

УДК (574.64:574.587)(282.243.7.05)

В. Д. Романенко¹, А. В. Ляшенко¹, С. А. Афанасьев¹,
И. Н. Коновец¹, Л. С. Кипнис¹, Е. Е. Зорина-Сахарова¹,
А. В. Терлецкая², М. В. Милюкин², В. Я. Демченко²,
Р. М. Бюргес³, К. Т. Хо³

**КОМПЛЕКСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДОННЫХ
ОТЛОЖЕНИЙ РАЗНОТИПНЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ
АВАНДЕЛЬТЫ КИЛИЙСКОГО РУКАВА ДУНАЯ**

Для определения качества донных отложений был применен «триадный» подход, предусматривающий анализ валового содержания токсикантов, биотестирование донных отложений, исследование структуры фито- и зообентосных сообществ. Полученные результаты показали средний уровень загрязнения и отсутствие ярко выраженной токсичности донных отложений, а также отсутствие четкой связи структурных показателей бентосных сообществ с содержанием токсикантов.

Ключевые слова: Килийская дельта Дуная, донные отложения, токсичность, бентосные сообщества, «триадный подход».

Уникальная экосистема дельты Дуная, с одной стороны, характеризуется высоким ландшафтно-биотопическим и биологическим разнообразием, концентрацией редких, исчезающих и реликтовых видов флоры и фауны, а с другой, являясь конечным участком самой интернациональной в мире реки, протекающей по территории десяти европейских стран, принимает разнообразные загрязнения с территории бассейна площадью 817 000 км². Важнейшей гидрологической особенностью воды р. Дунай является её мутность, обусловленная значительным количеством взвесей и наносов. Их среднегодовое содержание за многолетний период наблюдений составляет 170—200 г/м³ при колебаниях от 107 до 242 г/м³ и максимальных величинах до 2300 г/м³. Общая масса твёрдого стока реки достигает 100 млн. тонн в год [12, 18, 25]. Взвеси Дуная представляют собой специфические органо-минеральные комплексы с ассоциированными с ними загрязняющими веществами, в том числе и токсической природы [5]. В дельте и особенно авандельте — сильно разветвленной вторичной дельте реки скорость течения снижается, происходит осаждение взвешенных веществ, охватывающее значительные акватории рукавов, заливов (кутов) переднего края дельты, внутридельтовых озёр и плавней. Формирующиеся донные отложения заселяются бентосными организмами, обеспечивающими транспорт загрязняющих ве-

© Романенко В. Д., Ляшенко А. В., Афанасьев С. А., Коновец И. Н., Кипнис Л. С., Зорина-Сахарова Е. Е., Терлецкая А. В., Милюкин М. В., Демченко В. Я., Бюргес Р. М., Хо К. Т., 2011

ществ по трофическим цепям, конечным звеном которых может стать организм человека.

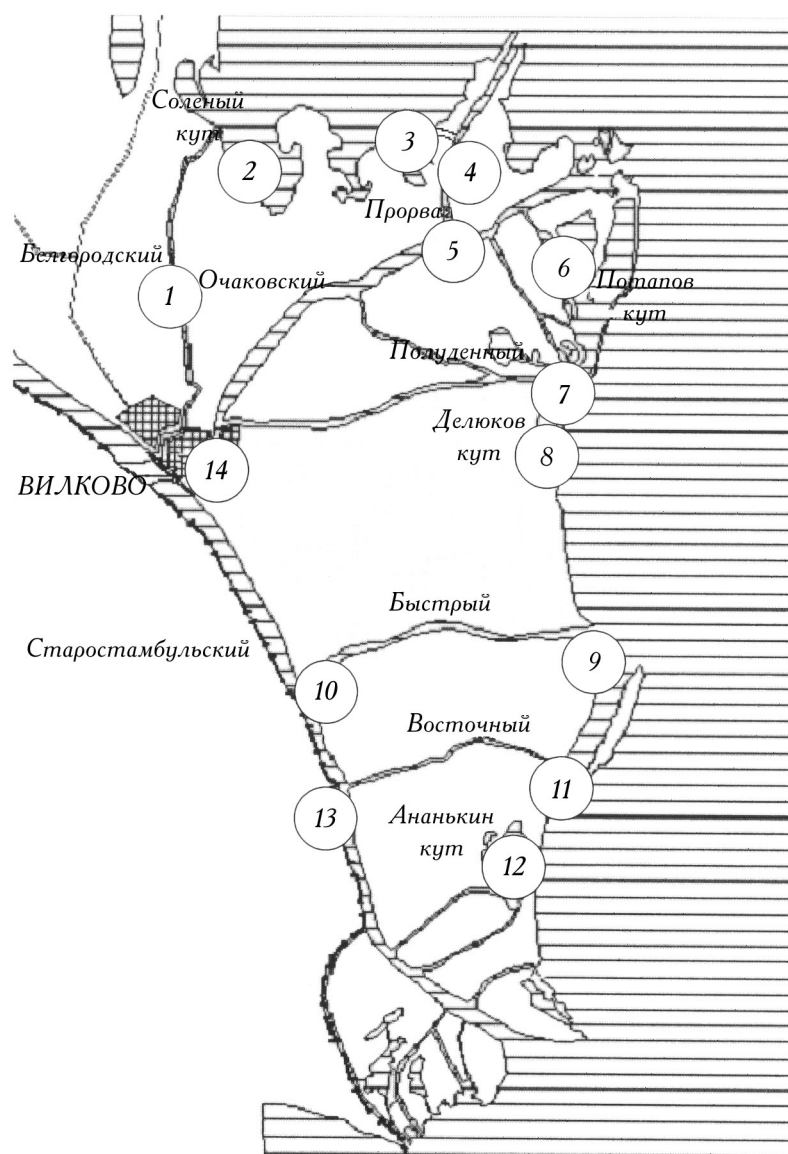
Подходы к комплексной диагностике состояния донных отложений в современной гидроэкологии все еще находятся на стадии разработки. Наличие загрязнений может быть выявлено различными методами, и в первую очередь традиционными химико-аналитическими. Их недостатком является то, что, во-первых, можно определить лишь те загрязняющие вещества, которые ищешь, а их списки составляют сотни и тысячи названий. Во-вторых, определение химического состава донных отложений, каким бы полным оно ни было, не дает однозначного ответа на вопрос о биодоступности химических загрязнений и о возможном их влиянии на биологические системы, что, в конечном итоге, определяет экологическое состояние водного объекта. В-третьих, в настоящее время не существует достоверных методов прогнозирования совместного (сочетанного) воздействия токсикантов на биологические объекты, особенно в таких сложных физико-химических системах, какими являются донные отложения. Устранить перечисленные недостатки в некоторой степени удастся применением современных методов биотестирования и биологической индикации — как на уровне индикаторных видов, так и путем изучения структуры биотических сообществ [6, 15, 20, 21].

