

О.Г.Игнатьева

Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь

ОЦЕНКА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ СЕВАСТОПОЛЬСКОЙ БУХТЫ

Для определения уровней загрязнения Севастопольской бухты была применена методика оценки экологического состояния акваторий с помощью индекса загрязнения *Pollution Load Index (PLI)*. Индекс позволяет производить оценку качества среды по десятибалльной шкале от 1 до 10 – от очень загрязненного водного бассейна до практически незагрязненного. С помощью *PLI* был установлен экологический статус Севастопольской бухты, осуществлено ее районирование и сравнение с рядом европейских бухт и эстуариев и австралийским эстуарием. Севастопольскую бухту используемая методика позволяет характеризовать как загрязненную ($PLI = 2,94$). Европейские бухты и эстуарии, за исключением залива Вейз (Франция) – как загрязненные ($PLI \leq 3$) и очень загрязненные ($PLI \leq 1$), австралийский эстуарий – как мало загрязненный ($PLI = 7.9$).

Большинство портов находятся в бухтах и эстуариях, являясь промышленными центрами и источниками загрязнения, где индустриальные и муниципальные стоки поступают непосредственно в воды, как правило, недостаточно очищенными или вовсе без очистки. С ростом населения портовых городов и развитием промышленности многие европейские эстуарии превратились в безжизненные сточные каналы уже к концу XIX столетия [1].

Севастопольская бухта также относится к акваториям активного хозяйственного использования. Исследование основных источников загрязнения бухты [2] показало, что она служит коллектором различных загрязняющих веществ. В бухту 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. Гидродинамической особенностью бухты является наличие антициклонической динамической структуры с конвергенцией в центре и подъёмом изоповерхностей на периферии, что оказывает влияние на морфологические особенности дна и, как следствие, на процессы накопления загрязнений и их пространственного распределения [3, 4].

К настоящему моменту разработан широкий спектр методик и способов оценки экологического состояния акваторий [5 – 11], в основе которых лежит анализ биоиндикаторов, основных гидрохимических параметров, концентраций загрязняющих веществ в воде и донных отложениях и т.д. Морские донные отложения, являясь конечным пунктом миграции вещества, объективно отражают все процессы, протекающие в водной экосистеме в целом, и рассматриваются как накопители загрязнения. Каждое из содержащихся в донных осадках загрязняющих веществ, ухудшает состояние эстуария, причем, чем выше концентрация вещества в донных отложениях, тем сильнее его отрицательное воздействие на

© О.Г.Игнатьева, 2007

экосистему. Следует, однако, заметить, что разнообразие географических, биогеохимических, климатических и антропогенных условий жизнедеятельности прибрежных акваторий не позволяет использовать только величину концентрации загрязнителя в качестве критерия оценки уровня загрязнения.

В [12] для оценки экологического состояния бухт и эстуариев была предложена относительная величина концентрации загрязняющих веществ в донных отложениях – *Pollution Load Index (PLI)*, индекс уровня загрязнения, который позволяет производить оценку качества среды по десятибалльной шкале. Низкий уровень ($PLI \leq 1$) соответствует очень загрязненному эстуарию, высокий уровень ($PLI = 10$) – практически незагрязненному водному бассейну.

Предпосылкой для применения в исследовательской работе этой методики, являются накопленные знания об эстуарных экосистемах и ожидаемых откликах биоценозов на различные виды загрязнения [13 – 15].

Целью данной работы явилось определение уровня загрязнения Севастопольской бухты с помощью *PLI*, исследование интенсивности загрязнения различных районов бухты, выделение очагов экологического риска. В работе также было проведено сравнение уровней загрязнения некоторых черноморских бухт и эстуариев Франции, Ирландии и Австралии. Поскольку автор располагал исходными данными по ограниченному числу объектов, то работа носит скорее характер иллюстрации возможностей методики сравнения и диагностики состояния акваторий, нежели аналитического исследования.

Методы и материалы. Отбор проб донных отложений проводился в Севастопольской бухте (68 проб) в течение 2001 – 2003 гг. по схеме станций, представленной на рис. 1.

