

<https://doi.org/10.47612/2079-3928-2025-1-73-84>
УДК 628.381.1

Поступила в редакцию 31.03.2025
Received 31.03.2025

ЗАГРЯЗНЯЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ ОСАДКОВ ГОРОДСКИХ СТОЧНЫХ ВОД (НА ПРИМЕРЕ БРЕСТСКОЙ ОБЛАСТИ)

Е. Н. Басалай, В. С. Хомич

Институт природопользования НАН Беларуси, Минск, Беларусь

Аннотация. По результатам исследований содержания тяжелых металлов (ТМ) в осадках городских сточных вод (ОГСВ) очистных сооружений девяти городов Брестской области оценен их загрязняющий потенциал для местных почв с использованием коэффициента концентрации (K_c – по отношению к местному фону) и коэффициента опасности (K_o – по отношению к гигиеническим нормативам).

Показана высокая степень обогащения ОГСВ по сравнению с региональным фоном цинком – в 36,0–717,1 раза, медью – в 32,1–567,6, никелем – в 4,8–138,6, хромом – в 2,0–147,6, что свидетельствует о высоком загрязняющем потенциале ОГСВ исследованных городов. Представлены ранжированные ряды средних коэффициентов концентрации ТМ в ОГСВ по отношению к субрегиональному фону и коэффициентов опасности ТМ в составе ОГСВ для девяти рассматриваемых городов. Показано, что в малых городах загрязняющий потенциал ОГСВ в наибольшей степени обеспечивается за счет цинка (49–56 %) и в меньшей степени – за счет меди (26–38 %). В средних городах вклад цинка в загрязняющий потенциал ОГСВ снижается и возрастает доля меди. В Бресте, относящемся к крупным городам, загрязняющий потенциал ОГСВ связан главным образом с цинком (42 %) и медью (32 %), в меньшей степени – с никелем (12 %) и хромом (8 %).

Ключевые слова: осадки городских сточных вод; тяжелые металлы; коэффициент концентрации; коэффициент опасности; реализация загрязняющего потенциала.

Для цитирования. Басалай Е. Н., Хомич В. С. Загрязняющий потенциал осадков городских сточных вод (на примере Брестской области) // Природопользование. – 2025. – № 1. – С. 73–84.

POLLUTING POTENTIAL OF URBAN WASTEWATER SLUDGE (ON THE EXAMPLE OF BREST REGION)

E. N. Basalai, V. S. Khomich

Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Abstract. Based on the research results of heavy metals (HM) content in urban wastewater sludge (UWWS) of treatment facilities in nine cities of the Brest region, their polluting potential for local soils was assessed using the concentration coefficient (K_c in relation to the local background) and the hazard coefficient (K_o in relation to hygienic standards).

Compared to the regional background, a high degree of enrichment in zinc is shown – 36.0–717.1 times, copper – 32.1–567.6, nickel – 4.8–138.6, chromium – 2.0–147.6, which indicates high polluting potential of the studied cities. The ranked series of the average concentration coefficients of HM in the UWWS in relation to the sub-regional background and the hazard coefficients of HM in the UWWS for 9 cities under consideration are presented. It has been shown that in small towns, the polluting potential of UWWS is provided to the greatest extent of zinc (49–56 %) and to a lesser extent by copper (26–38 %). In medium-sized cities, the contribution of zinc to the polluting potential of the UWWS is decreasing and the proportion of copper is increasing. In Brest, which is one of the major cities, the polluting potential of UWWS is mainly associated with zinc (42 %) and copper (32 %), to a lesser extent with nickel (12 %) and chromium (8 %).

Keywords: urban wastewater sludge; heavy metals; concentration coefficient; hazard coefficient; realization of the polluting potential.

For citation. Basalai E. N., Khomich V. S. Polluting potential of urban wastewater sludge (on the example of Brest region). *Nature Management*, 2024, no. 1, pp. 73–84.

Введение. Очистные сооружения являются важнейшим компонентом городов, осуществляющим аккумуляцию и очистку сточных вод, которые поступают от населения и промышленных предприятий. Побочным продуктом очистки сточных вод являются осадки городских сточных вод (ОГСВ), которые представлены твердой фракцией, состоящей из минеральных и органических веществ, выделенных из сточных вод в процессе их очистки методом отстаивания (сырой осадок), и комплекса микроорганизмов, участвовавших в процессе биологической очистки сточных вод и выведенных из технологического процесса (избыточный активный ил). ОГСВ специфичны по составу, условиям образования и обработки, что напрямую зависит от специализации городов и наличия в них промышленных предприятий, качества поступающих на очистку сточных вод, способов обработки сточных вод и ОГСВ, и отражает особенности функционирования конкретного населенного пункта [1, 2].

Преобладающая часть ОГСВ в Беларуси, в том числе в Брестской области (за исключением Бреста, Барановичей и Столина), размещается на иловых площадках для обезвоживания и подсушивания. При отсутствии альтернативы иловые площадки становятся объектами длительного хранения данного вида отходов. Накапливаясь в больших объемах на открытых иловых картах на территории очистных сооружений, ОГСВ формируют крупные ореолы загрязнения прилегающих территорий: они служат стабильными источниками органических, минеральных и биологических загрязнений природных компонентов [2, 3]. Наиболее значимыми являются химические и биологические факторы, определяющие специфику и общий уровень антропогенного воздействия [2]. В составе ОГСВ содержится большое количество органического вещества и воды, поэтому они быстро загнивают, что сопровождается образованием и эмиссией сероводорода, углекислого газа и метана и оказывает негативное воздействие на атмосферный воздух. При непринятии мер по использованию ОГСВ иловые площадки превращаются в объекты накопленного экологического вреда [4]. Выбор эффективного способа подготовки (обработки) ОГСВ позволяет существенно снизить степень опасности данных отходов и расширить возможности для их дальнейшего использования [5].

Цель работы – оценить загрязняющий потенциал ОГСВ для почв в отношении тяжелых металлов (ТМ) и степень его реализации в зонах воздействия городских очистных сооружений в Брестской области.

Методика и объекты исследований. В качестве объектов исследований выбрали очистные сооружения девяти городов Брестской области разной величины: крупного города (Брест), четырех средних (Берёза, Лунинец, Ивацевичи, Кобрин) и четырех малых (Пружаны, Малорита, Каменец, Ганцевичи).

Отбор проб ОГСВ проводили в соответствии с РД РБ 0212.6-2002 [6], ГОСТ Р 56226-2014 [7] и СТБ СЕН/TR 15310-1-2018 [8]. Пробы, отобранные для химического анализа, упаковывали и транспортировали в герметичных емкостях из химически нейтрального материала.

Содержание в ОГСВ валовых форм ТМ (цинка, меди, кадмия, кобальта, никеля, свинца, хрома и марганца) определяли на атомно-абсорбционном спектрометре Solaar MkII M6 Double AAS в соответствии с СТБ ИСО 11047-2006 [9] и атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой iCAP 7200 Thermo Scientific в соответствии с ГОСТ 30538-97 [10]. Необходимо отметить, что цинк, медь, марганец и кобальт являются важными для жизни растений почвенными микроэлементами [11], однако токсичны при превышении их пороговых концентраций, при которых они становятся вредными для растительности.

Загрязняющий потенциал ОГСВ оценивали по содержанию ТМ в их составе с учетом субрегиональных особенностей территории с использованием коэффициента концентрации элемента (K_c) по [11] и гигиенических нормативов ПДК (для валовых форм свинца и марганца) / ОДК (для валовых форм хрома и кобальта; для валовых форм цинка, никеля, кадмия и меди в песчаных и супесчаных почвах) с применением коэффициента опасности элемента (K_o) по [12]. Коэффициент концентрации элемента (K_c), характеризующий загрязняющий потенциал ОГСВ, определяли как отношение реального валового его содержания в ОГСВ ($S_{огсв}$) к среднему содержанию элемента в почвах пахотных земель Брестской области ($S_{ср.}$). Коэффициент опасности элемента, содержащегося в ОГСВ (K_o), определяли как отношение реального валового его содержания в ОГСВ ($S_{огсв}$) к величине действующего гигиенического норматива ПДК/ОДК для валовых форм элемента в почве ($S_{пдк}$).

Для сравнительных оценок загрязняющего потенциала ОГСВ предложена его градация с выделением следующих ступеней: <10 – незначительный загрязняющий потенциал, 10–50 – низкий, 50–100 – средний, 100–200 – высокий, >200 – очень высокий загрязняющий потенциал.

Степень реализации загрязняющего потенциала отдельных ТМ в составе ОГСВ для почв в зонах воздействия очистных сооружений

$$P_{\text{реал.}} = \frac{K_C \cdot 100}{P_3},$$

где $P_{\text{реал.}}$ – реализованный потенциал загрязнения, %; K_C – коэффициент концентрации элемента в почве в зоне воздействия рассматриваемого очистного сооружения относительно фона; P_3 – загрязняющий потенциал элемента в составе ОГСВ.

Результаты и их обсуждение. В Республике Беларусь ОГСВ не являются объектами аналитического контроля, не выделяются в качестве отдельного объекта нормативно-правового регулирования и относятся к отходам [1].

В этой связи обращение с ОГСВ регламентируется правовыми актами, устанавливающими порядок обращения с отходами, например, Законом Республики Беларусь «Об обращении с отходами» [13], и рядом общих для всех отходов нормативных правовых актов и технических нормативных правовых актов, например, постановлением Совета Министров Республики Беларусь «О порядке обращения с отходами» [14].

Учет ОГСВ в Беларуси ведется с использованием общегосударственного классификатора [15], который устанавливает коды, наименования и классы опасности отходов (табл. 1).

Таблица 1. Классификация осадков городских сточных вод согласно действующему на начало 2025 г. общегосударственному классификатору отходов в Республике Беларусь* [15]

Table 1. Classification of urban wastewater sludge according to the national waste classifier in the Republic of Belarus effective at the beginning of 2025* [15]

Код отхода	Наименование	Класс опасности
8430100	Отбросы с решеток	3
8430200	Осадки сооружений биологической очистки хозяйственно-фекальных сточных вод	3
8430300	Ил активный очистных сооружений	4
8430400	Осадок сухой (подвергнутый термической или иной сушке)	3
8430500	Песок из песколовок (минеральный осадок)	4
8430600	Осадки сетей хозяйственно-фекальной канализации	4
8430700	Осадки очистки химзагрязненных сточных вод на очистных сооружениях	–
8430800	Осадки биологических прудов очистных сооружений	–
8439900	Прочие осадки очистки сточных вод на очистных сооружениях, не вошедшие в группу 3	–

*В течение 2025 г. планируется утверждение данного классификатора в новой редакции.

Хранение и захоронение ОГСВ регулируется Законом Республики Беларусь «Об обращении с отходами» [13], статья 26 которого свидетельствует о наличии двух видов хранения отходов: временного хранения (в Брестской области именно иловые площадки становятся объектами длительного временного хранения ОГСВ) и хранения отходов на санкционированных местах хранения с обязательной их регистрацией в соответствии с [14]. Захоронение ОГСВ в соответствии с [13] осуществляется на полигонах твердых коммунальных отходов.

Ведение реестра объектов хранения и захоронения отходов, а также регистрацию объектов хранения отходов осуществляет РУП «Бел НИЦ «Экология». В реестре объектов хранения и захоронения отходов Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь по состоянию на февраль 2025 г. [16] зарегистрировано 92 объекта хранения ОГСВ и 142 объекта хранения осадков сточных вод в целом, на которых по состоянию на начало 2024 г. накоплено 14,8 млн т данного вида отходов (рис. 1).

В течение 2023 г. в Республике Беларусь образовалось 2118,47 тыс. т осадков сточных вод [17] (238,34 кг/год на 1 человека) при 496,38 тыс. т в 1991 г. (48,72 кг/год на 1 человека) [18]. В течение тридцатилетнего периода количество ежегодно образующихся осадков сточных вод на очистных сооружениях в Беларуси увеличилось более чем в 4 раза, а количество образовавшегося осадка в пересчете на 1 человека с учетом численности населения увеличилось почти в 5 раз.

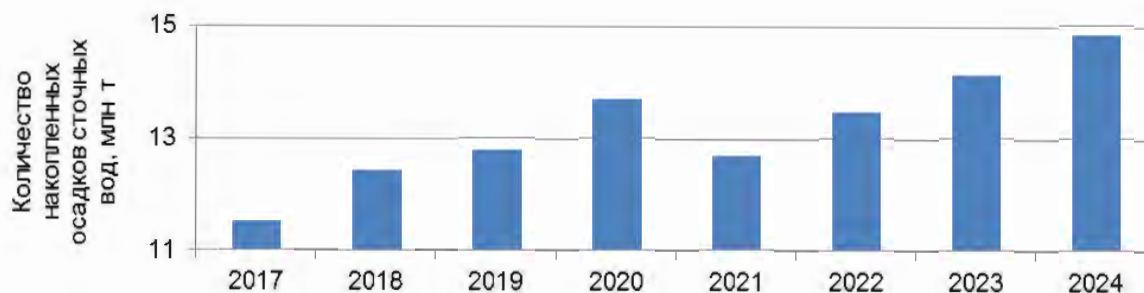


Рис. 1. Количество накопленных осадков сточных вод в Беларуси в период 2017–2024 гг. (на начало года), млн т [17]

Fig. 1. The amount of accumulated sewage sludge in Belarus in the period 2017–2024 (at the beginning of the year), million tons [17]

В качестве объектов хранения ОГСВ в реестре представлены [16]: иловые площадки, иловые пруды, иловые карты, шламоотвалы для сбора и хранения осадков, шламоотвалы осадков, площадки-накопители для обезвоженного осадка, площадки для хранения активного ила, илонакопители, песковые площадки, отстойники осадка биологических прудов, площадки для хранения осадка, поля фильтрации и очистные сооружения, на территории которых хранятся осадки, карты полей фильтрации, полигоны для хранения осадков сточных вод, иловые земляные отстойники, сборники осадка очистных сооружений, накопители временного хранения осадков, шламовые площадки и др.

В целом в Беларуси по состоянию на февраль 2025 г. объекты хранения ОГСВ (от всех объектов хранения осадков сточных вод) составляют от 25,0 % (Гомельская область – 3 зарегистрированных объекта хранения ОГСВ в соответствии с реестром) до 80,0 % (Могилёвская область – 8 зарегистрированных объектов хранения ОГСВ). В Брестской области количество объектов хранения ОГСВ в 2025 г. по сравнению с 2021 г. значительно снизилось [16]: осадков сточных вод – в целом на 89,5 % и ОГСВ – на 93,1 % (рис. 2).

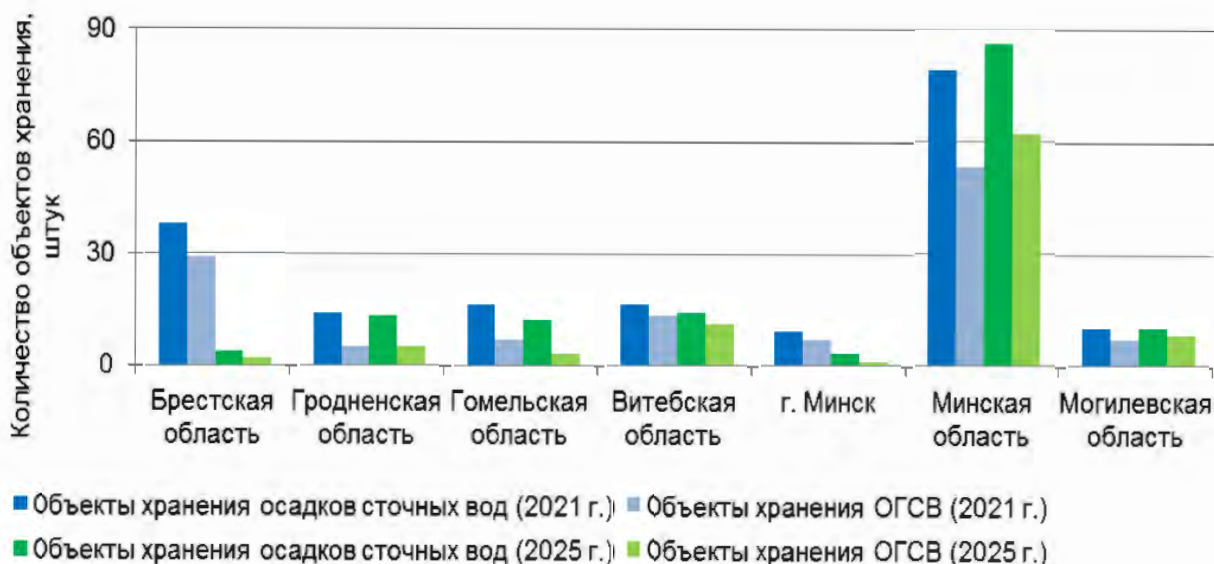


Рис. 2. Количество объектов хранения осадков сточных вод, в том числе осадков городских сточных вод, на территории административных областей и г. Минска по состоянию на 2021 и 2025 г. (составлено по данным [16])

Fig. 2. The number of wastewater sludge storage facilities, including urban wastewater sludge, in the administrative regions and the city of Minsk as of 2021 and 2025 (compiled according to [16])

Отсутствие в большинстве случаев сооружений для защиты подземных вод (противофильтрационных экранов, водонепроницаемого основания и т. п.) обуславливает вероятность негативного влияния объектов хранения ОГСВ на окружающую среду.

Результаты авторского исследования содержания ТМ в ОГСВ девяти городов Брестской области [2] свидетельствуют о том, что оно колеблется в широких пределах и составляет для цинка 455,7–9070,8 мг/кг, марганца – 93,8–605,8, меди – 80,9–1430,4, хрома – 11,2–819,3, свинца – 15,5–57,9, никеля – 8,6–249,4, кобальта – ниже предела обнаружения – 7,3 и кадмия – 0,6–1,8 мг/кг.

Рассчитанные коэффициенты концентрации (K_c) по отношению к субрегиональному фону для пахотных почв по [11] свидетельствуют о том, что средние концентрации цинка в ОГСВ рассматриваемых девяти городов выше фоновое значения в 36,0–717,1 раза, меди – в 32,1–567,6, никеля – в 4,8–138,6, хрома – в 2,0–147,6, кадмия – в 3,3–10,1, свинца – в 2,6–9,7 раза. Максимальные коэффициенты концентрации кобальта и марганца не превышают 6,6 (Берёза) и 5,3 (Ганцевичи) соответственно, в других городах они близки или ниже 1.

Ранжированные ряды средних коэффициентов концентрации ТМ (K_c) по отношению к субрегиональному фону для девяти рассматриваемых городов представлены в табл. 2.

Таблица 2. Ранжированные ряды тяжелых металлов по загрязняющему потенциалу в составе осадков городских сточных вод городов Брестской области

Table 2. Ranked ranks of heavy metals by polluting potential in the sediment of urban wastewater sludge from cities of the Brest region

Город		ТМ и их загрязняющий потенциал	Суммарный загрязняющий потенциал*
по величине	ОГСВ		
Крупный	Брест	Zn (70,4) > Cu (52,1) > Ni (20,3) > Cr (11,7) > Cd (5,2) > Pb (4,2) > Co (2,3) > Mn (0,95)	167,9
Средний	Кобрин	Cr (147,6) > Zn (130,5) > Cu (71,9) > Cd (6,4) > Ni (6,3) > Mn (4,6) > Pb (3,7) > Co (2,4)	373,0
	Берёза	Zn (82,7) > Cu (35,0) > Cr (9,9) > Pb (8,4) > Co (6,6) > Ni (5,1) > Cd (4,4) > Mn (1,5)	153,2
	Лунинец	Cu (88,2) > Zn (36,0) > Cd (10,1) > Pb (7,4) > Ni (5,7) > Cr (2,1) > Mn (1,3) > Co (1,1)	151,8
	Ивацевичи	Cu (138,9) > Zn (71,1) > Ni (4,8) > Cd (4,0) > Cr (3,8) > Mn (3,3) > Pb (3,1)	228,9
Малый	Пружаны	Zn (717,1) > Cu (567,6) > Ni (138,6) > Cr (35,1) > Pb (9,7) > Cd (8,2) > Mn (4,5)	1480,6
	Ганцевичи	Zn (83,7) > Cu (39,8) > Ni (6,6) > Mn (5,3) > Cd (5,2) > Co (4,6) > Pb (3,4) > Cr (2,1)	150,6
	Малорита	Zn (60,9) > Cu (32,1) > Ni (5,1) > Cd (4,9) > Pb (3,0) > Cr (2,0) > Mn (0,81)	108,1
	Каменец	Zn (58,0) > Cu (44,0) > Ni (5,6) > Cd (3,3) > Cr (2,8) > Pb (2,6) > Mn (1,5) > Co (0,56)	117,8
Средний загрязняющий потенциал ОГСВ**		Zn (145,5) > Cu (118,8) > Cr (24,3) > Ni (22,0) > Cd (5,8) > Pb (5,0) > Mn (2,6) > Co (2,0)	

*Для значений $K_c > 1$.

**Средний загрязняющий потенциал ОГСВ для девяти рассматриваемых городов.

Примечание. Полужирным шрифтом выделены значения $K_c > 1$, светлым курсивом – $K_c < 1$.

Очень высокий загрязняющий потенциал характерен для ОГСВ Пружан (по цинку и меди), высокий – для ОГСВ Кобрин (по меди и цинку), Ивацевичей (по меди) и Пружан (по никелю). Средний уровень потенциала характерен для Бреста (по цинку и меди), Лунинца и Кобрин (по меди), Берёзы, Ивацевичей, Ганцевичей, Малориты и Каменца (по цинку).

Суммарный загрязняющий потенциал ОГСВ в рассматриваемых городах изменяется в широких пределах – от 108,1 в Малорите до 1480,6 в Пружанах. На рис. 3 отражена доля конкретных ТМ в общем загрязняющем потенциале ОГСВ городов Брестской области. Как следует из круговых диаграмм, в малых городах загрязняющий потенциал ОГСВ в наибольшей степени обеспечивается за счет цинка (49–56 %) и в меньшей степени – за счет меди (26–38 %). В сумме их вклад составляет 82–87 %.

В средних городах вклад цинка в загрязняющий потенциал ОГСВ несколько ниже, за исключением Берёзы (56 %). В Ивацевичах и Лунинце загрязняющий потенциал в наибольшей степени обеспечивается за счет меди (61 и 58 % соответственно), в Кобрине – за счет хрома (39 %) и цинка (35 %). В Бресте, относящемся к крупным городам, загрязняющий потенциал ОГСВ связан главным образом с цинком (42 %) и медью (32 %), в меньшей степени – с никелем (12 %) и хромом (8 %).

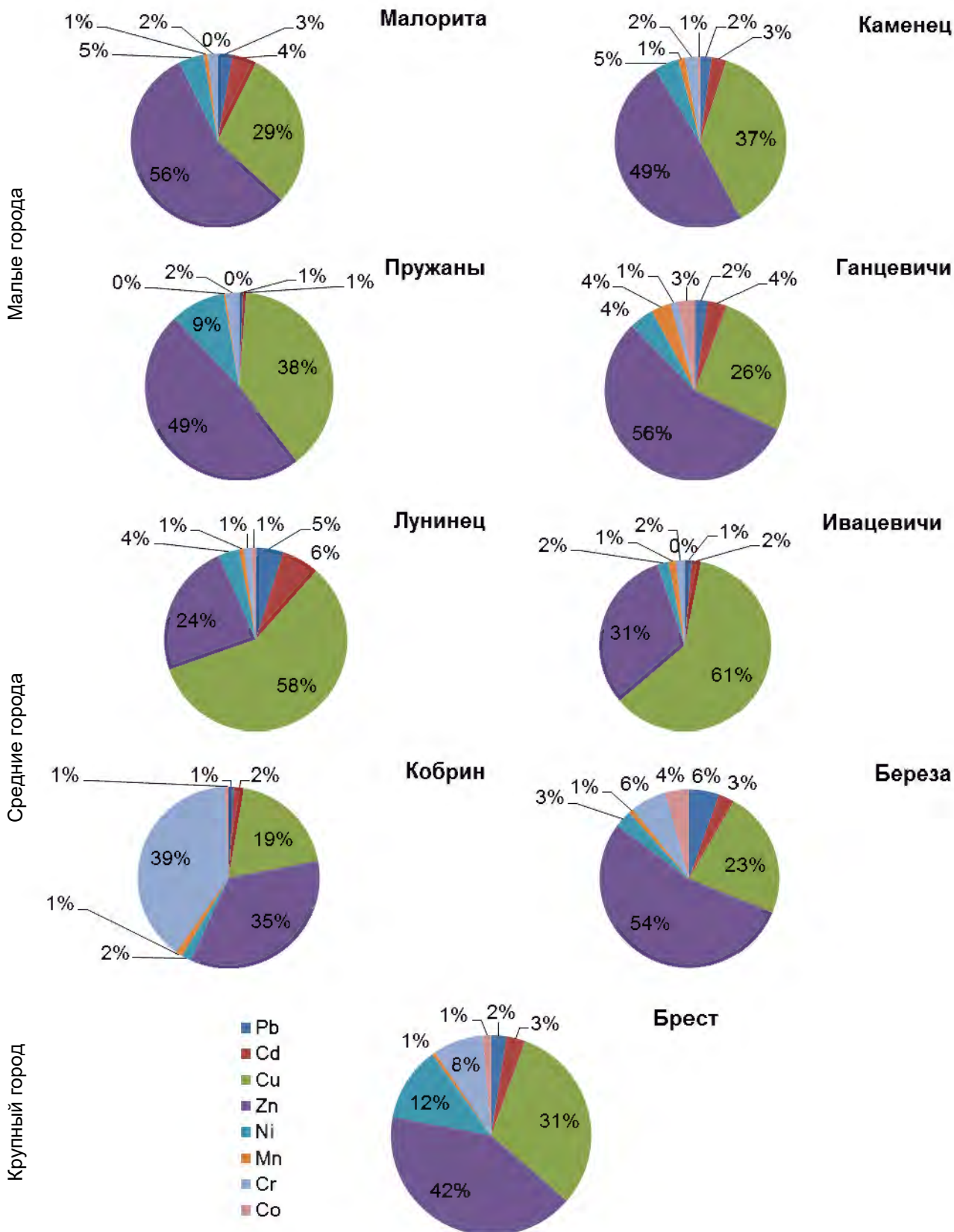


Рис. 3. Доля тяжелых металлов в общем загрязняющем потенциале осадков городских сточных вод городов Брестской области, %

Fig. 3. The share of heavy metals in the total polluting potential of urban wastewater sludge in the cities of the Brest region, %

Результаты расчета коэффициентов опасности (K_o) ОГСВ по сравнению с действующими гигиеническими нормативами для почв [12] позволили построить ранжированные геохимические ряды коэффициентов опасности ОГСВ городов Брестской области по содержанию ТМ (табл. 3). Анализ геохимических рядов коэффициентов опасности ОГСВ показывает, что практически все ряды возглавляются цинком и медью, исключение составляет Кобрин, где коэффициент опасности хрома в ОГСВ выше, чем меди. Наибольший суммарный коэффициент опасности характерен для ОГСВ Пружан, наименьший – для Каменца и Малориты.

Таблица 3. Геохимические ряды коэффициентов опасности осадков городских сточных вод по показателю отношения концентраций тяжелых металлов в их составе к ПДК/ОДК для почв по [12]

Table 3. Geochemical series of hazard coefficients for precipitation of urban wastewater sludge in terms of the ratio of concentrations of heavy metals in their composition to the MPC /APC for soils according to [12]

Город		Геохимический ряд коэффициентов опасности*	Суммарный коэффициент опасности**
по величине	ОГСВ		
Крупный	Брест	Zn (16,1) > Cu (4,0) > Cd (1,9) > Ni (1,8) > Pb (0,8) = Cr (0,8) > Mn (0,1)	23,8
Средний	Кобрин	Zn (29,9) > Cr (8,2) > Cu (5,5) > Cd (2,3) > Pb (0,7) > Ni (0,6) > Cr (0,5) > Mn (0,4)	45,9
	Берёза	Zn (19,0) > Cu (2,7) > Cd (1,6) = Pb (1,6) > Ni (0,4) > Mn (0,1)	24,8
	Лунинец	Zn (8,3) > Cu (6,7) > Cd (3,7) > Pb (1,4) > Ni (0,5) > Cr (0,1) = Mn (0,1)	20,0
	Ивацевичи	Zn (16,5) > Cu (10,6) > Cd (1,4) > Pb (0,6) > Ni (0,4) > Mn (0,3) > Cr (0,2)	28,4
Малый	Пружаны	Zn (164,9) > Cu (43,3) > Ni (12,5) > