

## Содержание микроэлементов и тяжелых металлов в донных отложениях Днепро-Бугского лимана

Е. А. Котельянец, Т. В. Хмара\*

*Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия*

*\*e-mail: xmara@mhi-ras.ru*

Поступила: 26.03.2020 г.; принята к публикации 08.05.2020 г.; опубликована 25.06.2020 г.

Представлены результаты содержания микроэлементов (As, Ti) и тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V, Sr, Fe, Mn) в поверхностном слое донных отложений акватории Днепро-Бугского лимана с учетом их гранулометрического состава. Анализ полученных результатов позволил выделить зоны повышенного содержания данных микроэлементов и тяжелых металлов в донных отложениях исследуемой акватории. Исходя из особенностей пространственного распределения элементов, выделены две группы: в акватории Бугского лимана определены максимальные концентрации Cr, Co, Sr, Zn, V, Ti, а в западной части Днепро-Бугского лимана – максимальные концентрации Cu, Fe, Mn. Пробы донных отложений были отобраны в верхнем слое осадков Днепро-Бугского лимана в сентябре 2007 г. во время гидролого-гидрохимической съемки. Содержание микроэлементов и тяжелых металлов в донных отложениях определяли с помощью рентгенофлуоресцентного метода анализа. Проведена оценка уровня загрязнения донных отложений микроэлементами и тяжелыми металлами путем сравнения с загрязненностью ранее изученных мелководных акваторий (Севастопольская и Балаклавская бухты). Рассмотрены особенности пространственного распределения микроэлементов и тяжелых металлов в донных осадках Днепро-Бугского лимана с учетом динамики его водных масс, которая отличается исключительной сложностью.

**Ключевые слова:** донные отложения, гранулометрический состав, микроэлементы, тяжелые металлы, гидродинамика, Днепро-Бугский лиман.

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания ФГБУН ФИЦ МГИ «Комплексные междисциплинарные исследования океанологических процессов, определяющих функционирование прибрежных зон Черного и Азовского морей» (№ 0827-2019-0004). Авторы выражают благодарность доктору географических наук Елене Евгеньевне Совге за содействие в подготовке статьи и ценные рекомендации в процессе написания публикации.

**Для цитирования:** *Котельянец Е. А., Хмара Т. В.* Содержание микроэлементов и тяжелых металлов в донных отложениях Днепро-Бугского лимана // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2020. № 2. С. 140–151. doi:10.22449/2413-5577-2020-2-140-151

© Котельянец Е. А., Хмара Т. В., 2020



Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0)

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0) License

## Content of Trace Elements and Heavy Metals in the Dnieper-Bug Bottom Sediments

E. A. Kotelyanets, T. V. Khmara\*

Marine Hydrophysical Institute RAS, Sevastopol, Russia

\*e-mail: xmara@mhi-ras.ru

Submitted 26.03.2020; revised 08.05.2020; published 25.06.2020

The paper presents the content of trace elements (As, Ti) and heavy metals (Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V, Sr, Fe, Mn) in the surface layer of the Dnieper-Bug estuary bottom sediments according to their particle size distribution. Analysis of the results revealed areas of increased content of these trace elements and heavy metals in the bottom sediments of the waters under study. Two groups of elements are distinguished given the peculiarities of their spatial distribution: in the Bug estuary water area, maximum concentrations of Cr, Co, Sr, Zn, V, Ti were determined, whereas in the western part of the Dnieper-Bug estuary, maximum concentrations of Cu, Fe, Mn were determined. Samples of bottom sediments were taken in the upper layer of the Dnieper-Bug estuary sediments during a hydrological-hydrochemical survey in September 2007. Trace elements and heavy metals content in the bottom sediments were determined using the X-ray fluorescence method.

The level is estimated of bottom sediments contamination with trace elements and heavy metals through its comparison with the data obtained in previous studies of shallow water areas (the Sevastopol and Balaklava Bays). The features are considered of the spatial distribution of trace elements and heavy metals in the bottom sediments of the Dnieper-Bug estuary given its water dynamics, which is extremely complex there.

**Keywords:** bottom sediments, particle size distribution, trace elements, heavy metals, hydrodynamics, Dnieper-Bug estuary.

**Acknowledgements:** the research is performed under state order on topic No. 0827-2019-0004 “Complex interdisciplinary research of oceanologic processes, which determine functioning and evolution of the Black and Azov Sea coastal ecosystems”. The authors are grateful to Elena E. Sovga, Dr.Sci. (Geogr.), for assistance with preparation of the paper and valuable comments in the course of its composition.

**For citation:** Kotelyanets, E.A. and Khmara, T.V., 2020. Content of Trace Elements and Heavy Metals in the Dnieper-Bug Bottom Sediments. *Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones of Sea*, (2), pp. 141–151. doi:10.22449/2413-5577-2020-1-140-151 (in Russian).