«Триадный» [19, 22, 23] подход (химические анализы + биотестирование + биоиндикация) применен нами в настоящей работе для комплексной характеристики донных отложений водных объектов дельты Дуная. Исследования проведены при поддержке Агентства охраны окружающей среды США в рамках проекта, связанного с разработкой методологии диагностирования состояния загрязнения эстуариев крупных рек (Development and Application of Diagnostic Tools for Identifying Causes of Environmental Impairments in the Estuarine Systems of Ukraine).

Материал и методика исследований. Исследования проводили в Килийской дельте Дуная в сентябре — октябре 2006 и 2007 гг. Карта-схема района исследований и характеристика станций отбора проб представлены на рисунке 1 и в таблице 1.

Пробы донных отложений отбирали дночерпателем СДЧ-100. Для отбора микрофитобентоса использовали трубку Владимировой. Пробы бентосных организмов фиксировали на месте 4%-ным р-ром формалина. Пробы для биотестирования и химических анализов помещали в портативный холодильник и транспортировали в лабораторию, где хранили до проведения анализа при температуре + 4°C.

Образцы донных отложений готовили для химического анализа в соответствии с международным стандартом [29]: высушивали на воздухе, просеивали через сито с размером ячеек 1 мм и хранили при 4°C; перед обработкой кислотами или органическими растворителями образцы дополнительно растирали в агатовой ступке. Гранулометрический анализ выполнен методом мокрого просеивания и седиментации [1, 28]. Определяли содержание фракций (%) песка (0,05—1,0 мм), ила (0,001—0,05 мм) и глины ($\leq 0,001$ мм).



1. Карта-схема района исследований (название станций см. в табл. 1).

В образцах донных отложений (≤ 1 мм) определяли содержание экологически важных тяжелых металлов (Cu, Zn, Ni, Pb, Cr, Cd, Ag, Hg) [30, 33] и ряда стойких органических загрязняющих веществ — полихлорированных бифенилов (ПХБ) по Aroclor 1254, Aroclor 1260; хлорорганических пестицидов (ХОП) — α -, β -, γ -ВНС, алдрин, гептахлора, 4,4'-ДДД, 4,4'-ДДЕ, 4,4'-ДДТ [36, 37], а также полиароматических углеводородов (ПАУ, включая аценафтен, бенз(а)антрацен, бенз(а)пирен, бенз(ghi)перилен, хризен, флуорантен и другие приоритетные ПАУ, всего 16 соединений) [31, 32, 34, 35]. Общее со-

1. Общая характеристика станций отбора проб и донных отложений водных объектов аванделты Килийского рукава

Номера и расположение станций	Координаты (широта; долгота)	Глубина, м	Донные отложения			
			С _{орг.} , %	Гранулометрический состав, %		
				песок	ил	глина
1 Рук. Белгородский	45°24,898; 29°36,453	1,8 1,5	1,6	1,1	83,1	15,8
			1,1	34,2	42,5	23,3
2 Зал. Солёный кут	45°28,355; 29°39,074	1,0 1,0	0,4	86,2	6,9	6,9
			1,4	92,7	1,2	6,1
3 Соединительный канал (море)	45°28,461; 29°42,483	1,5 1,5	0,7	91,3	8,7	0
			1,5	80,8	11,3	7,9
4 Соединительный канал (рук. Прорва)	45°28,307; 29°43,401	1,0 1,0	0,3	89,5	5,9	4,6
			1,1	6,6	57,1	36,3
5 Рук. Очаковский, 6-й км	45°26,809; 29°43,370	1,5 1,5	1,1	56,1	26,7	17,2
			1,5	42,6	42,4	15,0
6 Зал. Потапов кут	45°25,424; 29°45,983	1,8 1,8	1,0	38,9	49,3	11,8
			2,0	19,2	76,4	4,4
7 Рук. Полуденный	45°24,537; 29°45,623	1,0 1,0	1,3	93,9	1,4	4,7
			0,6	93,3	2,0	4,8
8 Зал. Делюков кут	45°24,398; 29°45,374	1,5 1,7	3,0	15,3	73,2	12,5
			2,1	15,4	77,4	7,2
9 Рук. Быстрый, 10-й км	45°20,381; 29°39,463	1,5 1,3	1,2	37,8	51,3	10,9
			0,7	42,3	32,8	24,9
10 Рук. Быстрый, 0-й км	45°20,259; 29°45,275	1,5 1,5	0,4	94,6	1,3	4,1
			0,3	90,2	1,8	8,0
11 Рук. Восточный, устье	45°18,154; 29°44,592	1,5 1,3	0,0	44,8	46,9	8,3
			1,2	34,5	52,5	13,0
12 Оз. Ананькин кут	45°16,549; 29°44,135	1,5 1,5	1,0	87,4	6,3	6,4
			1,6	82,7	10,8	6,5
13 Рук. Восточный, исток	45°18,305; 29°40,255	1,5 1,5	1,0	64,7	26,6	8,7
			0,6	48,0	40,2	11,8
14 Рук. Очаковский, 17-й км	45°23,231; 29°36,120	1,5 1,5	0,9	52,9	36,9	10,2
			1,0	38,8	47,2	14,0

Примечание. Здесь и в табл. 2—5: над чертой — данные 2006 г., под чертой — 2007 г.

держание тяжелых металлов (Cu, Zn, Ni, Pb, Cr, Cd, Ag) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) с пламенной и электротермической атомизацией, общее содержание ртути — методом ААС холодного

пара [30]. ХОП и ПХБ определяли методом газовой хроматографии с масс-спектрометрией (ГХ/МС) в режиме мониторинга селективных ионов (Agilent 6890N) и методом газовой хроматографии с электрозахватным детектором (ГХ/ЭЗД) с капиллярной колонкой [36, 37]. ПАУ определяли методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (НР 1050/DAD) с УФ-детектированием.

