

ГЕОГРАФИЯ И ГЕОЭКОЛОГИЯ

УДК 551.465 (262.5)

О.Г. Моисеенко¹, Н.А. Орехова², А.В. Полякова³, Е.В. Медведев⁴, С.К. Коновалов⁵ИНДЕКСЫ И ПОКАЗАТЕЛИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СТАТУСА СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ⁶

Для оценки состояния и степени трансформации морской среды под влиянием антропогенных и климатических изменений разработаны и апробированы на примере Севастопольской бухты нормированные индексы и показатели экологического статуса прибрежной акватории.

Водная среда и донные отложения представляют собой две основные составляющие морских систем. Расчет индексов и показателей экологического статуса водной среды осуществлялся с использованием специализированного программного продукта, представляющего собой постоянно обновляемый интерактивный цифровой атлас океанографических характеристик Севастопольской бухты. Для оценки состояния донных отложений определен ансамбль индексов: PLI_{site} – индекс загрязнения, величина γ – характеристика цикла углерода и t_{O_2} – время истощения кислорода.

С использованием полученных значений PLI_{site} выполнено районирование акватории бухты по степени загрязнения и выделены четыре провинции: восточная (слабо загрязненная), центральная и южная (загрязненные), западная (чрезвычайно загрязненная).

Рассчитанная величина γ для донных отложений бухты свидетельствует об изменениях цикла углерода в сторону преимущественного образования C_{org} и его накоплении в донных отложениях. Это приводит к увеличению потребления кислорода и развитию его дефицита, что можно оценить по времени истощения кислорода (t_{O_2}), максимально оно составило 109 дней. Эти результаты указывают на неблагоприятные изменения экологического состояния бухты.

Разработанный вариант цифрового атласа позволяет рассчитывать индикаторы с разным уровнем интегрирования в пространстве и времени, а также анализировать пространственно-временные изменения индикаторов и характеристик состояния морской среды. Он используется при принятии решений по управлению различными видами деятельности в прибрежной зоне Севастопольской бухты.

Ключевые слова: индекс загрязнения PLI , характеристика цикла углерода – параметр γ , C_{org} , донные отложения, Севастопольская бухта.

Введение. В последнее время российскими и зарубежными учеными ведется активная работа по созданию методик оценки состояния природных систем, в том числе морских, с целью научного обеспечения процесса принятия решений и интегрированного управления качеством окружающей среды в условиях значительной антропогенной нагрузки и наблюдаемых изменений климата. Одно из основных понятий в таких работах – устойчивость системы [Ускова, 2009].

Для определения интегрального показателя оценки устойчивости региональной системы необходимо учитывать экономические, социальные и экологические показатели. Экологические показате-

ли должны отражать состояние природной среды, уровень антропогенного воздействия, степень использования природных ресурсов и быть понятными для широкого круга специалистов и руководителей, занимающихся проблемами устойчивого эколого-экономического развития. Совокупность (ансамбль) нормированных индексов и относительных показателей, отражающая вышеупомянутые воздействия на прибрежную акваторию, – удобная оценочная шкала, которая представляет собой экологический статус [Protocol..., 2008].

Цель работы состояла в разработке и апробации индексов и показателей для определения эколо-

¹ Морской гидрофизический институт, отдел биогеохимии моря, ст. науч. с., канд. техн. н.; e-mail: olga.moiseenko.65@mail.ru

² Морской гидрофизический институт, отдел биогеохимии моря, канд. геогр. н.; e-mail: naorekh-2004@mail.ru

³ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра океанологии, доцент, канд. геогр. н.; e-mail: anpol@mail.ru

⁴ Морской гидрофизический институт, отдел биогеохимии моря, ст. науч. с.; e-mail: eugene.medvedev1984@gmail.com

⁵ Морской гидрофизический институт, отдел биогеохимии моря, чл.-корр. НАНУ, докт. геогр. н.; e-mail: sergey_kononov@yahoо.com

⁶ Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ЕС 7thFPAreaENV.2009.2.2.1.4: Integrated Coastal Zone Management (PEGASO, # 244170), международного проекта 7-й рамочной программы «Monitoring and observing oxygen depletion throughout the different Earth system components» № 226213, а также РФФИ (проекты № 14-45-01022, № 14-45-01009, № 14-45-01001).

гического статуса морской прибрежной среды на примере Севастопольской бухты, а также информационных продуктов для научного сопровождения при принятии конкретных решений в области интегрированного управления прибрежной зоной.

Разрабатываемые и предлагаемые индексы и показатели должны отражать уровень экологического благополучия, свидетельствовать об адекватности применяемых мер по снижению негативного влияния на природную среду, служить оценкой состояния водной среды и донных отложений, характеризовать уровень загрязнений и изменения, связанные с антропогенным воздействием и вариациями климата [там же].