Днепро-Бугский лиман составляет основную часть более обширного физико-географического региона – устьевой области Днепра и Южного Буга – и является самым крупным открытым лиманом в северо-западной части Черного моря. Экосистема Днепро-Бугского лимана и прилегающей к нему части северо-западного шельфа Черного моря подвержена сильному влиянию последствий гидротехнического строительства в бассейне Днепра, промышленно-коммунальным загрязнениям двух крупных портово-промышленных центров – Херсона и Николаева, а также другим видам антропогенного воздействия. Судоходство между портами Николаев и Херсон и северо-западной частью Черного моря осуществляется по Бугско-Днепровско-лиманскому и Херсонскому морским каналам [1].

После зарегулирования р. Днепр в результате создания каскада водохранилищ, которые сами являются седиментационными ловушками, природный гидродинамический режим Днепра существенно изменился. Вследствие этого скорость течения реки уменьшилась, а большая часть осадочного материала не достигает устья и оседает в водохранилищах.

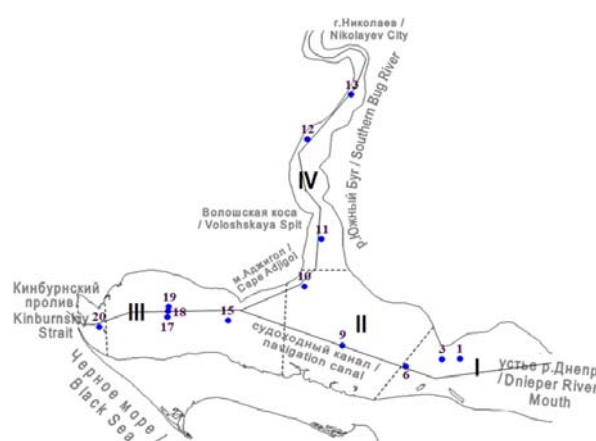
Как наиболее опасные и распространенные загрязняющие вещества в биосфере, тяжелые металлы могут служить своеобразным показателем уровня антропогенного влияния [2]. Исследование уровня загрязнения донных отложений акватории Днепро-Бугского лимана позволяет получить наиболее объективную оценку ее экологического состояния. Физико-химические характеристики донных отложений влияют на распределение и миграцию микроэлементов. В работе [3] показано, что формирование химического состава донных отложений Днепро-Бугского лимана определяется процессами взаимодействия пресных речных и соленых морских вод. Согласно данным из работы [3], опубликованной в 1990 г., тяжелыми металлами донные отложения лимана загрязнены незначительно.

В работах [4–7] рассмотрен минеральный состав осадков шельфовой зоны Днепро-Бугского лимана. Показано, что районами устойчивого загрязнения морских экосистем являются области схождения разнородных водных масс в акваториях бухт и эстуарий. Таким образом, одним из определяющих факторов формирования донных отложений в исследуемой акватории является транспортная роль рек Днепр и Южный Буг.

Цель работы – исследование содержания и особенностей распределения микроэлементов и тяжелых металлов в поверхностном слое донных отложений Днепро-Бугского лимана по данным съемки 2007 г. с учетом динамики вод лимана и сравнить уровень загрязнения донных отложений лимана с ранее изученными мелководными акваториями Севастопольского региона.

### Материалы и методы

Пробы донных отложений были отобраны во время гидролого-гидрохимических съемок, проведенных в Днепро-Бугском лимане в сентябре 2007 г. по оптимизированной сетке из 20 станций (рис. 1). Пробы отбирались пробоотборником Петерсона ДЧ-0.025 в верхнем слое осадков (0–5 см).



Р и с . 1. Схема станций отбора проб донных отложений в Днепро-Бугском лимане (сентябрь 2007 г.)

F i g . 1. Map of bottom sediment sampling stations in the Dnieper-Bug estuary (September 2007)

Определение содержания элементов As, Cr, Co, Cu, Ni, Pb, Zn, V, Sr (мг/кг) и оксидов металлов TiO<sub>2</sub>, MnO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (процентное содержание металла) в поверхностном слое донных отложений проводилось с помощью рентгенофлуорес-

центного метода анализа (РФА) на приборе СПЕКТРОСКАН МАКС-G<sup>1)</sup>.

По гидрологическому, гидрохимическому, гидробиологическому режимам лиман разделяют на четыре района (рис. 1) – восточный (I), центральный (II), западный (III) и бугский (IV) [8]. Именно такое районирование используется в работе для оценки донных отложений Днепро-Бугского лимана. Отдельно рассматривался Кинбурнский пролив. Таким образом, в районе I (устье Днепра) пробы были отобраны в зоне ст. 1, 3, 6, в районе II (центр лимана) – в зоне ст. 9, 10, в районе III (место смешения речных и морских вод) – в зоне ст. 15, 17–19, причем ст. 17 расположена в зоне судходного канала западного лимана, а ст. 20 – на выходе из лимана (Кинбурнский пролив), в районе IV (р. Южный Буг) пробы отбирались в зоне ст. 11–13.

### Результаты и обсуждение

Важным фактором, влияющим на сорбционную способность тяжелых металлов, является размер частиц осадка. Донные отложения исследуемой акватории были представлены темно-серыми, почти черными илами, иногда с характерным запахом сероводорода. Распределение гранулометрических фракций в поверхностном слое донных осадков лимана определяется морфометрическими и гидрологическими (уровненным, скоростным, ветро-волновым) факторами. В Днепро-Бугском лимане выделяются: северный приглубый подводный склон, южный подводный склон, восточная придельтовья часть, осевая глубоководная зона. Такие морфометрические особенности приводят к нестабильности внутриводоемных процессов, которые определяют сортировку частиц по гидравлической крупности.

Анализ гранулометрического состава осадков в лимане (рис. 2) показывает, что пробы донных отложений в основном представлены песчано-гравийной фракцией (54 %) и крупной пелитовой фракцией (28 %). Показано, что в пробах донных отложений Днепро-Бугского лимана преобладает крупнодисперсная фракция.

Антропогенные загрязнения накапливаются в основном в тонких фракциях осадка. По-видимому, повышенную концентрацию загрязняющих веществ следует ожидать в месте слияния Днепровского и Бугского рукавов лимана и ниже, где в донных осадках преобладают мелкодисперсные фракции, которые отличаются повышенной сорбционной способностью по отношению к микроэлементам и тяжелым металлам [1, 4]. Поступление загрязняющих веществ из донных отложений в водную среду может происходить при производстве гидротехни-

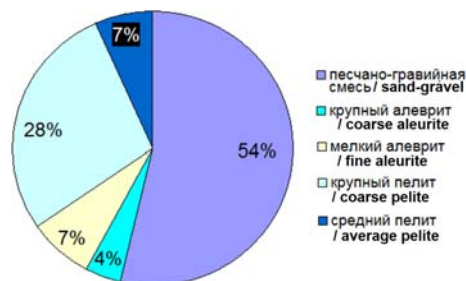


Рис. 2. Гранулометрический состав осадков в лимане

Fig. 2. Particle size distribution of the estuary sediments

<sup>1)</sup> Методика выполнения измерений массовой доли металлов и оксидов металлов в порошковых пробах почв методом рентгенофлуоресцентного анализа, регламентированная в документе М049-П/02. СПб. : ООО «Спектрон», 2002. 16 с.

ческих работ (сооружение подходных каналов, углубление дна, складирование изъятых грунтов в гидроотвалах) в мелководных акваториях.

Гидрохимическая зональность лимана определяется положением и характером барьерных зон река – море. В данной акватории барьерная зона отличается значительной шириной, что способствует переводу большей части поступающих с речным стоком и сточными водами микроэлементов в органоминеральную форму и приводит к их накоплению в иловых водах и донных отложениях. Через этот фильтр в западную часть лимана проходит лишь незначительная доля микроэлементов, в то время как основное их количество аккумулируется в донных отложениях Бугского лимана.

В донных отложениях Днепро-Бугского лимана концентрация ряда микроэлементов и тяжелых металлов была ниже предела обнаружения метода РФА. Это относится к Pb (< 25 мг/кг) и As (< 20 мг/кг). А такие элементы, как Fe (5.144 %), Ti (0.6 %), V (70 мг/кг), Sr (180 мг/кг), Co (19 мг/кг) присутствуют в отложениях по всему лиману (за исключением районов, примыкающих к устью Днепра). Содержание Mn, As и Pb было незначительным: 0.13 %, 10 мг/кг и 17 мг/кг соответственно.

В результате выполненных исследований были выделены группы микроэлементов, различающиеся характером пространственного распределения. К первой группе относятся: Cr (129 мг/кг), Co (32.4 мг/кг), Sr (290 мг/кг), Ni (72 мг/кг), Zn (148 мг/кг), V (83 мг/кг), Ti (0.6864 %). Максимальные концентрации данных микроэлементов и тяжелых металлов были определены в Бугском лимане. Вторая группа представлена тяжелыми металлами Cu, Fe, Mn, максимальные концентрации которых были определены в западной части лимана и составляли для меди 75 мг/кг, для железа – 8.101 %, а для марганца – 0.4307 %.