Биотестирование донных отложений проводили на водных вытяжках и цельных донных отложениях. Водные вытяжки готовили встряхиванием донных отложений в воде (1 : 4 по массе) с последующим использованием надосадочной жидкости. Исследовали выживаемость *Daphnia magna* Straus в остром опыте (3 сут) [7] и ингибирование роста корешков *Allium cepa* L. (5 сут) [26]. Токсичность цельных донных отложений исследовали по показателям выживаемости *Camptochironomus pallidivittatus* Maloch. (твердая фаза, 10 сут) и *Daphnia magna* (водная фаза, 3 сут) согласно рекомендациям [27].

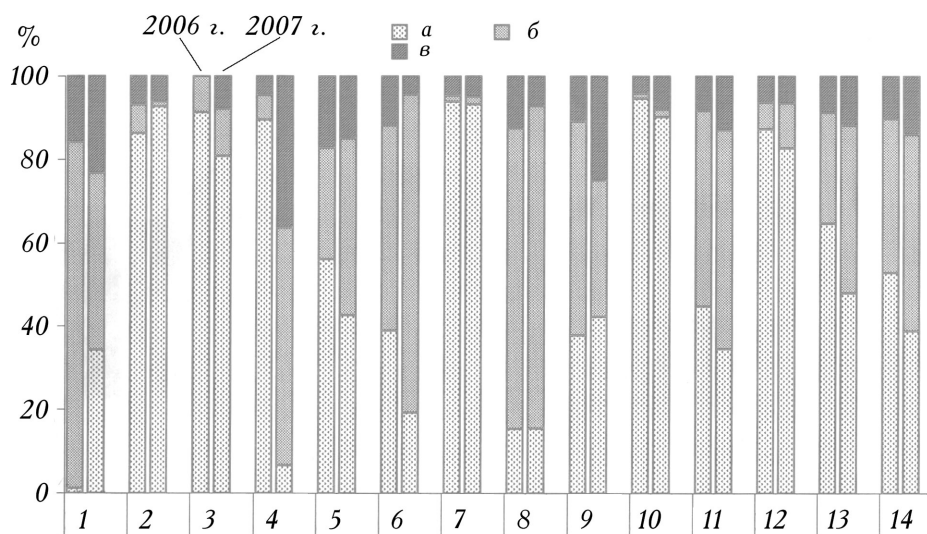
Биологическую индикацию состояния бентосных сообществ и загрязнения донных отложений осуществляли с использованием структурных характеристик фито- и зообентоса: показателей обилия, видового богатства, видового разнообразия, индекса Вудивисса (ТВІ) и биоиндикации сапробности по индексу Пантле — Букк, рассчитанных согласно общепринятым методам [11].

Результаты исследований

Превалирующей фракцией в составе донных отложений был песок (в среднем 56,3%): на ст. 2, 3, 5, 7, 10, 12, 13 и 14 — в 2006 и 2007 гг., ст. 4 — в 2006 г., ст. 9 — в 2007 г. Илы преобладали на станциях 1, 6, 8, 11 (в среднем 32,9%) в оба периода исследований, на ст. 4 — только в 2007 г., а на ст. 9 — в 2006 г. Глина — наименее представленная фракция в гранулометрическом составе донных отложений всех станций (в среднем 10,9%). Сравнение гранулометрического состава грунтов двух лет показывает его стабильность практических на всех станциях (рис. 2), за исключением ст. 1 и 9, где в 2007 г. отмечено увеличение доли песка и уменьшение ила, и ст. 4, где динамика соотношения фракций противоположная.

Анализ содержания загрязняющих веществ в донных отложениях исследованных участков показал значительную пространственную и временную вариабельность этого показателя (табл. 2). Наименьшие колебания концентрации отмечены для кадмия ($0,22 \pm 0,20$ в 2006 г. и $0,31 \pm 0,15$ мкг/г в 2007 г.), а также серебра ($0,13 \pm 0,06$ мкг/г) и ртути ($0,20 \pm 0,12$ мкг/г) в 2007 г. Наибольший разброс концентраций характерен для ПАУ — от 236 мкг/г (ст. 7) до 4991 мкг/г (ст. 8) в 2006 г. и от 73 мкг/г (ст. 3) до 2238 мкг/г (ст. 1) в 2007 г.

Различия в концентрации между двумя годами исследований наиболее существенными оказались для ртути и свинца: содержание первого металла уменьшилось в 2007 г. на всех исследованных станциях в 8—181 раз, а второго — увеличилось в 4—56 раз. На ст. 4 в 2007 г. зарегистрировано увеличение концентрации цинка, меди, свинца, кадмия, серебра, а также суммарно-



2. Гранулометрический состав донных отложений авандельты Килийского рукава: *а* — песок; *б* — ил; *в* — глина. (1—14 — номера станций).

го содержания ПХБ, ПАУ и ХОП. Аналогичная тенденция отмечена в донных отложениях ст. 8 для цинка, меди, никеля, свинца, кадмия и суммарного ПХБ. Наоборот, на ст. 1 и 2 наблюдалось снижение концентрации большинства загрязняющих веществ в 2007 г. по сравнению с 2006 г., что может быть связано с увеличением доли песчаной фракции в донных отложениях.

В целом по данным о валовом содержании химических соединений в донных отложениях, наибольшим загрязнением в 2006 г. характеризовалась ст. 5, где была зарегистрирована максимальная концентрация цинка, хрома, ПХБ, а также достаточно высокие — ХОП и ПАУ. В 2007 г. наибольшая концентрация практически всех исследованных загрязняющих веществ отмечена на ст. 8. Минимальное загрязнение токсическими веществами как в 2006, так и в 2007 г. было обнаружено на ст. 10 (см. табл. 2). Низкая концентрация токсикантов на этой станции может быть связана с дноуглубительными работами по обеспечению навигации, которые проводятся здесь с 2004 г. Также к акваториям с наиболее чистыми донными отложениями в 2006 г. следует отнести ст. 4, а в 2007 — ст. 7. Следует отметить, что все три исследованных участка отличаются преобладанием песчаной фракции (см. табл. 1, рис. 2), которая характеризуется намного меньшей адсорбционной способностью, чем глинистая и илистая.

Биотестирование донных отложений показывает совокупное, комбинированное воздействие токсикантов различной химической природы на выбранные тест-объекты. С целью наиболее полного охвата механизмов их воздействия на биоту были применены две схемы постановки опытов — биотестирование цельных донных отложений и их водных вытяжек.