Водная среда и донные отложения представляют собой две основные составляющие морских систем. Водная среда характеризуется высокой динамикой характеристик и уровня загрязнения, поэтому расчет индексов состояния и оценка качества водной среды возможны лишь по результатам систематических наблюдений (мониторинга). Донные отложения, будучи конечным пунктом миграции вещества, интегрируют результаты процессов, протекающих в водной экосистеме, и рассматриваются как накопители загрязнения. Характеристики донных отложений по сравнению с водной средой изменяются медленнее, поэтому индексы и показатели качества прибрежных донных отложений можно оценивать на основе эпизодических наблюдений.

Объектом исследований была выбрана Севастопольская бухта – типичная прибрежная акватория многоцелевого использования. Градообразующая Севастопольская бухта – объект историко-культурного значения и представляет собой естественное ландшафтное украшение Севастополя, место проведения культурно-массовых и военно-патриотических мероприятий. При этом Севастопольская бухта активно используется на протяжении более двух столетий в разных сферах народного хозяйства.

Бухта – полузамкнутая акватория эстуарного типа. Длина от входа до вершины бухты составляет ~7 км при максимальной ширине ~1 км и средней глубине 12 м, площадь поверхности бухты 7,96 км². В бухте расположены портовые и судоремонтные комплексы. Сюда поступают промышленные и хозяйственно-бытовые сточные воды, а также ливневые воды с площади водосбора. Ежедневно сбрасывается 10–15 тыс. м³ неочищенных или условно чистых сточных вод, с которыми в водную среду поступает широкий спектр загрязняющих веществ [Иванов и др., 2006].

Для расчета индексов и показателей экологического статуса водной среды нами использован специализированный программный продукт, представляющий собой постоянно обновляемый интерактивный цифровой атлас (URL: http://wiki.iczm.org.ua/en/index.php/Main_Page) океанографических характеристик Севастопольской бухты. Помимо готовых

карт-схем и вспомогательной информации этот интерактивный атлас содержит набор трехмерных массивов цифровой информации для всего периода исследований начиная с 1997 г. Это позволяет использовать его в интерактивном режиме для создания карт-схем, которые отсутствуют в готовом виде. Кроме того, наличие цифровых массивов данных позволяет рассчитывать разные индексы и показатели состояния морской среды [Konovalov et al., 2013, 2011]. Версия интерактивного атласа создавалась как средство, обеспечивающее информационную поддержку для принятия решений по управлению разной деятельностью в прибрежной зоне Севастопольской бухты.

Для донных отложений определен ансамбль индексов, который отражает уровень техногенного загрязнения (индекс загрязнения PLI [Jeffrey et al., 1985]). Для водной среды использованы индексы, рекомендованные ведущими европейскими программами (URL: PEGASO, URL: <http://www.pegasoproject.eu/>), а также учитывающие состояние природных циклов (характеристика цикла углерода – γ -параметр [Моисеенко и др., 2011]) и кислородный режим (время истощения кислорода t_{O_2} [Орехова, 2014]).

Материалы и методы исследований. Начиная с 1998 г. и по настоящее время мониторинг гидролого-гидрохимических и гидробиологических характеристик Севастопольской бухты выполняют сотрудники Морского гидрофизического института (МГИ) и Института биологии южных морей (ИнБИОМ). Ежемесячные съемки осуществлялись по схеме из семи «базовых» станций, а сезонные – по схеме 33–35 станций. При выборе сети станций руководствовались особенностями гидрологической структуры вод бухты и локализацией источников загрязнения (рис. 1). Пробы воды отбирали из поверхностного и придонного горизонтов. Образцы донных отложений Севастопольской бухты для определения содержания тяжелых металлов, азота, фосфора, а также органического и неорганического углерода, необходимые для расчета PLI и γ -параметра, отбирали с 2001 по 2008 г.

Анализ проб выполняли в соответствии с руководящими документами для выполнения гидрохимических наблюдений и рекомендованными национальными и международными методиками [Методы..., 1978; Chemical methods..., 1983]. Содержание тяжелых металлов определяли рентгено-флуоресцентным методом с использованием прибора «Спектроскан-Г» [Методика..., 2002]. Анализ содержания органического углерода ($C_{орг}$) выполняли по методике, приведенной в работе [Орлов и др., 1981], содержания карбоната кальция ($CaCO_3$) – в соответствии с работой [Соколов и др., 1980]. Результаты этих наблюдений составляют основу для цифровых массивов интерактивного атласа Севастопольской бухты. Для расчета t_{O_2} привлечены натурные данные полирографического профилирования

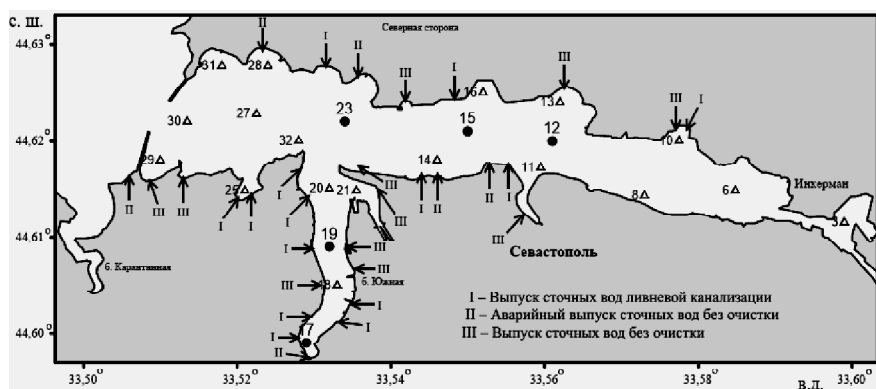


Рис. 1. Схема расположения станций ежемесячных (треугольники) и сезонных (точки) съемок в Севастопольской бухте в 1998–2008 гг. с источниками выбросов

колонок донных отложений, отобранных в 2006–2008 гг. в условиях, максимально приближенных к естественным [Орехова, 2014; Орехова и др., 2009] стеклянным Au–Hg-микроэлектродом [Luther et al., 1998].

Индекс уровня загрязнения донных отложений рассчитывается по следующей формуле [Jeffrey et al., 1985]:

$$PLI_{indiv}^i = 10^{(1-[C_i-B]/[T-B])},$$

где PLI – индекс уровня загрязнения; C – концентрация элемента (мг/г) в донных отложениях; B – базовая концентрация элемента (мг/г), характерная для донных отложений незагрязненной зоны; T – пороговая концентрация элемента (мг/г) в донных отложениях, приводящая к гибели биоты. Значения базовой и пороговой концентрации загрязняющих веществ, использованные для расчета PLI во всех рассмотренных нами акваториях, заимствованы из работы [Jeffrey et al., 1985].

Реальная концентрация загрязняющего вещества может значительно превышать пороговую. В этом случае значение $PLI_{indiv}^i < 1$, что указывает на чрезмерное загрязнение объекта этим элементом, несовместимое с биологической жизнью.

Величина PLI_{indiv}^i позволяет сравнивать уровень загрязнения разных объектов по индивидуальным загрязнителям, но возможен расчет и интегральных индексов PLI . Чтобы оценить суммарное влияние нескольких загрязняющих веществ необходимо вычислить PLI_{site} (среднее геометрическое PLI_{indiv}^i для каждого элемента на одной станции [Chemical..., 1983]) и $PLI_{estuary}$ (среднее геометрическое всех значений PLI_{site} в пределах акватории бухты):

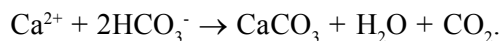
$$PLI_{site} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n PLI_{indiv}^i},$$

$$PLI_{estuary} = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m PLI_{site}^i}.$$

Техногенные загрязнения в совокупности с климатическими изменениями приводят к трансформа-

ции естественных природных циклов экосистем. Цикл углерода наиболее значим для функционирования водной экосистемы. В углеродном цикле различают органическую и карбонатную составляющие. Органическая составляющая продуцируется в результате фотосинтеза и поступления углерода из антропогенных источников, что приводит к обогащению донных отложений $C_{орг}$, а водная среда поглощает углекислый газ из атмосферы, являясь стоком для CO_2 . Карбонатная составляющая описывается

следующим уравнением:



В результате протекания этой реакции продуцируются карбонат кальция и углекислый газ, что приводит к увеличению доли неорганического углерода в донных отложениях и делает акваторию источником углекислого газа.

В зависимости от естественных условий и уровня антропогенной нагрузки преобладает одна из составляющих цикла углерода морской среды, что преобразует экосистему либо в источник углекислого газа, либо в его сток. Поэтому соотношение органической и неорганической форм углерода свидетельствует о состоянии цикла и приоритете одной из его составляющих. Для установления этого соотношения использована относительная величина γ [Zeebe et al., 2001]:

$$\gamma = CaCO_3 / (CaCO_3 + C_{орг}).$$

Ранее [Мисеенко и др., 2011] мы показали возможность использовать содержание $CaCO_3$ и $C_{орг}$ в донных отложениях для оценки цикла углерода в Севастопольской бухте.

Параметр γ изменяется от 0 до 1; если $\gamma = 0$, в донных отложениях образуется только $C_{орг}$, если $\gamma = 1$, то образуется только $CaCO_3$, а $C_{орг}$ не накапливается. Отметим, что снижение величины γ приводит к негативным экологическим последствиям (гипоксии и заморным явлениям), поскольку между $C_{орг}$ и интенсивностью сульфатредукции в большинстве случаев сохраняется прямая зависимость [Ляхин и др., 1978].

Для оценки кислородного режима нами в качестве показателя выбрано время полного истощения кислорода (t_{O_2}) в придонном слое вод, оцениваемый по отношению концентрации кислорода в придонном слое вод к величине потока кислорода на границе с поверхностью донных отложений [Орехова, 2014].

Каждый из предлагаемых индексов и показателей – количественная мера некоторых характеристик состояния экосистемы. В зависимости от при-

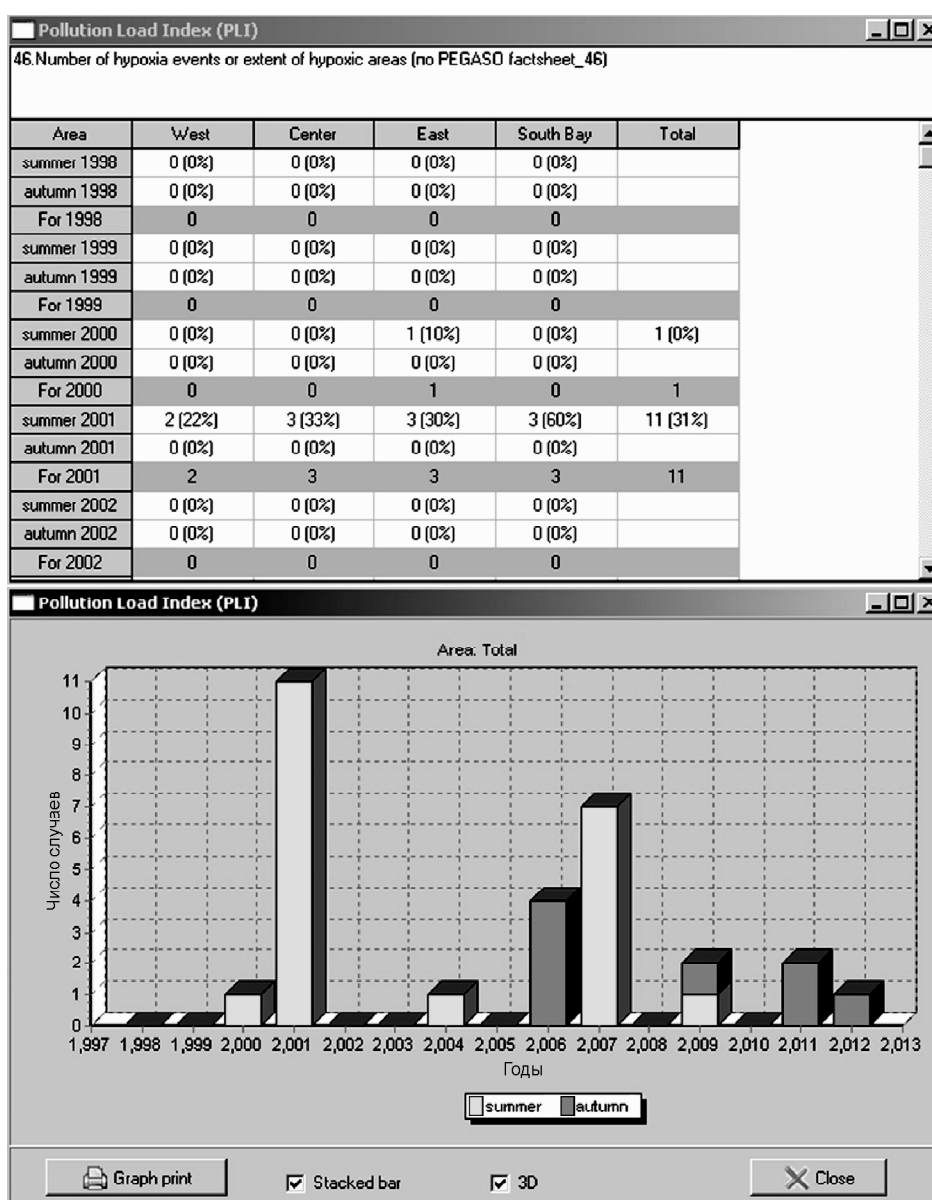


Рис. 2. Пример расчета и анализа частоты возникновения условий гипоксии в придонных водах Севастопольской бухты

родно-климатических условий, уровня антропогенной нагрузки, целей использования прибрежной акватории изменяются граничные величины индексов и показателей. Принципиально важно совмещать возможности интерактивного цифрового атласа и географических информационных систем. Разработанный вариант цифрового атласа позволяет рассчитывать и анализировать разнообразные индикаторы (рис. 2). Программный продукт дает возможность рассчитывать индикаторы с разным уровнем интегрирования в пространстве и времени, а также анализировать пространственно-временные изменения индикаторов и характеристик состояния морской среды.

Для анализа пространственных особенностей и районирования акватории бухты в разработанном атласе предложен инструмент, называемый «свето-

фор». В этом случае получаемые распределения позволяют оценивать состояние морской среды по индексам, которых нет ни в атласе на бумажном носителе, ни в электронном атласе (рис. 3). Рассчитываемые величины индексов воспроизводимы, можно анализировать их пространственное распределение, а выбираемые граничные условия позволяют районировать Севастопольскую бухту на основе индексов состояния морской среды.

В дополнение к этому отметим реализованные в этой версии атласа возможности создания многослойных композитных изображений. Так, учитывая, что основная информация выводится на пространство акватории Севастопольской бухты, береговую область можно использовать для представления дополнительных карт и схем, в том числе карт рас-

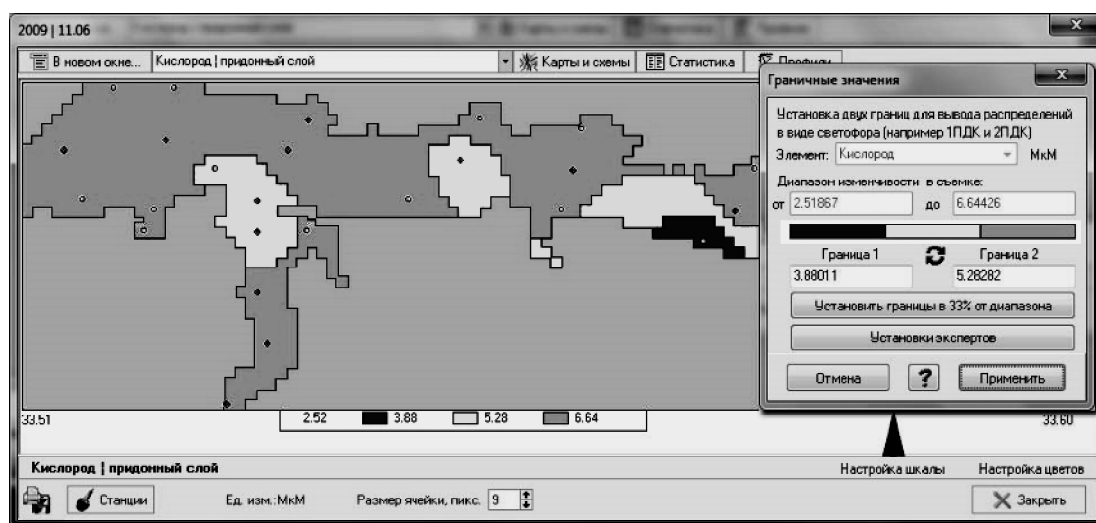


Рис. 3. Отображения цифровых массивов в режиме Светофор

положения и мощности источников загрязнения Севастопольской бухты, включать карту застройки, а также карту сервиса Google maps (рис. 4). Такие продукты позволяют на качественном уровне оценивать влияние береговых источников загрязнения, интенсивность развития муниципальных и промышленных структур, влияние прилегающей территории на распределение океанографических характеристик и состояние морской среды в Севастопольской бухте.

Результаты исследований и их обсуждение.

На основе данных о содержании наиболее распространенных загрязнителей, таких, как Cd, Cr, Zn, Pb, Cu, и концентрации C_{org} , P и N в донных отложениях были рассчитаны значения PLI_{indiv}^i , PLI_{site} и $PLI_{estuary}$. С использованием значения PLI_{site} для Севастопольской бухты выполнено районирование акватории и выделены четыре провинции: восточная, центральная, южная и западная со средними значениями PLI_{site} , равными 5,8; 1,7; 2,6 и 0,1 соответственно (рис. 5, а).

Восточную зону (станции 1–7) в соответствии со значениями PLI_{site} можно охарактеризовать как слабозагрязненную часть бухты, центральную (станции 8–16) и южную (станции 17–22) – как загрязненные районы, а западную зону (станции 23–32) – как чрезвычайно загрязненную.

Использование среднего геометрического для вычисления PLI_{site} и $PLI_{estuary}$ позволяет учесть локальные загрязнения и превышение концентрации всего лишь одного загрязняющего вещества в интегральной оценке распределения загрязнителей в пространстве и их совокупности для оценки эстуария. Этим обусловлено низкое значение PLI_{site} на выходе из бухты – в донных отложениях здесь обнаружена концентрация Cd, значительно превышающая пороговую, соответственно и значения PLI_{Cd} здесь оказались близки к нулю (рис. 5, б).

На рис. 6 приведено пространственное распределение параметра γ в донных отложениях Севас-

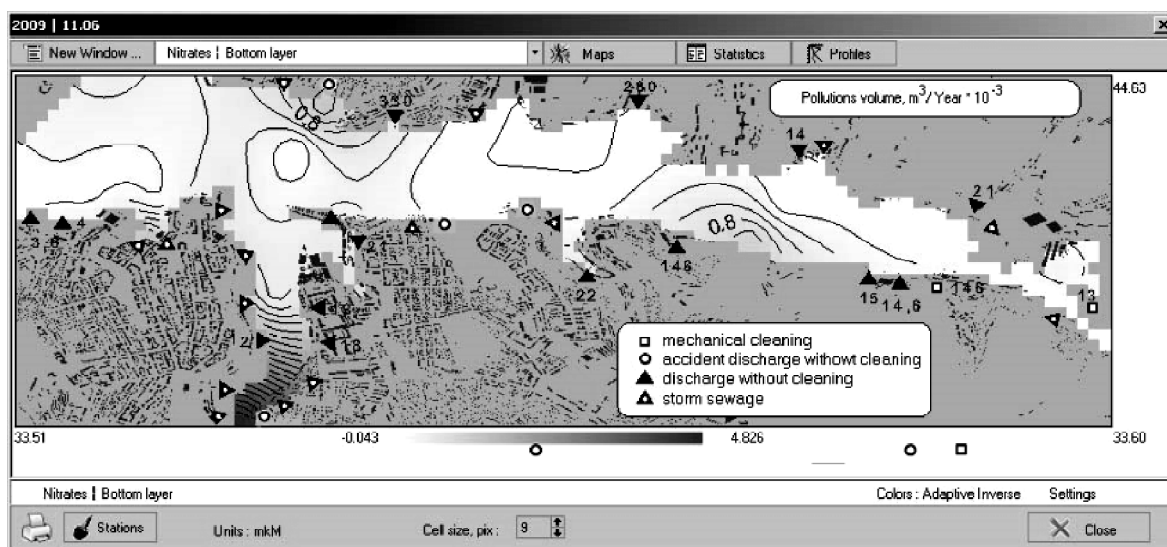


Рис. 4. ГИС-возможности отображения многослойных композитных изображений

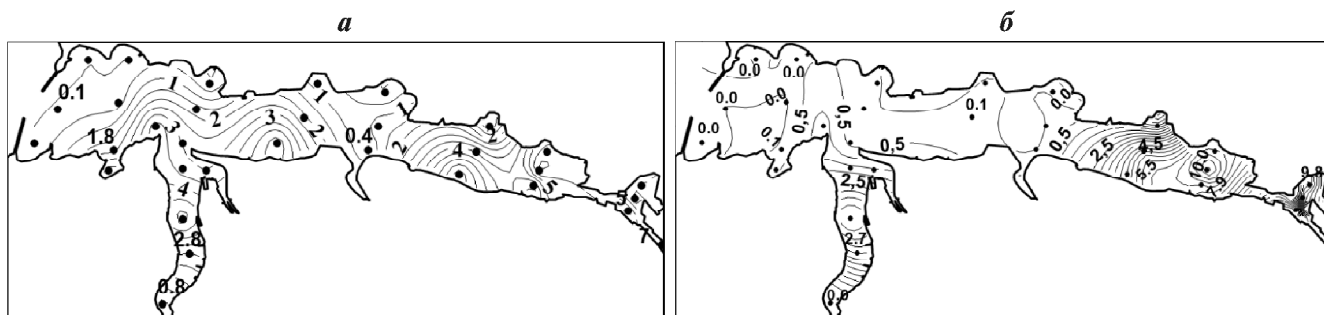


Рис. 5. Распределение индексов уровня загрязнений PLI_{site} (а) и PLI_{cd} (б) для поверхностного слоя (0–5 см) донных отложений в Севастопольской бухте

топольской бухты. Среднее значение параметра γ для бухты равно 0,46, т.е. в целом органический и неорганический углерод здесь накапливается примерно в равном количестве. Однако на большей части площади донных отложений бухты преобладает процесс накопления C_{org} . Особенно интенсивно этот процесс протекает в центральном, южном, а также в восточном районах бухты, и только на выходе из бухты идет процесс интенсивного накопления $CaCO_3$.

Важно отметить, что величина γ уменьшилась с 0,57 в 2003 г. до 0,46 в 2008 г., что свидетельствует об изменениях цикла углерода в сторону преимущественного образования C_{org} и его накопления в донных отложениях. Это указывает на неблагоприятные изменения в экологическом состоянии бухты [Моисеенко и др., 2011; Орехова, 2014]. Для таких изменений характерно увеличение потребления кислорода, систематическое развитие условий дефицита кислорода, ежегодное появление в придонном слое воды сероводорода [Орехова, 2014].

Оценка кислородного режима на границе раздела вода–донные отложения позволила определить, что для станции 23 время истощения кислорода составило 109 дней, для станции, расположенной напротив мыса Павловский (станция 22), – 19 дней. На остальных станциях Севастопольской бухты кислород на поверхности донных отложений отсутствовал, а сероводород появлялся в более глубоких слоях отложений (либо его содержание было ниже порога обнаружения), что не позволило рассчитать потоки кислорода на границе с донными отложениями и, соответственно, время его полного истощения в придонном слое вод.

Выводы:

– разработаны и на примере Севастопольской бухты апробированы нормативные индексы и показатели экологического статуса, которые позволяют оценить степень трансформации водной экосистемы под влиянием антропогенных и климатических изменений среды;

– представленный набор индексов и показателей – эффективный инструмент диагностики экологического состояния эстуариев и очень удобен для сравнения разных, удаленных одна от другой акваторий, кардинально отличающихся по природным условиям. Для Севастопольской бухты оценен ансамбль индексов и показателей, отражающих уровень загрязнения ($PLI_{estuary} = 2,94$), состояние основного природного цикла, а именно цикла углерода ($\gamma = 0,46$) и кислородного режима акватории. Время истощения кислорода в придонном слое вод составляло в среднем несколько дней. Современный экологический статус Севастопольской бухты по результатам оценки можно характеризовать как критический;

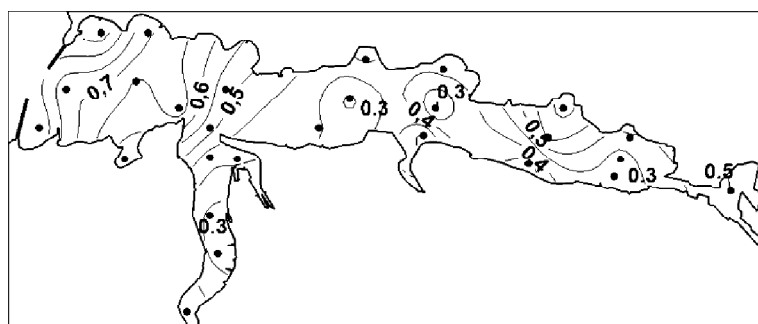


Рис. 6. Распределение значений параметра γ в верхнем слое (0–5 см) донных отложений в Севастопольской бухте

– предложенный набор индексов и показателей – эффективный инструмент для районирования отдельно взятой прибрежной акватории с целью определения наиболее загрязненных зон и районов экологического риска. На основании значений PLI_{site} в Севастопольской бухте выделены четыре провинции: слабо загрязненная восточная часть бухты, загрязненная центральная и южная и чрезвычайно загрязненная западная (средние значения PLI_{site} равны 5,8; 1,7; 2,6 и 0,1 соответственно);

– созданное программное обеспечение для оценки экологического статуса прибрежных акваторий в целях интегрированного управления прибрежной зоной на примере Севастопольской бух-

ты позволило решать проблему визуализации и экспорта данных, интегрирования с геоинформационными системами. Это способствует упрощению ра-

боты с данными и позволяет применять его не только для Севастопольской бухты, но и для других прибрежных акваторий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ REFERENCES

Иванов В.А., Овсяный Е.И., Репетин Л.Н. и др. Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты и его изменения под воздействием климатических и антропогенных факторов. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 90 с.

Ivanov V.A., Ovsyanyj E.I., Repetin L.N. et al. Hidrologo-gidrokhimicheskij režim Sevastopolskoj bukhty i ego izmeneniya pod vozdeistviem klimaticheskix i antropogennyx faktorov [Hydrological and hydrochemical regime of Sevastopol Bay and its changes under the influence of climatic and anthropogenic factors], Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2006. 90 p. (in Russian).

Ляхин Ю.И., Александров В.П., Пальшин Н.И. Расчет баланса обмена CO₂ между океаном и атмосферой по акватории Атлантического, Индийского и Тихого океанов // Исследование и освоение Мирового океана. Вып. 65. Л.: Ленинградский гидрометеорологический институт, 1978. С. 48–60.

Lyachin Yu.I., Aleksandrov V.P., Palshin N.I. Raschet balansa obmena CO₂ mezhdu okeanom i atmosferoj po akvastorii Atlanticheskogo, Indijskogo i Tichogo okeanov [The calculation of the balance of exchange of CO₂ between the ocean and atmosphere in the waters of the Atlantic, Indian and Pacific Oceans], Issledovanie i osvoenie Mirovogo okeana, Vol. 65, Leningrad: Leningradskij gidrometeorologicheskij institut, 1978, pp. 48–60 (in Russian).

Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа. М049-П/02. Свидетельство № 2420/53-2002. СПб.: ООО НПО «Спектрон», 2002. 16 с.

Metodika vypolneniya izmerenij massovoj doli metallov i oksidov metallov v poroshkovyx probax pochv metodom rengenofluoreszentnogo analiza [Methods of measurement of the mass fraction of metals and metal oxide powder in soil samples by X-ray fluorescence analysis] M049-P/02. Svidetelstvo № 2420/53-2002. Sankt-Peterburg: OOO NPO «Spektron», 2002, 16 p. (in Russian).

Методы гидрохимических исследований океана / Под ред. О.К. Бордовского, В.Н. Иваненкова. М.: Наука, 1978. 272 с.

Metody gidrokhimicheskix issledovanij okeana [Methods of hydrochemical ocean studies]. Pod redakciej O.K. Bordovskogo, V.N. Ivanenkova. Moscow: Nauka, 1978, 272 p. (in Russian).

Моисеенко О.Г., Орехова Н.А. Исследование механизма многолетней эволюции цикла углерода в экосистеме Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журн. 2011. № 2. С. 72–83.

Moiseenko O.G., Orechova N.A. Issledovanie mehanizma mnogoletnej evolyuzii zikla ugleroda v ekosisteme Sevastopolskoj bukhty [Investigation of the mechanism of long-term evolution of the carbon cycle in the ecosystem of the Sevastopol bay], Morskoy gidrofizicheskij zhurnal, 2011, no 2, pp. 72–83 (in Russian).

Орехова Н.А. Распределение и потоки кислорода и сероводорода на границе с донными отложениями Черного моря: Автореф. канд. дисс. Севастополь, 2014.

Orechova N.A. Raspreделение i potoki kisloroda i serovodoroda na granize s donnymi otlozheniyami Chernogo morya [Distribution and flow of oxygen and hydrogen sulfide on the border with the Black Sea sediments]: Avtoreferat kand. diss. Sevastopol, 2014 (in Russian).

Орехова Н.А., Коновалов С.К. Полярография донных осадков Севастопольской бухты // Морской гидрофизический журн. 2009. № 2. С. 52–66.

Orechova N.A., Kononov S.K. Polyarografiya donnykh ocadkov Sevastopolskoj bukhty [Polarography bottom sediments of Sevastopol Bay], Morskoy gidrofizicheskij zhurnal, 2009, no 2, pp. 52–66 (in Russian).

Орлов Д.С., Гришина Л.А. Практикум по химии гумуса. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1981. 272 с.

Orlov D.S., Grishina L.A. Praktikum po khimii gumusa. [Practical work on Chemistry humus], Moscow: Izdatelstvo Moskovskogo Universiteta, 1981, 272 p. (in Russian).

Соколов В.С., Соколова Е.Г. Простой газометрический метод определения CaCO₃ в экспедиционных условиях // Химический анализ морских осадков. М.: Наука, 1980. С. 42–46.

Sokolov V.S., Sokolova E.G. Prosto gazometricheskij metod opredeleniya CaCO₃ v ekspeditsionnykh usloviyakh [Simple gasometric method for determination of CaCO₃ in field conditions] Khimicheskij analiz morskikh ocadkov. Moscow: Nauka, 1980, pp. 42–46 (in Russian).

Ускова Т.В. Управление устойчивым развитием региона. Вологда: ИСЭРТ РАН, 2009. 355 с.

Uskova T.V. Upravlenie ustojchivym razvitiem regiona [Management of sustainable development of the region], Vologda: ISERT RAN, 2009. 355 p. (in Russian).

Chemical methods for use in marine environmental monitoring/Intergovernmental Oceanographic Commission. Manuals and guides. N 12. Unesco, 1983. 53 p.

Jeffrey D.W., Wilson J.G., Harries C.R., Tomlinson D.L. The application of two indices to Irish estuary pollution status // Estuarine management and quality assessment. L.: Plenum Press, 1985. P. 147–165.

Kononov S., Vladymyrov V., Dolotov V. et al. Environmental Assessment Tools in the PEGASO Case – Sevastopol Bay // Proceed. Global Congress on ICM: Lessons Learned to Address New Challenges / Ed. E. Ozhan. EMECS 10 – MEDCOAST 2013 Joint Conference. 30 Oct–03 Nov 2013. Vol. 1. Marmaris, 2013. P. 59–70.

Kononov S., Vladymyrov V., Dolotov V. et al. Coastal Management Tools and Databases for the Sevastopol Bay (Crimea) // Proceedin. Tenth Internat. Conference on the Mediterranean Coastal Environment /Ed. E. Ozhan. MEDCOAST 11. 25–29 October 2011, Rhodes, Greece, MEDCOAST, Mediterranean Coastal Foundation. Vol. 1. Dalyan, Mugla, 2011. P. 145–156.

Luther G.W., Brendel P.J., Lewis B.L. et al. Simultaneous measurement of O₂, Mn, Fe, I, and S (-II) in marine pore waters with a Solid-State voltammetric microelectrode // Limnol. Oceanogr. 1998. Vol. 43, N 2. P. 325–333.

Protocol on integrated coastal zone management in the Mediterranean. UNEP/MAP/ PAP: Split, Priority Actions Program, 2008. 88 p.

Zeebe R.E., Wolf-Gladrow D. CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes // Elsev. Oceanogr. Ser. 2001. Vol. 65. 346 p.

Поступила в редакцию
04.03.2015

**O.G. Moiseenko, N.A. Orekhova, A.V. Polyakova,
E.V. Medvedev, S.K. Konovalov**

**INDICES AND INDICATORS OF THE ENVIRONMENTAL
STATE OF THE SEBASTOPOL BAY**

To support the assessment of the state of marine environment and the degree of its transformation under the climate changes and the anthropogenic impact a set of normalized indices and indicators of the environmental state of an offshore water area was developed and tested within the Sebastopol Bay.

Water masses and bottom sediments are two principal components of marine systems. The indices and indicators of the environmental state of water masses were calculated using specialized software, i.e. the «dive» interactive digital atlas of the oceanographic parameters of the Sebastopol Bay. Another ensemble of indices (index of pollution – PLI_{site} , carbon cycle attribute – γ and the time period of oxygen exhaustion – t_{O_2}) was suggested for the evaluation of the state of bottom sediments.

Basing on the PLI_{site} values water area of the bay was evaluated in terms of the pollution level and four provinces were identified, namely the eastern (slightly polluted), central and southern (polluted) and the western (severely polluted).

Calculated γ values for the bottom sediments of the bay indicate a shift of the carbon cycle towards the predominant C_{org} formation and its accumulation in bottom sediments. This leads to the increasing oxygen consumption resulting in its deficit which could be evaluated in terms of the time period of oxygen exhaustion (t_{O_2}). The maximum t_{O_2} value is 109 days and the results are indicative of unfavorable changes of the environmental state of the bay.

The elaborated version of a digital atlas makes it possible to calculate indicators with different degree of temporal and spatial integration and analyze the spatial-temporal changes of indicators and parameters of the state of marine environment. The atlas is used for decision-making on the management of economic activities within the offshore part of the Sebastopol Bay.

Keywords: index of pollution, time period of oxygen exhaustion, Sebastopol Bay.