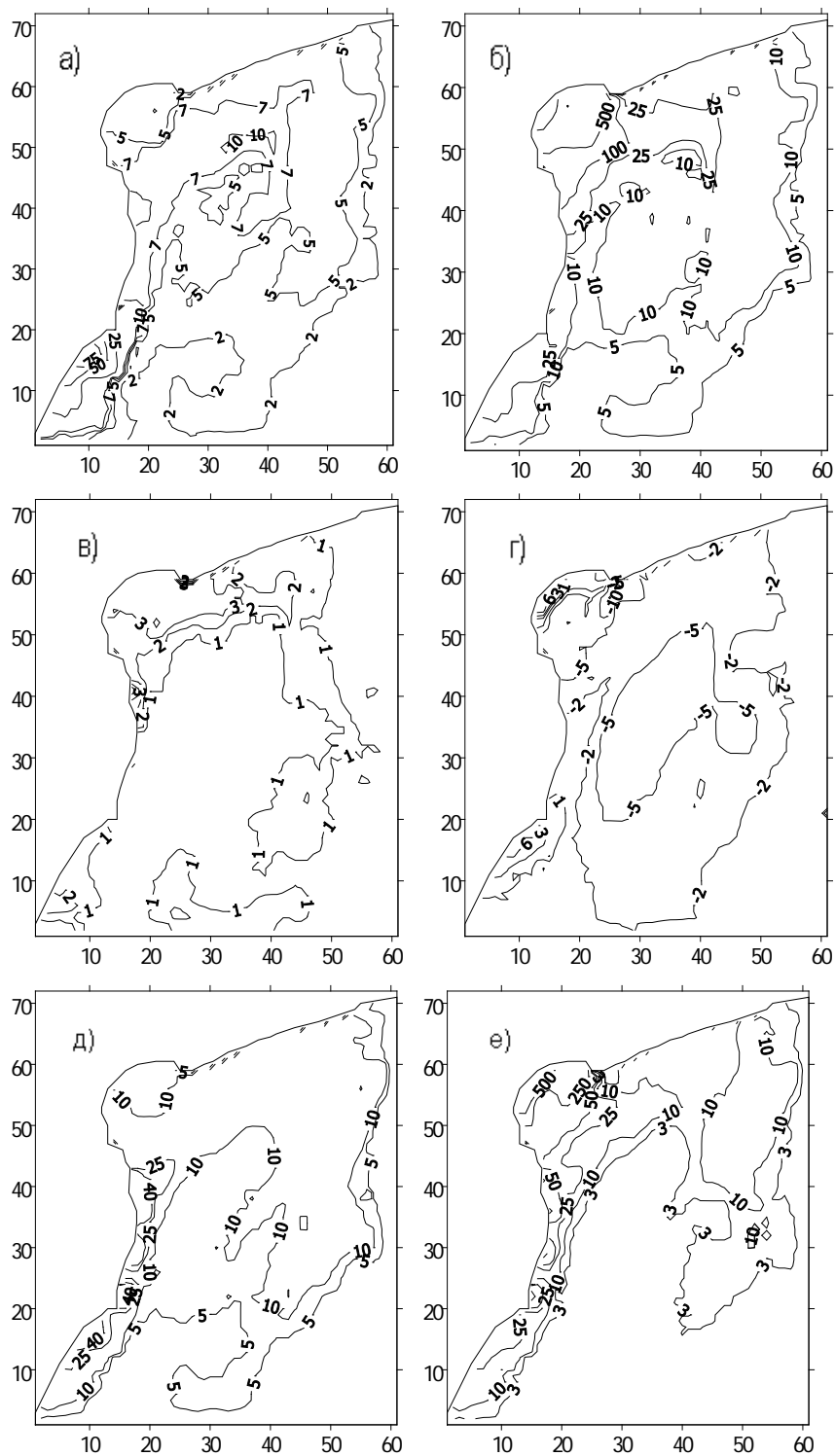


Рис. 8 Рассчитанный с помощью модели эвтрофикации для середины августа вклад, в %, береговых антропогенных источников загрязнения в формирование в фотическом слое Одесского региона СЗЧМ содержания фосфора фосфатов (а, б), азота аммония (в, г) и нитратов (д, е) при отсутствии (а, в, д) и наличии (б, г, е) сброса из СБО «Северная»

Таким образом, расчеты с использованием модели эвтрофикации показали, что при дискретизации акватории с горизонтальным пространственным шагом 2 км в весенний период функционирование береговых антропогенных источников загрязнения приводит к повышению биомассы фитопланктона на 3 - 20 %, величины БПК₅ – на 2 - 9 %, содержания фосфатов – до 60 %. Избыточное поступление фосфатов со сточными водами приводит к интенсивному поглощению минерального азота фитопланктоном при фотосинтезе и переходу к нему роли лимитирующего фотосинтез биогенного элемента.

В летний период интенсифицируются внутриэкосистемные процессы регенерации неорганических форм биогенных элементов в ходе минерализации органического вещества. Уменьшается время прохождения биогенными элементами их биогеохимических циклов. При оптимальном режиме эксплуатации, летом прекращается сброс сточных вод с СБО «Северная» в море. Обостряется сезонный пикноклин, затрудняющий поступление сточных вод с заглубленных выпусков в фотический слой. В результате, роль береговых антропогенных источников как поставщика биогенных элементов и стимулятора процесса первичного продуцирования органического вещества существенно уменьшается. В частности, прирост биомассы фитопланктона, обусловленный сбросами береговых источников, уменьшается до 3 %, концентрации фосфатов – до 5 %, аммония – до 3 %, БПК₅ – до 2.5 %.

При детализации пространственного разрешения до 500 м вклад береговых антропогенных источников в формирование наблюдаемых в летний период в прибрежной зоне моря концентраций фосфатов возрастает – до 75 %, фитопланктона – до 7 %, БПК₅ – до 8 %.

Экологическая ситуация в Одесском районе СЗЧМ и особенно в Одесском заливе существенно ухудшается при наличии сброса сточных вод с СБО «Северная» в море в летний период года. При этом биомасса фитопланктона и БПК₅ в водах Одесского залива увеличивается на 50 %, содержание фосфатов и нитратов – в 2 - 5 раз.

Выводы. Результаты экологического мониторинга Одесского района СЗЧМ свидетельствуют о высоком уровне эвтрофикации вод акватории. Максимальные концентрации фосфатов и азота аммония наблюдаются в прибрежной зоне района, что подтверждает существенную роль в эвтрофировании береговых антропогенных источников.

Результаты моделирования показали, что вклад береговых источников значим в весенний период. Однако летом, в результате интенсификации биогеохимических процессов регенерации минеральных форм биогенных элементов, в случае когда СБО «Северная» работает в рекомендуемом режиме сброса сточных вод не в море, а в Хаджибейский лиман, функционирование береговых антропогенных источников не оказывает существенного влияния на экологическую ситуацию в открытой морской части акватории Одесского региона СЗЧМ. Следовательно, наиболее эффективно нормирование сбросов биогенных веществ береговыми источниками в весенний период. Причем предпочтительно уменьшать сбросы фосфорсодержащих веществ, как биогенного элемента лимитирующего первичную продукцию органического вещества фитопланктоном.

Сброс сточных вод с СБО «Северная» в море в летний период приводит к доминированию этого источника в эвтрофировании вод Одесского залива и значительному усилению эвтрофикации вод акватории региона в целом.

Приведенные значения оценок вклада береговых антропогенных источников в формирование уровня трофности вод Одесского региона СЗЧМ показывают насколько региональные природоохранные мероприятия могут улучшить современную экологическую ситуацию в этой акватории, в целом, и ее прибрежной зоне, в

частности. Для достижения более радикального улучшения необходимо осуществление мероприятий по повышению качества речных вод на общегосударственном уровне.

Литература

1. Тучковенко Ю.С., Доценко С.А., Дятлов С.Е., Нестерова Д.А., Скрипник И.А., Кирсанова Е.В. Влияние гидрологических условий на изменчивость гидрохимических и гидробиологических характеристик вод Одесского региона северо-западной части Черного моря // Морской экологический журнал. – Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2004.–Т. 3, № 4. – С. 75 - 85.
2. Тучковенко Ю.С., Сапко О.Ю. Оценка вклада антропогенных источников Одесского региона в загрязнение морской среды // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.– 2003.– № 47. – С. 130 - 139.
3. Тучковенко Ю.С., Сапко О.Ю. Вклад антропогенных источников в эвтрофирование морской среды Одесского региона с учетом гидродинамического разбавления // Метеорологія, кліматологія та гідрологія.– 2004.– № 48. – С. 298 - 303.
4. Тучковенко Ю.С. Математическая модель формирования термохалинной структуры и циркуляции вод в лиманах, приустьевых и шельфовых областях северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2003.– С. 138 - 153.
5. Тучковенко Ю.С. Трехмерная математическая модель качества вод Днепровско-Бугского приустьевого района северо-западной части Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: НАН Украины, МГИ.– 2005.– Вып. 12.– С. 374 - 391.

EUTROPHICATION OF WATERS IN THE ODESSA REGION OF NORTHWESTERN PART OF THE BLACK SEA BY COASTAL POLLUTERS

Y. S. Tuchkovenko, O.Y. Sapko

Odessa state environmental university

On the base of ecological monitoring of northwestern part of the Black Sea (Odessa Region) the basic features of a hydrochemical regime of waters in the defined area are described. With the help of eutrophication model estimations the contribution of coastal anthropogenic sources of pollution in eutrophication of water area are obtained in comparison with a river drain. The regional possibilities of decrease of an eutrophication of the water area are appreciated.

Keywords: Black Sea, northwest part, Odessa area, eutrophication, monitoring, simulation, management

ЄВТРОФУВАННЯ ВОД ОДЕСЬКОГО РАЙОНУ ПІВНІЧНО-ЗАХІДНОЇ ЧАСТИНИ ЧОРНОГО МОРЯ БЕРЕГОВИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЗАБРУДНЕННЯ

Ю. С. Тучковенко, О. Ю. Сапко

Одеський державний екологічний університет

На основі аналізу даних екологічного моніторингу описані основні риси гідрохімічного режиму вод акваторії Одеського регіону північно-західної частини Чорної моря. За

допомогою моделі евтрофікації отримані оцінки внеску берегових антропогенних джерел забруднення в евтрофування вод регіону у порівнянні з річковим стоком. Оцінено регіональні можливості зменшення евтрофікації вод акваторії.

Ключові слова: Чорне море, північно-західна частина, Одеський район, евтрофікація, моніторинг, моделювання, управління