Процедуры отбора проб и проведения лабораторных анализов на наиболее распространенные виды загрязнений (органический углерод, азот, фосфор и некоторые тяжелые металлы) подробно описывались в более ранних работах, а также в статьях других авторов, которые послужили источником первичных данных, использованных для расчета уровня загрязнения [13, 15 – 18].

Расположение бухт и эстуариев, с которыми сравнивался уровень загрязнения Севастопольской бухты, показано на рис.2 – 4.

Используемая в данной работе методика [13] позволяет рассчитать интенсивность химического загрязнения донных осадков бухт и эстуариев по ниже приведенной формуле:

$$PLI_{div}^i = 10^{(1-[Conc_i - B]/[T - B])}, \quad (1)$$

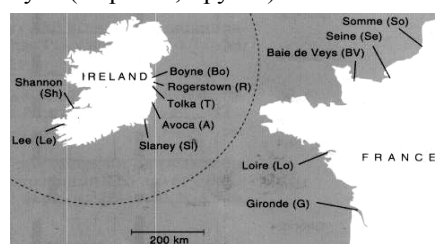
где *PLI* – индекс уровня загрязнения; *Conc* – концентрация элемента (мг/г) в донных отложениях; *B* – базовая концентрация (мг/г), характерная для



Рис. 1. Схема станций отбора проб донных осадков (0 – 5 см) в Севастопольской бухте в 2001 – 2003 гг.



Р и с . 2 . Расположение Черноморских бухт (Украина, Грузия).



Р и с . 3 . Расположение Французских и Ирландских эстуариев.



Р и с . 4 . Расположение эстуария Бродвотер (Австралия).

Т а б л и ц а 1 . Базовые и пороговые концентрации некоторых загрязняющих веществ [13].

загрязняющее вещество	концентрация	
	базовая	пороговая
органический углерод, %	1,0	7,5
азот, мкг/г	400	2500
фосфор, мкг/г	150	500
кадмий, мкг/г	0,5	1,5
хром, мкг/г	5,0	50,0
цинк, мкг/г	20,0	100,0
медь, мкг/г	5,0	50,0
свинец, мкг/г	10,0	100,0

донных отложений незагрязненной зоны; T – пороговая концентрация элемента (мг/г) в донных отложениях, приводящая к гибели биоты.

Реальная концентрация загрязняющего вещества может значительно превышать пороговые концентрации. В этом случае значение PLI_{indiv}^i будет ниже 1, что будет указывать на «чрезмерное» загрязнение объекта по данному элементу не совместимое с биологической жизнью.

PLI_{indiv}^i позволяет сравнить уровень загрязнения разных объектов по одному виду загрязнителя и определить межгодовую динамику уровня загрязнения по одному веществу. Анализ индивидуальных индексов загрязнения позволяет определить как общие тенденции загрязнения, так и индивидуальные особенности загрязнения каждого объекта.

Чтобы сделать оценку суммарного влияния различных загрязняющих веществ в каждой точке и в целом в бухте были вычислены PLI_{site} (среднее геометрическое PLI_{indiv}^i для каждого элемента на одной станции [13]) и $PLI_{estuary}$ (среднее геометрическое всех PLI_{site} в пределах эстуария):

$$PLI_{site} = \sqrt[n]{\prod_{i=1}^n PLI_{indiv}^i}, \quad (2)$$

$$PLI_{estuary} = \sqrt[m]{\prod_{i=1}^m PLI_{site}^i}. \quad (3)$$

Использование среднего геометрического для вычисления PLI_{site} и $PLI_{estuary}$ позволяет учесть локальные загрязнения и превышение концентраций всего лишь одного из ряда загрязняющих веществ в интегральной по пространству и

совокупности загрязнителей оценке эстуария.

Значения базовых и пороговых концентраций загрязняющих веществ, использованные для расчета PLI во всех рассмотренных в настоящей работе акваториях, приведены в табл.1.

Результаты и обсуждение. На основе, имеющихся данных о содержании наиболее распространенных загрязнителей, таких как Cd , Cr , Zn , Pb , Cu и повышенного содержания $C_{орг}$, P и N в донных отложениях, были рассчитаны значения PLI_{indiv}^i , PLI_{site} и $PLI_{estuary}$ по формулам (1) – (3).