2. Содержание токсических веществ (мкг/г) в донных отложениях аванделты Кийийского рукава

Токсические вещества	Станции													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Zn (79,00)	98,50	57,50	35,00	47,50	110,00	100,00	30,00	23,80	80,00	22,25	108,50	57,50	75,75	87,50
	90,80	28,80	50,60	121,00	112,00	104,00	29,40	138,00	104,00	28,80	88,20	74,00	67,70	105,00
Cu (53,00)	55,00	12,00	12,00	10,00	45,00	37,50	8,50	9,80	30,00	5,00	27,00	16,00	0,80	31,80
	32,20	3,70	11,30	42,40	34,20	40,20	3,30	56,80	38,70	7,30	34,30	25,10	21,10	42,00
Ni (23,00)	36,20	20,80	16,20	18,50	32,00	31,00	16,20	4,00	27,50	16,00	28,00	23,80	28,80	30,50
	21,95	11,30	13,80	29,80	23,50	21,30	12,65	24,00	24,80	11,30	20,95	22,40	19,45	26,50
Cr (24,00)	130,00	87,50	40,00	60,00	140,00	137,50	60,00	57,50	115,00	42,50	105,80	100,00	112,50	130,00
	39,20	17,20	20,70	52,20	43,50	47,70	15,50	62,20	43,20	20,40	40,90	37,50	34,60	46,20
Pb (10,00)	10,25	6,25	4,75	5,25	8,75	9,50	2,50	1,28	3,00	1,88	10,00	6,50	7,50	12,00
	56,60	26,80	28,30	61,80	55,10	64,00	28,30	71,40	58,10	38,00	46,85	34,75	43,85	57,20
Cd (0,10)	0,55	0,15	0,05	0,10	0,50	0,50	0,08	0,08	0,58	0,05	0,25	0,13	0,20	0,25
	0,39	0,34	0,15	0,42	0,42	0,26	0,05	0,61	0,44	0,11	0,30	0,33	0,20	0,42
Ag	0,10	0,25	< 0,03	0,08	0,05	0,05	< 0,03	0,15	0,18	0,05	8,00	0,18	0,05	0,08
	0,09	< 0,025	0,05	0,17	0,16	0,15	0,025	0,22	0,14	0,03	0,13	0,10	0,06	0,21
Hg	5,70	5,40	5,10	6,00	13,60	4,50	16,30	4,80	2,30	7,80	5,40	7,50	10,20	2,00
	0,16	0,08	0,09	0,19	0,16	0,24	0,09	0,52	0,19	0,07	0,17	0,38	0,13	0,24
ΣПХБ	17,50	6,20	3,10	0,70	28,50	15,30	13,30	26,40	10,20	0,40	14,10	7,50	3,80	8,20
	6,19	8,53	75,30	13,10	81,30	26,38	68,75	73,44	12,10	0,99	20,75	64,00	6,50	24,80
ΣПАУ	251	279	278	278	2337	1439	236	4991	1107	234	266	706	702	279
	2238	1400	73	1309	377	504	73	2133	1718	806	1249	1512	825	1805
ΣХОП	45,20	19,60	11,50	7,40	65,90	30,10	10,40	57,30	69,80	12,40	51,00	27,70	21,70	0,40
	9,02	12,43	36,26	178,00	118,49	38,44	100,20	107,04	17,64	1,44	30,24	209,40	9,47	26,34

Примечание. В скобках — фоновое содержание, мкг/г [14].

Усредненный за два года исследований показатель выживаемости личинок хирономид составил около 78%, а дафний — 83 и 85% (соответственно в водной фазе при испытании цельных донных отложений и в водных вытяжках). При этом контрольные величины выживаемости составляли около 95% для дафний и 93% — для хирономид (табл. 3).

Результаты биотестирования показали, что в 2006 г. наибольшей токсичностью характеризовались донные отложения ст. 8, неблагоприятное воздействие оказывали также донные отложения ст. 3, 4 и 14. В 2007 г. эти результаты подтвердились лишь для ст. 3, кроме того, зарегистрирована токсичность донных отложений ст. 5. Необходимо отметить, что в 2007 г. водные вытяжки донных отложений были достоверно ($p < 0,01$) менее токсичны, чем водная фаза цельнооседиментных отложений, что показано в опытах с *Daphnia magna*. Эти данные являются несколько неожиданными, поскольку методика приготовления водных вытяжек обычно способствует повышению биодоступной фракции токсикантов. Заметим, что в 2006 г. преобладала именно такая тенденция.

Результаты анализа структурных характеристик бентосных сообществ водорослей и беспозвоночных, которые в значительной степени являются производными условий их обитания на дне (а значит и находящихся здесь загрязнений), представлены в табл. 4. Исходя из данных, полученных по каждой отдельной станции, можно отметить преобладающую тенденцию уменьшения видового богатства и показателей обилия фитобентоса от 2006 к 2007 г. Наименьшее количество видов в донных альгоценозах (8) в 2006 г. было зафиксировано на ст. 2, в 2007 г. (4) — на ст. 11. Наибольшим количеством видов характеризовались альгоценозы ст. 6 в 2006 г. и ст. 12 в 2007 г. — соответственно 29 и 33.

В 2006 г. отмечено увеличение количества видов донных макробеспозвоночных на большинстве станций. Нарушение этой тенденции характерно только для пресноводного озера и заливов дельты (ст. 6, 8, 12), где не были зарегистрированы жуки, клопы, личинки мокрецов (*Ceratopogonidae*) и комаров-звонцов (*Chironomidae*). Наибольшее видовое богатство зообентоса в дельте в 2006 и 2007 гг. зарегистрировано на ст. 11 — соответственно 11 и 12 видов. Наименьшее количество видов макробеспозвоночных в 2006 г. отмечено на ст. 7 (всего 2 вида), а в 2007 г. — на ст. 8 (3 вида).

В целом показатели обилия бентосных сообществ (см. табл. 4) характеризовались большой изменчивостью как во времени (по годам), так и в пространстве (по станциям). Минимальные значения численности и биомассы водорослей в 2006 г. зафиксированы на ст. 4, в 2007 г. — на ст. 7, а максимальные — на ст. 8 в 2006 г. и ст. 12 в 2007 г. Самой низкой численностью макрозообентоса в 2006 г. характеризовалась ст. 13, а в 2007 г. — ст. 12, на которой также были зафиксированы минимальные значения биомассы в оба периода исследований. Наибольшая численность макрозообентоса в 2006 г. отмечена на ст. 2, а биомасса — на ст. 1. В 2007 г. максимальные значения соответствующих показателей зарегистрированы на ст. 6 и 4.

