

К.А.Слепчук, Е.Е.Совга

*Морской гидрофизический институт РАН, г.Севастополь***УРОВЕНЬ ЭВТРОФИРОВАНИЯ ВОСТОЧНОГО РАЙОНА
СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ИНДЕКСА E-TRIX**

Проведен анализ экологического состояния восточного района Севастопольской бухты по уровню эвтрофирования с использованием индекса E-TRIX. Рассчитана годовая динамика биогенных элементов, входящих в формулу индекса, с использованием одномерного варианта модели качества воды, откалиброванной для данной акватории. Получены коэффициенты корреляции E-TRIX с параметрами индекса, дана оценка вкладов входящих в E-TRIX параметров.

Осуществлено сравнение годового хода индекса E-TRIX восточной части бухты, Южной бухты и всей Севастопольской бухты.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Севастопольская бухта, уровень трофности, модель качества вод*

doi:10.22449/2413-5577-2018-2-53-59

Введение. Севастопольская бухта, являясь водоемом эстуарного типа, имеет ограниченный водообмен с открытым морем. Основными факторами, определяющими естественные свойства вод в бухте, являются взаимодействие с атмосферой, сток пресных вод р.Черной в восточную часть бухты и приток соленых морских вод через входной пролив в ее западной части [1]. Как акватория активного хозяйственного использования, Севастопольская бухта фактически выполняет роль резервуара, в который поступают промышленные и хозяйственно-бытовые сточные воды, а также ливневые воды с площади водосбора. Ежедневно в бухту сбрасывается до 10 – 15 тыс. м³ неочищенных или условно-чистых вод, с которыми в акваторию попадает широкий спектр загрязняющих веществ в концентрациях, значительно превышающих допустимые нормы. В зависимости от локализации источников загрязнения, морфометрии и гидрометеорологических условий, в Севастопольской бухте образуются как относительно «чистые» зоны, так и зоны устойчивого высокого уровня загрязнения.

В последние годы большое внимание уделяется исследованию экологической обстановки в Севастопольской бухте, в связи с чем были проведены достаточно подробные исследования гидрологической, гидрохимической и гидробиологической структуры ее вод [1 – 3]. В работе [2] бухта была разделена на районы загрязнения по уровню содержания фосфатов, силикатов, нитратов, нитритов, ионов аммония и количеству взвешенного вещества в поверхностном слое по данным исследований бухты в период с 1998 по 2000 гг. Были выделены районы слабого (западный район, W), умеренного (восточный район, E), сильного (центральный район, C) и очень сильного

© К.А.Слепчук, Е.Е.Совга, 2018

(Южная бухта, S) загрязнения (рис.1). Оценка эвтрофирования морских акваторий позволяет уточнить текущее состояние и перспективу развития экосистем выделенных районов. Однако не существует универсального метода оценки уровня трофности морских вод. На практике для каждой акватории расчет экологический индексов определяется набором измеряемых параметров и показателей морской среды.



Рис. 1. Севастопольская бухта и ее районы по уровням загрязнения вод (по [2]): районы слабого (W), умеренного (E), сильного (C) и очень сильного (S) загрязнения.

Индекс трофности вод E-TRIX [4, 5] является интегральным комплексным показателем, связанным с характеристиками первичной продукции фитопланктона (содержание фотосинтетических пигментов, в основном, хлорофилла «а») и концентрацией биогенных веществ. Преимущество E-TRIX перед многими другими показателями, с помощью которых также можно оценить качество вод, заключается в том, что для расчетов применяются стандартные характеристики гидрохимического и гидробиологического мониторинга. Это позволяет корректно проводить сравнительный анализ экологического состояния вод различных морских акваторий по уровню их трофности. Ранее в работе [6] проводился анализ состояния вод Севастопольской и Южной бухт по индексу E-TRIX с использованием биогеохимических параметров, рассчитанных по одномерному варианту модели качества вод MECCA (*Model for Estuarine and Coastal Current Assessment*) [7 – 9]. Основная цель настоящей работы – проведение анализа состояния вод восточного района Севастопольской бухты по уровню эвтрофирования.

Исследуемая часть бухты мелководна, ее средняя глубина составляет 4,7 м, максимальная 10,8 м. Загрязнение акватории происходит за счет выпуска сточных вод (без очистки) и аварийных выпусков в районе Нефтегавани, ТЭЦ и в устье р.Черная, где также имеются источники субмариной разгрузки. Расположенная в вершине Севастопольской бухты Нефтегавань функционирует с 1903 г. Донные илы в этом районе являются источником хронического загрязнения придонных вод нефтепродуктами. Прилегающая территория за вековой период также в значительной мере загрязнена нефтепродуктами, что в результате поверхностного смыва систематически вызывает загрязнение акватории [10].

Река Черная является основным источником питьевого водоснабжения г.Севастополя. Река, после двух водозаборов, принимает по пути от с.Штурмовое стоки организованных сбросов и сбросы сточных вод предприятий, расположенных в водоохраной зоне. Так, в 3,4 км от места впадения р.Черной в бухту функционируют организованные выпуски оборотных вод очистных сооружений пос.Сахарная Головка с объемом стока 600 тыс. м³/год и промывных вод гидроузла № 3 [11]. Речные воды содержат весьма значительное количество биогенных веществ. В водах, поступающих в бухту с

речным стоком, максимальные концентрации биогенных элементов выше, чем в морской воде: аммония – в 5 – 7 раз, нитритов – в 1,5 – 2 раза, нитратов – в 1,6 раз, фосфатов – в 7 – 9 раз [2].

Материалы и методы исследования. Для оценки уровня трофности вод используется индекс E-TRIX, который является функцией отклонения от 100 % насыщения вод кислородом и концентраций общего фосфора, минеральных форм азота, хлорофилла «а» [4, 5]. Последний показатель характеризует первичную продукцию фитопланктона.

Согласно [4], индекс трофности определяется по формуле:

$$E-TRIX = (\lg[Ch \cdot D\%O \cdot N \cdot P] + 1,5)/1,2, \quad (1)$$

где Ch – концентрация хлорофилла «а», мкг/дм³, D%O – отклонение в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100 % насыщения; N – концентрация растворенной формы минерального азота, мкг/дм³; P – концентрация общего фосфора, мкг/дм³.

Значения индекса E-TRIX изменяются от 0 до 10 [4]. В зависимости от величины E-TRIX, воды подразделяются на четыре трофических уровня: низкий (< 4); средний (4 – 5); высокий (5 – 6) и очень высокий (6 – 10).

При значениях E-TRIX, превышающих 6, исследуемые районы моря характеризуются высоким содержанием биогенных веществ, низкой прозрачностью и возможностью возникновения гипоксии в придонных слоях воды. И, наоборот, при индексе эвтрофирования менее 4 концентрация главных биогенных элементов незначительная, воды хорошо аэрированы по всей толще и характеризуются высокой прозрачностью.

Необходимые для расчета индекса E-TRIX данные концентраций хлорофилла «а», растворенного кислорода, минерального азота, общего фосфора рассчитывались по одномерному варианту модели качества вод и ее блоку эвтрофикации [9].

Для Севастопольской бухты модель была откалибрована и хорошо рекомендовала себя при расчетах гидрохимических характеристик бухты в целом и отдельных ее частей [12, 13].

В качестве входных параметров модели использовались метеоданные за 2005 г.: скорость и направление ветра; температура воздуха; фотосинтетически активная радиация; влажность и балл облачности; годовой расход и сток растворенных веществ, содержащихся в речной воде. Также использовался годовой ход прозрачности, значения температуры морской воды, солености, концентрации фитопланктона, биогенных элементов, кислорода, органического фосфора и органического азота, которые задаются на 1 января расчетного года.

Результаты исследований и их анализ. Для оценки уровня трофности вод Севастопольской бухты (включая Южную) и отдельно Южной бухты (район S) и восточной части бухты (район E) был рассчитан годовой ход химико-биологических характеристик качества вод, используемых при расчете индекса E-TRIX.

На рис.2 представлен годовой ход индекса E-TRIX восточной части бухты (E), Южной (S) бухты и всей Севастопольской бухты. В течение года величина E-TRIX изменялась в диапазоне от 3,34 до 4,57 для восточной части

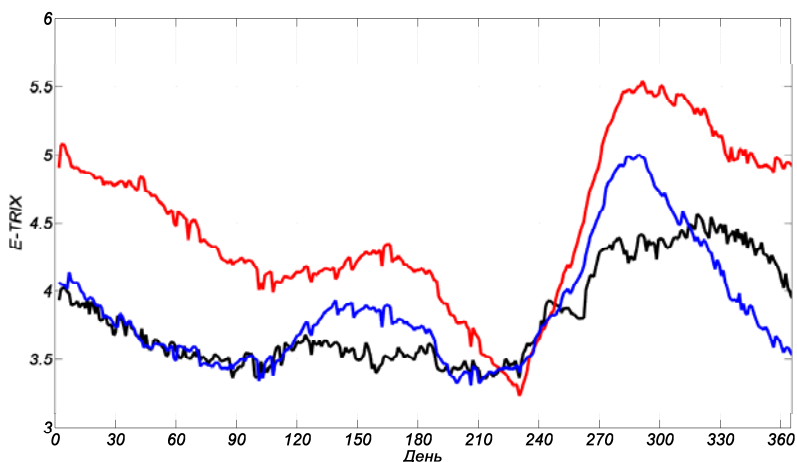


Рис. 2. Годовой ход индекса E-TRIX Южной бухты (красная кривая), Севастопольской бухты (синяя кривая), восточной части бухты (черная кривая).

бухты, от 3,23 до 5,55 для Южной бухты и от 3,31 до 5,01 для всей Севастопольской бухты. В среднем показатель трофности 3,81 для восточной части бухты ниже показателя Южной бухты ($E-TRIX_{\text{mean}} = 4,49$) и Севастопольской бухты ($E-TRIX_{\text{mean}} = 3,86$). Восточный район бухты относится к району умеренного загрязнения. Минимум E-TRIX в восточной части бухты ($E-TRIX_{\text{min}} = 3,34$) наблюдается в августе, максимум ($E-TRIX_{\text{max}} = 4,57$) – в ноябре. В целом качество вод восточной части бухты можно охарактеризовать как высокое с низким уровнем трофности, только с 264 по 363 расчетный день (с октября и почти до конца декабря) качество вод хорошее со средним уровнем эвтрофирования. С начала расчетного года до начала мая (118 день) уровень трофности в восточной части бухты совпадает со средним показателем всей бухты. Однако с начала мая по середину июля индекс E-TRIX ниже среднего по бухте, что можно объяснить небольшими концентрациями биогенных элементов по сравнению с другими районами бухты (например, Южной бухтой). Далее с середины сентября по середину октября (с 250 по 315 расчетный день) уровень трофности ниже среднего по бухте, однако, в декабре показатель индекса E-TRIX превышает средний по бухте, что связано с повышением концентраций фосфатов, нитратов, нитритов и аммония. В осенне-зимний период отмечается максимальное содержание биогенных элементов в водах Севастопольской бухты, что можно наблюдать на графиках годового хода E-TRIX в этот период (рис.2.)

По модельным данным для восточной части Севастопольской бухты рассчитаны коэффициенты корреляции между индексом E-TRIX и отклонением в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100 % насыщения, минеральным азотом, общим фосфором, хлорофиллом «а».

Наибольшие показатели коэффициента корреляции E-TRIX с хлорофиллом «а» ($r = 0,78$), что говорит о довольно хорошей связи значений индекса E-TRIX с данным параметром. С минеральным азотом ($r = 0,43$) и общим фосфором ($r = 0,48$), отклонением в абсолютных значениях содержания

растворенного кислорода от 100 % насыщения ($r = 0,49$) корреляция слабая.

Расчет относительного вклада компонентов, входящих в расчетную формулу E-TRIX, показал, что для вод восточной части бухты основной вклад приходится на минеральные формы азота (до 46 %, в среднем 38 %). Относительный вклад общего фосфора и отклонения в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100 % насыщения равнозначный и составляет в среднем 25 %. Концентрация хлорофилла «а» вносит отрицательный вклад в значение индекса E-TRIX (до – 31 %, в среднем – 21 %).

Для оценки влияния параметров входящих в расчетное уравнение значения E-TRIX осуществлялось последовательное исключение того или иного параметра (замены его на единицу) при расчете годового хода E-TRIX. Результаты представлены на рис.3. Показано, что вклад хлорофилла «а» получился отрицательный, т.к. модельные значения данного параметра меньше единицы, а замена его на единицу приводит к увеличению значения действительного E-TRIX. Остальные параметры, входящие в формулу E-TRIX, имеют значения больше единицы и исключение какого-либо из них приводит к уменьшению действительного значения E-TRIX.

Заключение. Моделирование годового хода биогеохимических параметров для восточной части Севастопольской бухты показал, что в среднем уровень эвтрофирования этого района ниже ($E-TRIX_{mean} = 3,81$), чем в среднем по всей бухте ($E-TRIX_{mean} = 3,86$). В целом уровень трофности восточного района можно охарактеризовать как низкий, только с октября и почти до конца декабря качество вод хорошее со средним уровнем эвтрофирования. Минимум E-TRIX наблюдается в августе, максимум – в ноябре. Однако почти весь декабрь уровень трофности восточного района Севастопольской бухты выше среднего по бухте, что объясняется высокими концентрациями минеральных форм азота и фосфора в данном районе. Концентрация хлоро-

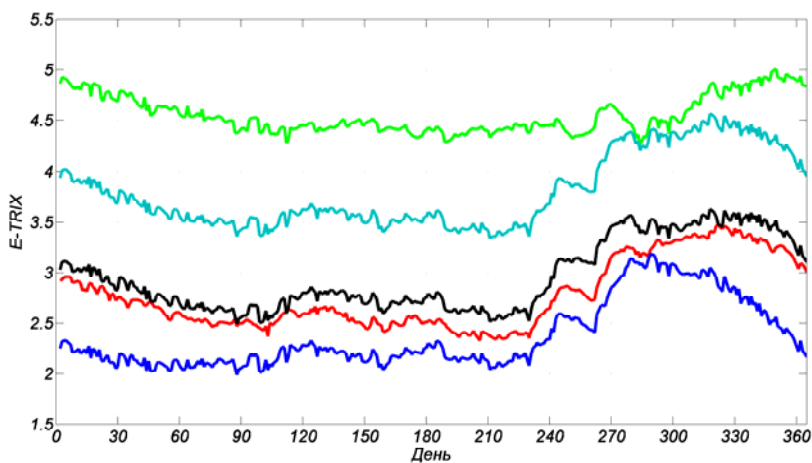


Рис. 3. Годовой ход индекса E-TRIX восточного района Севастопольской бухты без отдельных компонентов: без минерального азота (синяя кривая), без отклонения в абсолютных значениях содержания растворенного кислорода от 100% насыщения (красная кривая), без общего фосфора (черная кривая), истинный E-TRIX (голубая кривая), без хлорофилла «а» (зеленая кривая).

филла «а» в декабре снижается. Поступающие биогенные элементы с речными и сточными водами фитопланктоном не потребляются, что ведет к увеличению индекса трофности. При оценке связи значений индекса E-TRIX с его параметрами получено, что наибольшая корреляция наблюдается с хлорофиллом «а» ($r = 0,78$). Однако расчет относительного вклада компонентов, входящих в расчетную формулу E-TRIX, показал, что основным фактором, определяющим уровень эвтрофирования вод восточной части Севастопольской бухты, является концентрация минеральных форм азота.

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме 0827-2018-0004 «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование и эволюцию экосистем прибрежных зон Черного и Азовского морей» и частично по гранту РФФИ 18-45-920002 p_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов В.А., Михайлова Э.Н., Репетин Л.Н., Шапиро Н.Б.* Модель Севастопольской бухты. Воспроизведение вертикальной структуры полей температуры и солености в 1997-1999 годах // Морской гидрофизический журнал.– 2003.– № 4.– С.15-35.
2. *Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н., Романов А.С., Игнатьева О.Г.* Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов / Препринт.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 90 с.
3. *Атлас океанографических характеристик Севастопольской бухты / Под ред. акад. НАН Украины В.А.Иванова.*– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010.– 320 с.
4. *Vollenweider R.A., Giovanardi F., Montanari G., Rinaldi A.* Characterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index // *Environmetrics.*– 1998.– № 9.– P.329-357.
5. *Giovanardi F., Vollenweider R.A.* Trophic conditions of marine coastal waters: experience in applying the Trophic Index TRIX to two areas of the Adriatic and Tyrrhenian seas // *J. Limnol.*– 2004.– 63(2).– P.199-218.
6. *Слепчук К.А., Хмара Т.В., Маньковская Е.В.* Сравнительная оценка уровня трофности Севастопольской и Южной бухт с использованием индекса E-TRIX // Морской гидрофизический журнал.– 2017.– № 5.– С.67-78.
7. *Hess K.W.* Assessment model for estuarine circulation and salinity: Technical Memorandum / NOAA; National Environmental Satellite, Data, and Information Service.– NESDIS AISC 3.– USA, 1985.– 39 p.
8. *Hess K.W.* MECCA Programs documentation: Technical Report / NOAA.– NESDIS 46.– Washington, D.C., 1989.– 97 p.
9. *Иванов В.А., Тучковенко Ю.С.* Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских экосистем.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 368 с.
10. *Котельянец Е.А., Совга Е.Е., Мезенцева И.В.* Оценка экологического состояния Акватории Севастопольской бухты в зоне влияния стока реки Черной // I Меж-

дунар. экологический форум в Крыму «Крым – эколого-экономический регион. Пространство ноосферного развития».– Севастополь, 2017.– С.236-240.

11. *Кондратьев С.И.* Исследование гидрохимической структуры реки Черной (Крым) в 2006 – 2011 гг. // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2014.– вып.28.– С.176-185.
12. *Слепчук К.А.* Моделирование годовой динамики фитопланктона и биогенных элементов в акватории Севастопольской бухты с применением оптимизационного метода калибровки биогеохимической модели // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– 2014.– вып.28.– С.231-236.
13. *Иванов В.А., Мезенцева И.В., Совга Е.Е., Слепчук К.А., Хмара Т.В.* Оценки самоочищающей способности экосистемы Севастопольской бухты по отношению к неорганическим формам азота // Процессы в геосредах.– 2015.– № 2 (2).– С.55-65.

Материал поступил в редакцию 5.05.2018 г.
После доработки 28.05.2018 г.

К. А. Слепчук, Е. Е. Совга

EUTROPHICATION LEVEL OF THE EASTERN PART OF THE SEVASTOPOL BAY ON THE BASIS OF NUMERICAL MODELING OF E-TRIX INDEX

The analysis of ecological state of the eastern part of the Sevastopol Bay by the eutrophication level using E-TRIX index is carried out. Annual dynamics of nutrients, included in the index formula, is calculated using one-dimensional version of the water quality model calibrated for the mentioned water area. The coefficients of E-TRIX correlation with the index parameters are obtained, the contributions of the parameters included in E-TRIX are assessed. The comparison of E-TRIX index annual course in the eastern part of the bay, the Yuzhnaya Bay and the entire Sevastopol Bay is carried out.

KEYWORDS: the Sevastopol Bay, trophicity level, water quality model