Значения PLI_{indiv}^i ниже 1,0 были определены для N , Cd , Cr и Zn , с концентрациями 3800 мг/г сухого веса ($PLI_{indiv}^N = 0,24$), 3 мкг/г ($PLI_{indiv}^{Cd} = 0,02$), 107 мкг/г ($PLI_{indiv}^{Cr} = 0,05$), 114 мкг/г ($PLI_{indiv}^{Zn} = 0,66$) соответственно. Анализируя величины индивидуальных индексов по каждому из загрязняющих веществ для Севастопольской бухты, следует отметить тенденцию, присущую большинству сравниваемых бассейнов: концентрации фосфора были ниже пороговой, его PLI_{indiv}^P довольно высок, по сравнению с другими загрязнителями; индексы загрязнения органического углерода и азота ниже, чем у фосфора, но выше, чем у тяжелых металлов. Ряд концентраций диссипирующих загрязнителей ($C_{орг}$, P и N) характеризуется меньшим разбросом абсолютных значений, чем ряд концентраций консервативных загрязняющих веществ (Cd , Cr , Zn , Pb , Cu), и его можно представить следующим образом $PLI_{indiv}^P > PLI_{indiv}^{C_{орг}} > PLI_{indiv}^N$. Уровни загрязнения тяжелыми металлами довольно сильно различаются, поскольку они зависят, прежде всего, от вида и мощности техногенного прессинга на каждую отдельную акваторию. Величины PLI_{indiv}^i тяжелых металлов ниже величин PLI_{indiv}^i фосфора, органического углерода и азота, видимо в силу того, что последние подвержены трансформации, в то время как первые имеют тенденцию к накоплению, особенно в илистых мелкодисперсных фациях, какими большей частью представлены загрязненные верхние слои донных осадков Севастопольской бухты.

Рассчитанные с использованием величин PLI_{indiv}^i , значения PLI_{site} в Севастопольской бухте изменялись в пределах от $6 \cdot 10^{-4}$ (ст.13) до 7,6 (ст.3) (рис.5), при средней геометрической величине 2,94. На основе значений PLI_{site} для Севастопольской бухты было осуществлено 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.

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

Используя полученные значения PLI_{site} для Севастопольской бухты, был рассчитан индекс $PLI_{estuary}$, который охарактеризовал уровень загрязнения бухты в целом. Для того чтобы дать сравнительную оценку уровню загрязнения Севастопольской бухты были рассчитаны $PLI_{estuary}$ для ряда бухт и эстуариев, в различных частях света. На ос-



Р и с . 5 . Распределение индексов уровня загрязнений (PLI_{site}) для поверхностного слоя (0 – 5 см) донных осадков Севастопольской

нове собственных данных был рассчитан $PLI_{estuary}$ для Казачьей бухты [17], Одесского [18] и Батумского [19] заливов, а также австралийского эстуария Бродвотер [20] $PLI_{estuary}$ были рассчитаны на основе данных литературных источников. Индексы загрязнения эстуариев Франции и Ирландии, описаны в [14].

Значения $PLI_{estuary}$ сравниваемых объектов представлены в табл.2.

Полученные результаты приводят к удручающему выводу – практически все, взятые для сравнения европейские бухты и эстуарии, кроме залива Вейс (Франция), являются загрязненными и очень загрязненными. У шести из шестнадцати европейских акваторий индекс уровня загрязнения – менее 1, то есть концентрации большинства загрязняющих веществ в донных отложениях этих бухт превышают пороговые, приводящие к гибели биоты, значения $PLI_{estuary}$, величины которых заключены в пределах от 1 до 3, продемонстрировали восемь

акваторий. Немногим выше 3 индекс загрязнения эстуария Сэм (Франция). Только залив Вейс имеет сравнительно высокий индекс и является наименее загрязненным европейским эстуарием, состояние водной среды которого близко к австралийскому эстуарию Бродвотер. Последний можно характеризовать как мало загрязненный, поскольку концентрации ряда загрязняющих веществ в донных осадках близки или равны базовым [20].

Сравнивая значения PLI_{indiv}^i рассматриваемых водных бассейнов, можно выделить два характерных типа загрязненных эстуариев. Первый – ирландский, который определяется высокой интенсивностью загрязнения фосфором и цинком. И второй – черноморский (куда входят и эстуарии Франции и Австралии), где основной вклад в загрязнение акватории вносят тяжелые металлы.

Выводы. Загрязнение бухт, заливов и гаваней диктует необходимость вести разработку мероприятий по их охране и требует научного методологического подхода оценки уровня химического загрязнения акваторий, который позволял бы сравнивать объекты, расположенные в

Таблица 2. Значения $PLI_{estuary}$ для Черноморских бухт и эстуариев Франции, Ирландии и Австралии.

эстуарий/бухта	PLI
<i>Черное море</i>	
Севастопольская бухта	2,94
Казачья бухта	2,98
Одесский залив	0,00
Батумский залив	2,00
<i>Франция</i>	
эстуарий реки Сэм (Somme)	3,37
эстуарий реки Сен (Seine)	0,84
залив Вейс (Baie de Veys)	7,37
эстуарий реки Ловары (Loire)	0,31
эстуарий реки Жеронд (Gironde)	0,61
<i>Ирландия</i>	
эстуарий реки Бойн (Boyne)	2,33
эстуарий реки Роджерстаун (Rogerstown)	1,67
эстуарий реки Толка (Tolka)	0,12
эстуарий реки Авока (Avoca)	0,00
эстуарий реки Сленей (Slaney)	1,74
эстуарий реки Ли (Lee)	1,23
эстуарий реки Шенон (Shannon)	2,56
<i>Australia</i>	
эстуарий Бродвотер (Southport Broadwater)	7,90

различных частях света. Кроме того, методика экологической оценки должна быть понятной для широкого круга специалистов, занимающихся проблемами устойчивого эколого-экономического развития прибрежных акваторий, от которых зависит принятие конкретных решений и мер по стабилизации и улучшению их состояния.

Предлагаемая методика оценки экологического состояния эстуариев успешно испробована для бухт и заливов Черного моря и австралийского эстуария Бродвотер, что позволило сравнить их состояние загрязнения с ирландскими и французскими эстуариями, описанными в работах [14, 19].

Европейские бухты, за исключением залива Вейс, используемая методика позволяет характеризовать как очень загрязненные, в отличие от австралийского эстуария, где все загрязняющие вещества находятся в донных осадках в концентрациях значительно ниже пороговой.

С помощью полученных индексов было осуществлено также районирование Севастопольской бухты, выделены наиболее загрязненные зоны – районы экологического риска.

Приведенные в данной работе результаты исследований территориально более широкие, чем в предыдущих работах [14, 16, 19], подтвердили, что индекс загрязнения представляет собой эффективный инструмент диагностики экологического состояния эстуариев и очень удобен для сравнения удаленных друг от друга акваторий, кардинально отличающихся друг от друга по природным условиям. Вследствие этого было бы желательно его использовать на большем количестве объектов в разных частях света.

Как уже отмечалось в [12], обсуждаемые в статье индексы имеют ряд достоинств для неспециалистов в области химии моря, так как представляет собой удобную оценочную шкалу, которой можно руководствоваться, принимая стратегические решения по менеджменту эстуариев. Применение этого метода оценки, безусловно, будет способствовать взаимопониманию между административными и научными работниками при обсуждении экологических проблем прибрежных акваторий.

Автор выражает благодарность сотрудникам отдела биогеохимии моря МГИ НАН Украины: Овсяному Е.И. и Ореховой Н.А. за предоставленные данные по содержанию органического углерода, фосфора и азота в донных отложениях Севастопольской бухты и Романову А.С. за организацию экспедиционных и лабораторных исследований, которые легли в основу данной работы, а также консультации в процессе подготовки статьи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Clark R.B.* Marine Pollution.– New York: Oxford University Press, 2001.– 236 p.
2. *Овсяный Е.И., Кемп Р.Б., Пенетин Л.Н., Романов А.С.* Гидролого-гидрохимический режим Севастопольской бухты в условиях антропогенного воздействия (по наблюдениям 1998-1999 гг.) // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2000.– С.79-103.
3. *Овсяный Е.И., Романов А.С., Миньковская Р.Я., Красновид И.И., Озюменко Б.А., Цымбал И.М.* Основные источники загрязнения морской среды Севастопольского региона // Экологическая безопасность прибрежной и

шельфовых зон и комплексное использование ресурсов шельфа. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2001. – вып.2. – С.138-152.

4. *Репетин Л.Н., Гордина А.Д., Павлова Е.В., Романов А.С., Овсяный Е.И.* Влияние океанографических факторов на экологическое состояние Севастопольской бухты (Черное море) // Морской гидрофизический журнал. – 2003. – № 2. – С.66-80.
5. *Алимов А.Ф., Балушкина Е.В., Умнов А.А.* Подходы к оценке состояния водных экосистем // Экологическая экспертиза и критерии экологического нормирования. – СПб.: НЦ РАН, 1996. – С.37-47.
6. *Воробейник Е.Л., Садыков О.Ф., Фарафонов М.Г.* Экологическое нормирование техногенных загрязнений наземных экосистем. – Екатеринбург: УИФ Наука 1994. – 380 с.
7. *Временные* методические указания по комплексной оценке качества поверхностных и морских вод. Утв. Госкомгидрометом СССР 22.09.1986 г. № 250-1163. – М., 1986. – 5 с.
8. *Гелашивили Д.Б., Зинченко Т.Д., Выхристюк Л.А., Карандашова А.А.* Интегральная оценка экологического состояния водных объектов по гидрохимическим и гидробиологическим показателям // Самара: Изв. СамНИЦ РАН. – 2002. – № 2. – С.270-275.
9. *Федоров В.Д., Максимов В.Н., Сахаров В.Б.* Количественный способ оценки внешних воздействий на экологические системы // Человек и биосфера. – М.: МГУ, 1980. – вып.5. – С.12-23.
10. *Sladeček V.* System of water quality from the biological point of view // Arch. Hydrobiol.– Beiheft., Ergebnisse der Limnol, 1973.– Bd.7.– S.1-218.
11. *Eutrophication of waters. Monitoring, Assessment and Control.*– France, Paris: OESD, 1982.– 154 p.
12. *Wilson J.G., Jeffrey D.W.* Europe-wide indices for monitoring estuarine quality // Biological Indication of Pollution.– Ireland, Dublin: Richardson, DHS (Ed), 1987.– P.225-242.
13. *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.– England, London: Plenum Press, 1985.– P.147-165.
14. *Wilson J.G., Elkaim B.A.* comparison of the pollution status of twelve Irish and French estuaries / Estuaries and coasts: spatial and temporal inter comparisons. ECSA 19 Symposium, 1991.– P.47-59.
15. *Jeffrey D.W., Wilson J.G.* A manual for the estimation of estuary quality / National Board for Science and Technology. 2nd ed.– Ireland, Dublin, 1985.– 210 p.
16. *Игнатьева О.Г., Овсяный Е.И., Романов А.С.* Изучение химического состава и оценка уровня загрязнения донных отложений Севастопольской бухты (по результатам исследований 2001-2002 гг.) / Устойчивое развитие территорий Юга России и Украины: эволюция, функционирование и ресурсы.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2002. – С.103-125.
17. *Игнатьева О.Г., Овсяный Е.И., Романов А.С., Котельянец Е.А., Орехова Н.А.* Физико-химические характеристики донных отложений бухты Казачьей (Черное море), как показатели ее экологического состояния // Ученые записки Таврического национального университета им. В.И.Вернадского. Серия «Биология, химия». – Симферополь: Изд. ТНУ, 2005. – Т.18(58), № 2. – С.43-49.

18. Беркович О.О., Какаранза С.Д., Никулин В.В. Эколого-геологическая характеристика донных осадков Одесского залива // Экология моря.– 2003.– вып.64.– С.90-94.
19. Wilson J.G., Komakhidze A., Osadchaya T., Alyomov S., Romanov A., Tediashvili M. Evaluation ecological quality in the north-eastern Black Sea coastal zone // Oceanus. (submitted in August 2006).
20. Burton E.D., Philips I.R., Hawker D.W. Trace metals and nutrients in bottom sediments of Southport Broadwater, Australia / Marine Pollution Bulletin.– 2004.– 48.– P.378-402.

Материал поступил в редакцию 4.09.2007 г.