3. Результаты биотестирования донных отложений авандельты Килийского рукава

Номера станций	Цельные донные отложения		Водные вытяжки донных отложений	
	выживаемость <i>Camptochironomus pallidivittatus</i> (%), 10 сут	выживаемость <i>Daphnia magna</i> (%), 3 сут	выживаемость <i>Daphnia magna</i> (%), 3 сут	ингибирование роста корешков <i>Allium scera</i> (% от контроля), 5 сут
1	52,5 **	95,0	100	25,6 *
	85,0	65,0 *	100	-10,9
2	90,0	93,8	66,7 **	29,2 **
	96,7	75,0 *	100,0	-11,6
3	80,0 *	93,8	94,4	44,6 **
	90,0	75,0 *	94,4	19,6 **
4	35,0 *	80,0	75,6 *	-12,6 *
	83,3 *	80,0	100,0	-13,3
5	83,3	80,0 *	83,3	37,4 *
	62,5 **	70,0 *	100,0	-16,0
6	86,7	100,0	95,8	33,8 *
	60,0 **	85,0	100,0	-11,4
7	83,3 *	80,0	52,4 **	10,3
	60,0 **	80,0	100,0	-16,6
8	73,3 *	61,1 **	69,0 *	33,6 *
	80,0 *	80,0	50,0	-11,7
9	90,0	100,0	83,3	38,3 *
	87,5	90,0	61,1 **	2,5
10	66,7 **	93,3	66,7 *	17,0 *
	73,3 *	65,0 *	100,0	1,8
11	86,7	100,0	83,3	5,2
	86,7	80,0	94,4	-6,3
12	73,3 *	80,0	85,0	39,0 *
	92,5	85,0	83,3	-8,4
13	92,0	93,3	89,7	31,8 *
	85,0	80,0	100,0	2,8
14	70,0 *	86,7	45,4 **	42,5 **
	72,2 *	93,3	100,0	-25,2

Примечание. Уровень значимости: * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; «-» — рост корешков лука в опытах проходил интенсивнее, чем в контроле.

Индекс Шеннона в целом характеризовался сравнительно невысокими значениями (см. табл. 4). Минимальные величины для микрофитобентоса

зафиксированы на ст. 3 и 7, а зообентоса — на ст. 2 и 8 соответственно в 2006 и 2007 гг. В 2006 г. максимальные значения получены на ст. 11 для обеих биотических группировок, а в 2007 г. для микрофитобентоса — на ст. 6, а для макрозообентоса — на ст. 7.

Сапробиологическая оценка с использованием организмов фитобентоса в оба года исследований показала сходную картину: практически все станции относились к β -мезосапробной зоне. Исключение составляла ст. 2 в 2006 г., где определена α -олигосапробная зона. В результате сапробиологического анализа по организмам макрозообентоса были получены более разнородные результаты (см. табл. 4). Так, β -мезосапробная зона была зафиксирована только на ст. 14 в 2007 г. Наиболее загрязненными участками были ст. 6 и 8, где сапробиологические индексы Пантале — Букк соответствовали полисапробной зоне. Остальные участки характеризовались как α -мезосапробные.

Значения ТВІ на большинстве исследованных участков дельты были очень низкими, не выше 2 баллов. На ст. 7 и 10 этот показатель в оба года исследований был несколько выше и составлял 4 балла. На ст. 4 значение индекса уменьшалось от 4 баллов в 2006 г. до 2 баллов в 2007 г., а на ст. 2 и 14 — соответственно от 3 до 2. На ст. 11 наблюдалась обратная картина: индекс ТВІ возрастал от 2 балов в 2006 г. до 5 баллов в 2007 г.

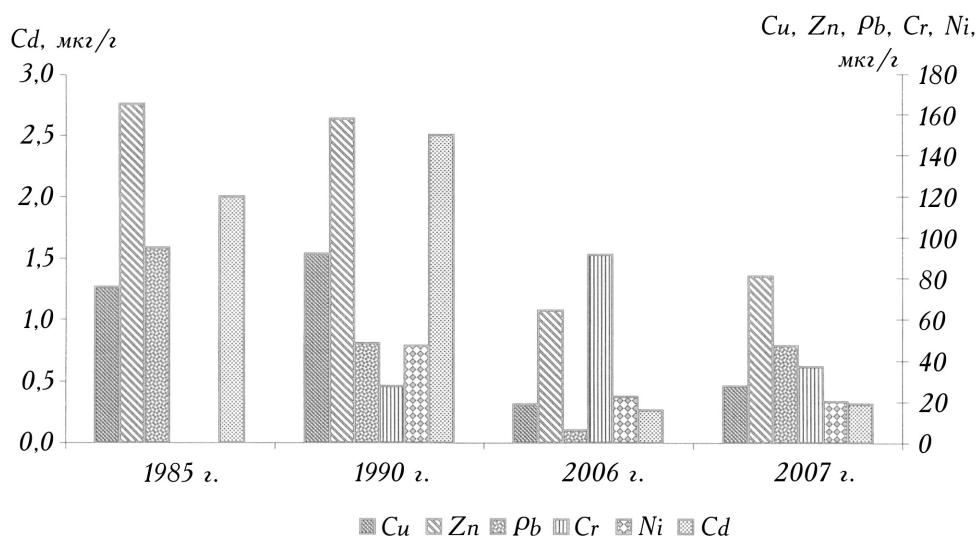
Обсуждение результатов исследований

С учетом подходов и принципов, декларируемых Водной Рамочной Директивой [3], для более корректного анализа данных по содержанию тяжелых металлов, не зависящего от нормативной базы сопредельных стран на трансграничной р. Дунай, было проведено сравнение полученных результатов с фоновыми величинами. В качестве фоновых [2] мы приняли содержание тяжелых металлов в наименее подверженных антропогенному воздействию экосистемах [14].

Анализ показал превышение фоновых величин цинка почти в 2 раза в 2007 г. на ст. 4 и 8, а никеля — в 1,5 раза в 2006 г. на ст. 1. Превышение фоновых величин на всех исследованных станциях в 2006 г. было характерно для кадмия и хрома (в 2—6 раз), а в 2007 г. — для свинца (в 3—7 раз). Исключение составляла лишь медь в оба года исследований и свинец в 2006 г. (см. табл. 2).