На рис. 3 представлено пространственное распределение хрома и меди. Пространственное распределение хрома характеризует особенности содержания исследуемых элементов первой группы, распределение меди – второй группы. Максимальное содержание Cr определено в акватории Бугского

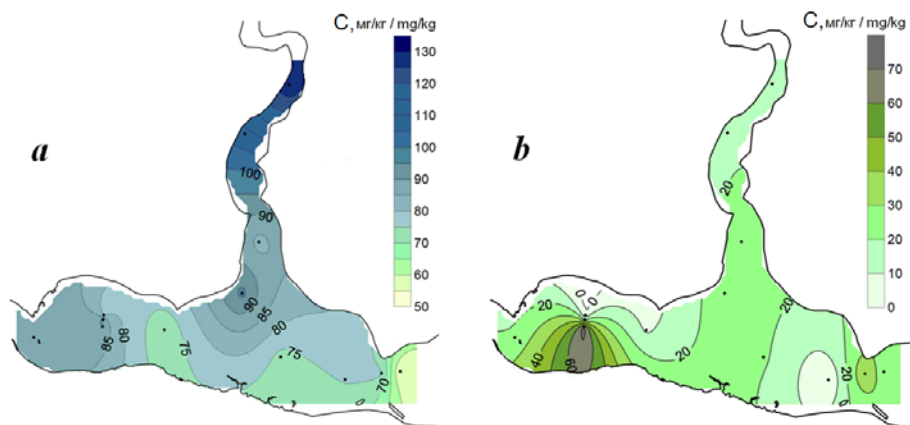


Рис. 3. Пространственное распределение хрома (а) и меди (б) в донных отложениях Днепро-Бугского лимана в 2007 г.

Fig. 3. Spatial distribution of chromium (a) and copper (b) in bottom sediments of the Dnieper-Bug estuary in 2007

лимана и на выходе из него, среднее содержание элемента составляет 86 мг/кг. Повышенное содержание Cu определено в районе акватории западного лимана, среднее содержание составляет 23 мг/кг.

На диаграммах (рис. 4) представлено содержание тяжелых металлов в поверхностном слое донных отложений Днепро-Бугского лимана. Как следует из данных, представленных на рис. 4, максимальные концентрации цинка и хрома отмечены на ст. 12 и 13, расположенных в р. Южный Буг, а максимальное содержание меди и хрома – на ст. 17, в районе судоходного канала. Максимальные концентрации железа и марганца наблюдались в зоне смешения морских и речных вод и выхода из лимана (ст. 18–20), где наблюдается лавинная седиментация свежесформированных взвесей с максимальным сорбционным эффектом по отношению к микроэлементам и тяжелым металлам.

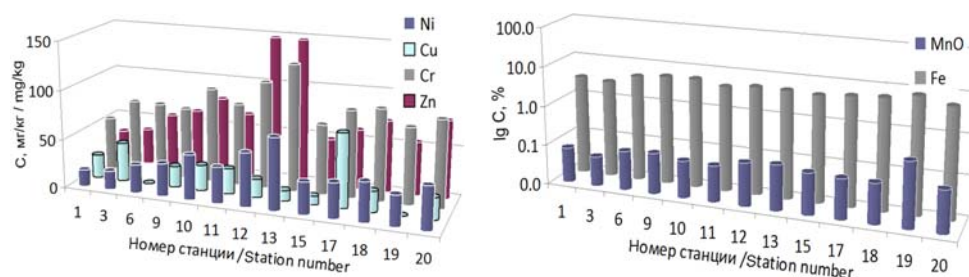
На станциях, расположенных в районе устья Днепра (ст. 1, 3, 6), наблюдается только незначительное повышение содержания хрома. В этом же районе определена максимальная концентрация меди (39.45 мг/кг), свинца (22.5 мг/кг), мышьяка (10 мг/кг).

Анализ пространственного распределения микроэлементов и тяжелых металлов позволил выделить зоны их повышенного накопления. Повышенные концентрации исследуемых тяжелых металлов в основном определялись в районах III и IV и привязаны к местам предполагаемого антропогенного загрязнения (активное судоходство).

Превышение содержания никеля, хрома, цинка (рис. 4) наблюдается в донных отложениях р. Южный Буг. Вероятно, это связано с тем, что городская агломерация г. Николаева создает различные антропогенные потоки загрязняющих веществ, которые поступают в реку, а затем и в лиман [12]. Аналогичное превышение по данным микроэлементам описывается в работе [1].

Следует отметить, что в донных отложениях лимана, особенно в его центральной части (ст. 15), наблюдается повышенное содержание стронция. Авторы связывают это с повышенным содержанием  $\text{CaCO}_3$ , на что указывают данные, полученные в работе [13].

В зоне смешения речной и морской воды отмечена повышенная концентрация Cu (75 мг/кг), Co (32.4 мг/кг), Fe (8.101 %). Особенно большое количество меди – на ст. 17, в районе западного лимана, что связано с поступлением соленых лиманных вод по дну судоходного канала. В то же



Р и с . 4. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях Днепро-Бугского лимана в 2007 г.

Fig . 4. Heavy metal concentrations in bottom sediments of the Dnieper-Bug estuary in 2007

время в районе ст. 19, расположенной на мелководье, содержание этого элемента ниже предела обнаружения метода РФА. В районе Кинбурнского пролива (ст. 20) содержание Си составляет 22 мг/кг. Это можно объяснить антропогенными факторами, а именно: деятельностью портов Очакова, Николаева, Херсона, якорных стоянок судов, близостью зоны дампинга, а также ведением в этом районе дноуглубительных работ и поступлением сбросных вод с мелиоративных участков.

Оценка уровня содержания тяжелых металлов в Днепро-Бугском лимане проводилась путем сравнения с уровнем содержания этих металлов в поверхностном слое осадков ранее изученных мелководных акваторий.

В таблице сравниваются значения концентрации исследуемых тяжелых металлов в акваториях лимана и Севастопольской и Балаклавской бухт. Из данных, представленных в таблице, следует, что загрязнение донных отложений Днепро-Бугского лимана тяжелыми металлами формируется прежде всего такими элементами, как хром, цинк, никель. Максимальное содержание хрома и никеля в донных отложениях лимана превышает содержание данных элементов в Балаклавской бухте, а также их среднее содержание в осадках шельфа Черного моря [9], а максимальное содержание Zn в лимане гораздо ниже, чем в акватории Севастопольской [10] и Балаклавской бухт [13], но выше, чем в осадках шельфа [9].

Для установления причин формирования зон аккумуляции микроэлементов и тяжелых металлов в донных отложениях акватории лимана важно учитывать динамику водных масс, которая в Днепро-Бугском лимане отличается исключительной сложностью. Здесь наблюдаются почти все известные и характерные для континентальных водоемов виды движения вод, включая такие типы течений, как градиентные, компенсационные, стоковые, ветровые. Среди наиболее важных факторов, обеспечивающих подвижность водных масс лимана, можно отметить приток речных вод, сгонно-нагонные деnivelляции уровня воды в прилегающей части Черного моря, режим ветра, сейши, возникающие чаще всего в результате неравномерных попусков воды Каховской ГЭС, и т. д.

Градиентные течения, обусловленные разностью плотности воды в лимане и северо-западной части Черного моря, наблюдаются во все сезоны и захватывают только придонные слои воды, распространяясь в лиман в основном

Среднее содержание микроэлементов в мелководных отложениях

Mean concentration of trace elements in shallow water sediments

Элемент / Element	Днепро- Бугский лиман / Dnieper- Bug estuary	Севастополь- ская бухта / Sevastopol Bay	Балаклавская бухта / Balaklava Bay	Шельф Черного моря / Black Sea shelf
Cr, мг/кг / mg/kg	54–129	47–121	26–87	45–90
Zn, мг/кг / mg/kg	33–148	47–579	97–283	48
Ni, мг/кг / mg/kg	17–72	21–63	18–50	42
Ti, %	0.458–0.762	0.528–0.762	0.26–0.6	–



по судоходному каналу. В многоводные годы они не проникают далее Кинбурнского пролива, в средние по водности годы достигают траверза м. Аджиголь (Днепровский лиман) и косы Волошской (Бугский лиман), а в маловодные годы прослеживаются до Николаева и устья Днепра. Скорость градиентных течений изменяется от 5 до 15 см/с, уменьшаясь по мере проникновения их в лиман.

Компенсационные течения обусловлены изменениями уровня. При нагонных ветрах они проявляются слабо и по направлению совпадают со стоковыми течениями. При сгонных ветрах разница в уровнях достигает 1 м, что приводит к возникновению устойчивых компенсационных течений, которые проникают далеко вглубь лимана, а иногда и в устья Днепра и Южного Буга, осолоняя воды этих рек. Компенсационные течения при сгонах повторяются в 2.5 раза чаще, чем такие же течения при нагонах. Скорости компенсационных течений не превышают 5–10 см/с.

Стоковые течения являются постоянно действующим видом течений и обусловлены поступлением речных вод. В период половодья суммарное течение в лимане до глубины 3.0–5.0 м захватывает всю ширину и направлено в сторону моря с завихрениями в Бугский лиман. На глубинах 7.0 м и более течения по судоходному каналу и приглубым местам лимана имеют обратное направление.

В меженный период особенно заметны ветровые течения, которые, однако, на картине придонных течений влияют слабо. На глубине 4.5–5.0 м влияние сгонных и нагонных ветров почти не обнаруживается, вдоль судоходного канала появляются градиентные и компенсационные течения, направленные в лиман. На глубине 6.0–10.0 м струи компенсационных и градиентных течений продвигаются по судоходным каналам, их скорости в Бугском лимане достигают 20–30 см/с. Течения прослеживаются до Волошской косы, где наблюдается повышенная соленость глубинных вод.

Схема придонных течений Днепро-Бугского лимана для условий маловодного периода (см. рис. 5) была рассчитана по модели *MECCA (Model for Estuarine and Coastal Circulation Assessment)* [14]. Показано, что в придонном слое поступающий из Черного моря поток воды со скоростью 15–20 см/с проникает по судоходному каналу в центральную часть лимана до нижней границы устьевого участка р. Южный Буг. В обратном направлении течения локализуются в глубоководной части судоходного канала и южной мелководной части Днепровского лимана со скоростью 10–25 см/с и достигают наибольших значений в Кинбурнском проливе (20–25 см/с). Похожая картина придонных течений описана в работе [15], где показано, что скорость течения в придонном слое лимана на 0.01–0.15 м/с меньше, чем на поверхности.

В Бугском лимане, где, по полученным данным, наблюдается наибольшая концентрация тяжелых металлов, придонные течения не имеют однонаправленного потока. Вдоль судоходного канала перепад плотности индуцирует придонное противотечение, что приводит к образованию клина соленой воды из северо-западной части Черного моря.

Динамика вод в Днепро-Бугском лимане оказывает основное влияние на взмучивание и переосаждение поверхностных донных осадков. Она характеризуется течениями, направление которых меняется вплоть до противоположных в зависимости от преобладающего направления и скорости ветра.



Все это отражается на общей структуре пространственного распределения тяжелых металлов в донных отложениях. Так, большинству из них свойственно распределение вдоль лимана с экстремальными концентрациями либо вдоль судоходного канала, либо на мелководье. Распределение тяжелых металлов в устье р. Южный Буг определяется близостью источников загрязнения в районах дампинга и переносом донных отложений под влиянием преобладающих течений либо интенсивных сгонно-нагонных процессов во время штормов.

#### Заключение

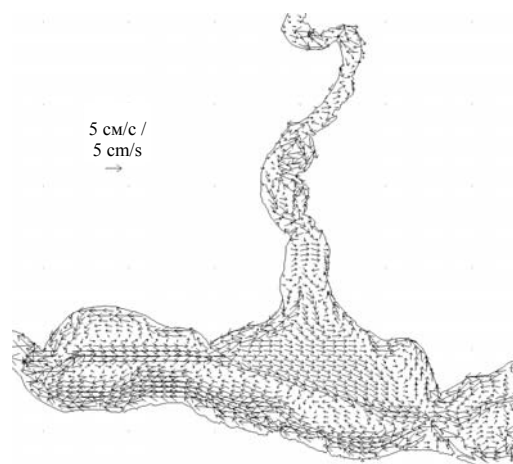
Выполненные исследования позволили определить содержание микроэлементов As, Ti и тяжелых металлов Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cr, V, Sr, Fe, Mn, а также выявить особенности их распределения в донных отложениях Днепро-Бугского лимана.

В донных отложениях Днепро-Бугского лимана концентрация ряда микроэлементов и тяжелых металлов была ниже предела обнаружения метода РФА. Это относится к свинцу ( $< 25$  мг/кг) и мышьяку ( $< 20$  мг/кг). А такие элементы, как железо, ванадий, стронций, кобальт присутствуют в отложениях по всему лиману (за исключением районов, примыкающих к устью Днепра). Концентрация титана, марганца, мышьяка, свинца была незначительной.

По особенностям пространственного распределения выделены две группы микроэлементов. В первую группу входят Cr, Co, Sr, Zn, V, Ti, их максимальные концентрации были определены в акватории Бугского лимана. Ко второй группе относится Cu, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, максимальные концентрации которых были определены в западной части лимана. Показано, что пространственное распределение Cr, Co, Sr, Zn, V, Ti указывает на источники берегового поступления загрязнения, а также на влияние динамики вод.

Рассмотрены особенности морфометрических характеристик донных отложений лимана. Установлено, что пробы донных отложений были представлены в основном песчано-гравийной фракцией (54 %) и крупной пелитовой фракцией (28 %).

Максимальное содержание хрома и никеля в донных отложениях лимана выше, чем в Балаклавской бухте и примерно соответствует их среднему содержанию в осадках шельфа Черного моря. Максимальная концентрация цинка в донных отложениях Днепро-Бугского лимана ниже, чем в осадках Севастопольской бухты. Среднее содержание остальных исследованных элементов в донных отложениях лимана не превышает геохимического фона. В то же время железо, ванадий, стронций, кобальт (за исключением



Р и с . 5. Схема придонных течений при восточном ветре 10 м/с

Fig. 5. Bottom current pattern at eastern wind 10 m/s

районов, примыкающих к устью Днепра) присутствуют в отложениях по всему лиману. Локальные зоны повышенных концентраций цинка, никеля и хрома в районе р. Южный Буг говорят о наличии постоянно действующих источников загрязнения, связанных с судоходством и промышленно-коммунальным загрязнением.

По результатам расчета придонных течений, наиболее динамичными районами являются западная часть лимана и район судоходного канала, однако вследствие активного судоходства здесь происходит накопление микроэлементов и тяжелых металлов в донных отложениях. Также в районе судоходного канала происходит смыв осадочного материала с мелководья, а при низких значениях расхода пресных вод наносы могут поступать из северо-западной части Черного моря.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Условия формирования донных осадков устьевых участков рек Днепровско-Бугского лимана в условиях антропогенной нагрузки / И. Н. Малахов [и др.] // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 2. С. 69–78.
2. Геоэкология Черноморского шельфа Украины / В. А. Емельянов [и др.]. Киев : Академперіодика, 2004. 296 с.
3. Химический состав и некоторые свойства донных отложений устьевой части Днепровско-Бугского лимана / В. Н. Савицкий [и др.] // Водные ресурсы. 1990. № 2. С. 121–129.
4. Геология шельфа УССР. Твердые полезные ископаемые / под ред. Е. Ф. Шнюкова. Киев : Наукова думка, 1983. 200 с.
5. Геология Черного и Азовского морей / Под ред. Е. Ф. Шнюкова. Киев : Наукова думка, 2000. 338 с.
6. *Митропольський О. Ю., Наседкін Є. І., Осокіна Н. П.* Екогеохімія Чорного моря. Киев : Наукова думка, 2006. 277 с.
7. *Шнюков Е. Ф., Иноземцев Ю. И., Усенко В. П.* Распределение тяжелых минералов в осадках Днепро-Бугского лимана // Осадочные породы и руды. Киев : Наукова думка, 1980. С. 32–41.
8. *Совга О. Є., Мезенцева І. В., Любарцева С. П.* Оцінка асиміляційної місткості екосистеми Дніпровського лиману щодо нафтопродуктів як метод нормування їх скиду в акваторію лиману // Доповіді Національної академії наук України. 2011. № 10. С. 105–109.
9. *Митропольский А. Ю., Безбородов А. А., Овсяный Е. И.* Геохимия Черного моря. Киев : Наукова думка, 1982. 144 с.
10. Accumulations of trace metals in bottom sediments of the Sevastopol bay (Black Sea) / K. Gurov [et al.] // 19<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019: Conference proceedings. SGEM, 2019. Vol. 19, book 3(1). P. 649–656. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.1/S15.083>
11. Factors of formation and features of physical and chemical characteristics of bottom sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea) / K. I. Gurov [et al.] // Physical Oceanography. 2015. № 4. P. 46–52. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2015-4-46-52>
12. Смирнов В. Н. Закономерности аккумуляции тяжелых металлов высшей водной растительности Бугского лимана // Наукові праці. Екологія. 2012. Т. 179, № 167. С. 81–83.

13. Моисеенко О. Г., Орехова Н. А. Цикл углерода экосистемы Днепровско-Бугского лимана в 2007 году // Морской гидрофизический журнал. 2014. № 1. С. 13–27.
14. Иванов В. А., Тучковенко Ю. С. Прикладное математическое моделирование качества вод шельфовых морских систем. Севастополь : ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. 368 с.
15. Миньковская Р. Я. Преобладающие течения в устьевых областях рек Дунай, Бельбек, Черная, Днепр и Южный Буг // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. 2007. № 15. С. 194–203.

*Об авторах:*

**Котельянец Екатерина Александровна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **WoS ResearcherID: AAA-8699-2019**, *plistus@mail.ru*

**Хмара Татьяна Викторовна**, младший научный сотрудник, Морской гидрофизический институт РАН (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, 2), **Scopus Author ID: 6506060413**, **ResearcherID: C-2358-2016**, *xmara@mhi-ras.ru*

*Заявленный вклад авторов:*

**Котельянец Екатерина Александровна** – формулирование целей и задач исследования; обработка и описание результатов исследования; интерпретация результатов; подготовка графических и текстовых материалов; редактирование рукописи

**Хмара Татьяна Викторовна** – подготовка графических материалов; обсуждение результатов исследования, анализ литературных данных, представление данных в тексте и их анализ, редактирование рукописи

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

#### REFERENCES

1. Malakhov, I.N., Alekhina, T.N., Ivanchenko, V.V., Bobko, A.A. and Zhuravel, N.R., 2010. [Conditions of Formation of Bottom Sediments in Mouth Reaches of Rivers of the Dnieper-Bug Estuary under Anthropogenic Load]. *Geology and Mineral Resources of World Ocean*, (2), pp. 69–78 (in Russian).
2. Emelyanov, V.A., Mitropolskiy, A.Yu., Nasedkin, E.I., Pasynkov, A.A., Stepanyak, Yu.D. and Shnyukova, E.E., 2004. [*Geoecology of the Ukrainian Black Sea Shelf*]. Kyiv: Akademperiodika, 293 p. (in Russian).
3. Savitskiy, V.N., Osadchiy, V.I., Romas, N.I. and Chebotko, K.A., 1990. [Chemical Composition and some Properties of Bottom Sediments of the Mouth Reach of the Dnieper-Bug Estuary]. *Vodnye Resursy*, (2), pp. 121–129 (in Russian).
4. Shnyukov, E.F., Inozemtsev, Yu.I., Lyalko, V.I., Dublyanskiy, V.N., Sidenko, O.G., Mitin, L.I., Kirichenko, O.N., Naumenko, P.I., Podoplelov, O.N. [et al.], 1983. [*Geology of Shelf of the Ukrainian SSR. Solid Mineral Resources*]. Kiev: Naukova Dumka, 200 p. (in Russian).
5. Shnyukov, E.F., ed., 2000. [*Geology of the Black and Azov Sea*]. Kiev: Naukova Dumka, 338 p. (in Russian).
6. Mitropolskiy, O.Yu., Nasedkin, E.I. and Oskina, N.P., 2006. [*Ecogeochemistry of the Black Sea*]. Kiev: Naukova Dumka, 279 p. (in Ukrainian).
7. Shnyukov, E.F., Inozemtsev, Yu.I. and Usenko, V.P., 1980. [Distribution of Heavy

- Minerals in Sediments of the Dnieper-Bug Estuary]. In: Tkachuk, L.G., ed., 1980. [*Sediment Rocks and Ores*]. Kiev: Naukova Dumka, pp. 32–41 (in Russian).
8. Sovga, O.E., Mezentseva, I.V. and Liubartseva, S.P., 2011. Estimation of the Assimilation Capacity of the Dnieper Estuary Ecosystem against Oil Pollution as a Regulatory Method for its Discharge into the Estuary Water. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, (10), pp. 105–109 (in Ukrainian).
  9. Mitropolskiy, A.Yu., Bezborodov, A.A. and Ovsyany, E.I., 1982. [*Geochemistry of the Black Sea*]. Kiev: Naukova Dumka, 144 p. (in Russian).
  10. Gurov, K., Kotelyanets, E., Tikhonova, E. and Kondratev, S., 2019. Accumulations of Trace Metals in Bottom Sediments of the Sevastopol Bay (Black Sea). In: SGEM, 2019. *19<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2019. Conference proceedings*. Vol. 19, book 3(1), pp. 649–656. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/3.1/S15.083>
  11. Gurov, K.I., Ovsyany, E.I., Kotelyanets, E.A. and Kononov, S.K., 2015. Factors of Formation and Features of Physical and Chemical Characteristics of Bottom Sediments in the Balaklava Bay (the Black Sea). *Physical Oceanography*, (4), pp. 46–52. <https://doi.org/10.22449/1573-160X-2015-4-46-52>
  12. Smirnov, V.N., 2012. [Patterns of Heavy Metals Accumulation in Higher Aquatic Plants of the Bug Estuary]. *Naukovi Pratsi. Ekologiya*, 179(167), pp. 81–83 (in Russian).
  13. Moiseenko, O.G. and Orekhova, N.A., 2014. Carbon Cycle in the Dnieper-Bug Estuary Ecosystem in 2007. *Morskoy Gidrofizicheskij Zhurnal*, (1), pp. 13–27 (in Russian).
  14. Ivanov, V.A. and Tuchkovenko, Y.S., 2006. *Applied Mathematical Water Quality Modelling of Shelf Marine Ecosystems*. Sevastopol: MHI (Marine Hydrophysical Institute) NAS Ukraine. 368 p. (in Russian).
  15. Min'kovskaya, R.Ya., 2007. Dominating Currents in Mouth of Danube, Bel'bek, Chernaya, Dnepr and Yugny Bug Rivers. In: MHI, 2007. *Ekologicheskaya Bezopasnost' Pribrezhnykh i Shel'fovykh Zon i Kompleksnoe Ispol'zovanie Resursov Shel'fa* [Ecological Safety of Coastal and Shelf Zones and Comprehensive Use of Shelf Resources]. Sevastopol: ECOSI-Gidrofizika. Iss. 15, pp. 194–203 (in Russian).

*About the authors:*

**Ekaterina A. Kotelyanets**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **WoS ResearcherID: AAA-8699-2019**, [plistus@mail.ru](mailto:plistus@mail.ru)

**Tat'yana V. Khmara**, Junior Research Associate, Marine Hydrophysical Institute of RAS (2 Kapitanskaya St., Sevastopol, 299011, Russian Federation), **Scopus Author ID: 6506060413**, **ResearcherID: C-2358-2016**, [xmara@mhi-ras.ru](mailto:xmara@mhi-ras.ru)

*Contribution of the authors:*

**Ekaterina A. Kotelyanets** – statement of the research objectives and tasks, processing and description of the study results, results interpretation, preparation of graphics and text, manuscript editing

**Tat'yana V. Khmara** – preparation of graphics, study results discussion, literature data analysis, presentation of the data in the text and their analysis, manuscript editing

*The authors have read and approved the final manuscript.*