Сравнивая полученные результаты с данными предыдущих лет [2, 4], следует отметить значительное снижение валовых концентраций пяти из шести исследованных металлов в современный период (рис. 3), кроме содержания хрома в 2006 г. То есть можно констатировать снижение содержания большинства тяжелых металлов в донных отложениях по сравнению с их концентрацией в 80-е годы прошлого столетия и в то же время превышение фоновых величин кадмия, свинца и хрома.

Корреляционный анализ содержания токсических веществ и гранулометрического состава донных отложений показал, что концентрация боль-



3. Многолетняя динамика содержания тяжелых металлов в донных отложениях украинского участка Дуная (средние величины): 1985 г. — [4], 1990 г. — [2], 2006 и 2007 гг. — наши данные.

шинства металлов (за исключением ртути), ПХБ и ХОП достоверно уменьшается с увеличением доли песчаной фракции (табл. 5). С повышением доли глинистой фракции в составе грунтов на разных станциях в 2006 г. концентрация большинства исследованных химических веществ увеличивалась. В 2007 г. подобная динамика отмечена для никеля, а возрастание концентрации остальных тяжелых металлов связано с увеличением доли илистой фракции. Полученные результаты хорошо согласуются с данными других авторов [13, 16, 17].

В целом следует отметить, что донные отложения авандельты Килийского рукава не обладали ярко выраженными токсическими свойствами. При этом отмечены случаи повышенного токсического воздействия, не связанные, однако, с высокими концентрациями изученных загрязняющих веществ (см. табл. 4).

Наименьшим содержанием загрязняющих веществ (превышение фоновых величин отмечено только для Cd и Pb (см. табл. 2)) характеризовалась ст. 10 (Быстрый, 0-й км), грунты которой в наибольшей степени представлены песчаной фракцией. Здесь же зафиксированы невысокие характеристики развития бентосных сообществ, что может быть связано как с разрушением донных сообществ вследствие дноуглубительных работ, проводящихся на этом участке с 2004 г., так и с высокой токсичностью донных отложений (см. табл. 3). Последнее обусловлено увеличением биодоступности токсиантов из-за низкого содержания органического углерода и значительного преобладания песчаной фракции (см. табл. 1).

Только донные отложения, отобранные на ст. 8 в 2006 г., оказывали достоверное неблагоприятное воздействие на все выбранные тест-объекты,

при этом валовое содержание в них токсикантов органической природы было наивысшим (см. табл. 2). Донные отложения ст. 5 (2007 г.), имеющие максимальную концентрацию ПХБ, оказывали достоверное отрицательное воздействие на *Camptochironomus pallidivittatus* и *Daphnia magna* в опытах с цельными донными отложениями.

Одним из косвенных показателей того, что токсикологическая ситуация в изучаемых водных объектах в целом является благополучной, можно считать отсутствие каких-либо значимых зависимостей между концентрацией загрязняющих веществ и проявлением токсического эффекта в опытах как с водными вытяжками, так и с цельными донными отложениями в оба года исследований. Не отмечена также взаимосвязь между реакциями использованных тест-объектов.

Валовое содержание токсических веществ в донных отложениях не всегда характеризует их реальную токсичность и биодоступность. Анализ литературных данных свидетельствует, что наиболее доступными для гидробионтов являются комплексные соединения тяжелых металлов и органических веществ с низкой и средней молекулярной массой, а также свободные гидратированные ионы металлов и их соединения с неорганическими лигандами [8, 10]. Высокомолекулярные комплексные соединения металлов, по мнению ряда исследователей, биологически неактивны [9]. В 2006 г. содержание органического углерода в донных отложениях было на 14% ниже ($p > 0,05$), чем в 2007 г., а количество илистой фракции — на 37% ($p < 0,05$). Очевидно, именно в связи с этим большинство отрицательных эффектов, обнаруженных при биотестировании, от-

5. Зависимость содержания токсических веществ в донных отложениях от их гранулометрического состава (коэффициенты корреляции Пирсона)

	Zn	Cu	Ni	Cr	Pb	Cd	Ag	Hg	ПХБ	ПАУ	ХОП
Песок	-0,53 -0,92	-0,67 -0,91	-0,34 -0,84	-0,56 -0,93	-0,34 -0,91	-0,67 -0,67	-0,16 -0,84	0,38 -0,47	-0,67 -0,41	-0,49 0,14	-0,67 -0,11
Глина	0,47 0,88	0,62 0,90	0,29 0,73	0,49 0,91	0,30 0,91	0,62 0,62	0,18 0,83	-0,42 0,57	0,62 0,34	0,48 -0,03	0,64 0,08
Ил	0,67 0,49	0,75 0,43	0,53 0,66	0,78 0,47	0,44 0,42	0,78 0,42	-0,02 0,38	-0,02 -0,08	0,79 0,38	0,49 -0,39	0,70 0,15
C _{орг}	-0,19 0,49	0,12 0,47	-0,30 0,27	0,03 0,34	-0,29 0,49	0,13 0,50	-0,39 0,47	0,01 0,64	0,64 0,35	0,81 0,12	0,42 0,50

Примечание. Жирным шрифтом обозначены статистически достоверные величины, $p < 0,05$.

мечено в 2006 г. (см. табл. 3). В 2007 г. наблюдалось снижение токсичности, что особенно проявилось при тестировании водных вытяжек донных отложений. Так, усредненная величина выживаемости *Daphnia magna* в водных вытяжках была на 13% выше ($p < 0,05$), чем в 2006 г., и приближалась к контрольным величинам (92%). Аналогичная закономерность характерна и для *Allium sera*.

Таким образом, увеличение содержания органического углерода (что также подтверждается достоверным увеличением доли глинистой фракции) в донных отложениях в 2007 г. обусловило снижение количества выявленных случаев отрицательного воздействия на тест-организмы. Слабая корреляция межгодовых показателей содержания токсикантов и органического вещества свидетельствует о том, что система «токсикант — органический углерод донных отложений» находится в нестойком динамическом равновесии, снижая в большинстве случаев биодоступность и токсичность загрязняющих веществ до уровня чувствительности методов биотестирования. Однако при неблагоприятном сочетании физико-химических, гидродинамических или других факторов существует вероятность проявления острого отрицательного эффекта загрязняющих веществ на бентосные организмы; возникновение таких очагов токсичности трудно предсказуемо и имеет, очевидно, сезонные и годовые особенности.

Для выяснения зависимости между структурными характеристиками бентосных сообществ, содержанием химических веществ и гранулометрическим составом донных отложений были проведены расчеты коэффициентов корреляции между исследованными показателями. Однако достоверных зависимостей между структурными характеристиками бентоса и валовым содержанием токсикантов обнаружено не было. В то же время выявлена зависимость между гранулометрическим составом донных отложений и некоторыми количественными показателями фито- и зообентосных сообществ. Увеличение в составе донных отложений иловой фракции положительно влияет на количественные характеристики: видовое богатство (коэффициент корреляции $r = 0,54$), численность ($r = 0,71$) и биомассу фитобентоса ($r = 0,56$), биомассу макрозообентоса ($r = 0,54$). Загрязненность донных отложений, определенная по индексу Вудивисса (*TBI*), снижается с повышением доли крупнодисперсной фракции донных отложений ($r = 0,70$), что закономерно, учитывая высокую способность песков к промываемости.

Результаты обобщенного анализа характеристик донных отложений с использованием «триадного» подхода представлены ниже (указаны станции с предельными значениями показателей).

Химические анализы

Высокое содержание веществ токсического действия

Рук. Очаковский, 6-й км (ст. 5)

Зал. Делюков кут (ст. 8)

Низкое содержание веществ токсического действия

Рук. Быстрый, 0-й км (ст. 10)

Соединительный канал, море (ст. 4)

Рук. Полуденный (ст. 7)

Биотестирование

Высокая токсичность	Низкая токсичность
Соединительный канал (ст. 3, 4)	Рук. Восточный, устье (ст. 11)
Рук. Очаковский (ст. 5, 14)	Оз. Ананькин кут (ст. 12)
Зал. Делюков кут (ст. 8)	Рук. Восточный, исток (ст. 13)

Биоиндикация по структуре фитобентосных сообществ

Нарушенные сообщества	Ненарушенные сообщества
Рук. Восточный, исток (ст. 13)	Зал. Делюков кут (ст. 8)
	Оз. Ананькин кут (ст. 12)

Биоиндикация по структуре зообентосных сообществ

Нарушенные сообщества	Ненарушенные сообщества
Оз. Ананькин кут (ст. 12)	Рук. Восточный, устье (ст. 11)

Заключение

Полученные материалы свидетельствуют о загрязнении донных отложений авандельты Кипийского рукава хромом, кадмием, свинцом, ПАУ и ПХБ и, таким образом, позволяют сделать вывод о приоритетности этих токсикантов для исследованного района. Наибольшим их содержанием характеризовались ст. 5 (рук. Очаковский, 6-й км) и ст. 8 (зал. Делюков кут), низким — ст. 10 (рук. Быстрый, 10-й км), ст. 7 (рук. Полуденный) и ст. 4 (Соединительный канал, выход в море). Содержание остальных тяжелых металлов в донных отложениях было сравнительно невысоким и более низким, чем в 80-е годы прошлого столетия.

По результатам биотестирования исследованные донные отложения в целом не обладают ярко выраженными токсическими свойствами, что может быть обусловлено их умеренным загрязнением токсикантами различной химической природы. В то же время донные отложения, оказывающие неблагоприятное воздействие, можно разделить на две категории: 1) токсичность обусловлена максимальной концентрацией органических токсикантов (ст. 5 и 8); 2) токсичность связана с небольшой концентрацией органического углерода на фоне низкого или умеренного содержания токсикантов (ст. 3, 4, 10).

Как и при биотестировании, структурные показатели донных сообществ не показали достоверной связи с содержанием токсикантов в донных отложениях. Невысокие характеристики развития бентоса, формирующегося в условиях сильного течения (рукава) или низкого содержания кислорода (заливы-куты), могут быть нормальными (типичными) для этих биотопов. Анализ состояния донных сообществ предполагает сравнение с референсными условиями либо по ретроспективным материалам, либо по отношению к эталонным участкам. Результаты этого анализа будут представлены в последующих публикациях. Здесь лишь отметим, что станции с оптимальными характеристиками сообществ донных макробеспозвоночных (ст. 11, рук. Восточный, устье) не отличались высоким содержанием загрязняющих веществ и высокой токсичностью. При этом значительная концентрация токсикантов и высокая токсичность донных отложений, зарегистри-

рованные в зал. Делюков кут (ст. 8), не подтвердились нарушением структуры бентосных сообществ.

В целом полученные результаты показали средний уровень загрязнения донных отложений авандельты Килийского рукава, что свидетельствует о динамичности содержания загрязняющих веществ и их сравнительно низкой биодоступности. Данные о валовом содержании токсических веществ, без информации о форме их нахождения в донных отложениях, не позволяют однозначно судить о токсичности последних.

**

Для визначення якості донних відкладів було застосовано «тріадний» підхід, який передбачає аналіз валового вмісту токсикантів, біотестування донних відкладів, а також дослідження структури зоо- та фітобентосних угруповань. Одержані результати показали середній рівень забруднення та відсутність яскраво вираженої токсичності донних відкладів, а також відсутність чітких зв'язків структурних показників бентосних угруповань та вмісту токсикантів.

**

The triad approach for assessment of sediment quality was used: the analysis of total content of toxic contaminants and toxicity testing were carried out, also structural characteristics of phyto- and zoobenthos communities were investigated. Findings showed the moderate level of pollution and absence of the pronounced toxicity of bottom sediments, and also lack of distinct relation between structural indices of benthic assemblages and toxicant content.

**

1. Александрова Л.Н., Найгенов О.А. Лабораторно-практические занятия по почвоведению. — Л.: Агропромиздат. — 1986. — С. 102 — 109.
2. Белоконь В.Н., Басс Я.И. Содержание тяжелых металлов, органических веществ и соединений биогенных элементов в донных отложениях Дуная // Вод. ресурсы. — 1993. — Т. 20, № 4. — С. 469—478.
3. Водна Рамкова Директива ЄС 2000/60/ЄС. Основні терміни та їх визначення / EU Water Framework Directive 2000/60/EC. Definitions of Main Terms. — К., 2006. — 240 с.
4. Гигроэкология украинского участка Дуная и сопредельных водоемов / Т. А. Харченко, В. М. Тимченко, А. А. Ковальчук и др. — Киев: Наук. думка, 1993. — 328 с.
5. Екологічні проблеми басейну Дунаю в межах України. — К.: Гідроекол. т-во України, 1996. — 123 с.
6. Китаев С.П. Экологические основы биопродуктивности озер разных природных зон. — М.: Наука, 1984. — 207 с.
7. КНД 211.1.4.054-97. Методика. Визначення гострої токсичності води на ракоподібних *Daphnia magna* Straus.
8. Кочарян А.Г. Формы существования тяжелых металлов в водах, донных отложениях и высшей водной растительности водохранилищ Волжского каскада // Актуальные проблемы рационального использования биоло-

- гических ресурсов водохранилищ. — Рыбинск: Изд-во ОАО Рыбинский дом печати. — 2005. — С. 151—161.
9. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Комплексообразование ионов металлов в природных водах // Гидробиол. журн. — 1983. — Т. 19, № 3. — С. 83—95.
 10. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водах. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 269 с.
 11. *Методи гідроекологічних досліджень поверхневих вод* / За ред. В. Д. Романенка. — К.: ЛОГОС, 2006. — 408 с.
 12. Михайлов В.Н., Вагин Н.Ф., Морозов В.Н. Основные закономерности гидрологического режима дельты Дуная и его антропогенных изменений // Вод. ресурсы. — 1981. — № 6. — С. 22—44.
 13. Овсяный Е.И., Романов А.С., Игнатьева О.Г. Распределение тяжелых металлов в поверхностном слое донных осадков Севастопольской бухты (Черное море) // Мор. екол. журн. — 2003. — Т. 2. — С. 85—93.
 14. Петрухин В.А., Буриева Л.В., Папенко Л.А. и др. Фоновое содержание микроэлементов в природных средах (по мировым данным). Сообщение 5 // Мониторинг фонового загрязнения природных сред. — Л.: Гидрометеиздат, 1989. — Вып. 5. — С. 4—30.
 15. Романенко В.Д. Основы гідроекології: Підручник. — К.: Обереги, 2001. — 728 с.
 16. Романов А.С., Орехова О.Г., Игнатьева О.Г. и др. Влияние физико-химических характеристик донных осадков на распределение микроэлементов на примере бухт Севастополя (Черное море) // Экология моря. — 2007. — Вып. 73. — С. 85—90.
 17. Степанова Н.Ю., Латыпова В.З., Анохина О.К., Таиров Р.Г. Сорбционная способность и факторы формирования химического состава донных отложений Куйбышевского и Нижнекамского водохранилищ // Экол. химия. — 2003. — 12, № 2. — С. 105-116.
 18. Тимченко В.М., Новиков Б.И. Эколого-гидрологическая характеристика Дуная и придунайских водоемов в пределах Украины // Гидроэкология Украинского участка Дуная и сопредельных водоемов. — Киев: Наук. думка, 1993. — С. 7—22.
 19. Флеров Б.А., Томилина И.И., Кливленг Л. и др. Комплексная оценка состояния донных отложений Рыбинского водохранилища // Биология внутр. вод. — 2000. — № 2. — С. 148—155.
 20. Шитиков В.К., Розенберг Г.С., Зинченко Т.Д. Количественная гидроэкология: методы системной идентификации. — Тольятти: ИЭВБ РАН, 2003. — 463 с.
 21. Шуйский В.Ф., Максимова Т.В., Петров Д.С. Биоиндикация качества водной среды, состояния пресноводных экосистем и их антропогенных изменений // Сб. науч. докл. VII Междунар. конф. «Экология и развитие Северо-Запада России», С.-Петербург, 2—7 авг. 2002 г. — СПб.: Изд-во МАНЭБ, 2002. — С. 176—190.
 22. Canfield T.J., Dwyer F.G., Fairchild J.F. et al. Assessing contamination in Great lakes sediment using benthic invertebrate communities and the sediment triad approach // J. Great lakes Res. — 1996. — Vol. 22, N 3. — P. 565—583.

23. *Chapman P.M.* Current approaches to developing sediment quality criteria // *Environ. Toxicol. Chem.* — 1989. — Vol. 8.— P. 589—599.
24. *Consensus-Based Sediment Quality Guidelines Recommendations for Use & Application. Interim Guidance.* — Wisconsin, Dep. of Natural Resources. — 2003. — 35 p.
25. *Danube Delta. Genesis and biodiversity.* — Leiden: Backhus Publ. — 2006. — 445 p.
26. *Fiskesjo G.* Allium test I: A 2—3 day plant test for toxicity assessment by measuring the mean root growth of onions (*Allium cepa*) // *Environ. Toxicol. Water. Qual.* — 1993. — Vol. 8. — P. 461—470.
27. *Ho K.T., Kuhn A., Pelletier M. et al.* Sediment Toxicity Assessment: Comparison of Standard and New Testing Designs // *Environ. Contam. Toxicol.* — 2000. — Vol. 39. — P. 462—468.
28. *ISO 11277* Soil quality — Determination of particle size distribution in mineral soil material — Method by sieving and sedimentation.
29. *ISO 11464:2006* Якість ґрунту. Попереднє оброблення зразків для фізико-хімічного аналізу.
30. *ISO 16772* Soil quality — Determination of mercury in aqua regia soil extracts with cold-vapour atomic spectrometry or vapour atomic fluorescence spectrometry.
31. *Khan Z., Troquet J., Vachelard C.* Sample preparation and analytical techniques for determination of polyaromatic hydrocarbons in soil.// *Intern. J. Environ. Sci. Tech.* — 2005. — Vol. 2, N 3. — P. 275—286.
32. *Milyikin M.V.* Determination of isomeric-specific composition of polychlorinated biphenyls in natural and drinking waters of Dniper river basin in Kyiv region using chromatography and mass spectrometry // *Role of Interfaces in Environmental Protection* (Edited by S.Barany). — NATO Sci. Ser.: IV. Earth and Environmental Sciences. — Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 2003. — Vol. 24 — P. 103—120.
33. *US EPA Method 3051A.* Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils and oils.
34. *US EPA Method 3540C.* Solids. Soxhlet extraction of Semivolatile and Non-volatile Organic.
35. *US EPA Method 3665A* Sulfuric acid/permanganate cleanup.
36. *US EPA Method 8082.* Polychlorinated Biphenyls (PCB's) by Gas Chromatography.
37. *US EPA Method 8270D.* Semivolatile organic compounds by gas chromatography/mass spectrometry.

¹ Інститут гидробиології НАН України, Київ

² Інститут колоїдної хімії і хімії води
НАН України, Київ

³ Агентство охорони навколишнього середовища США,
Атлантичне відділення екології, Наррагансетт

Поступила 06.07.09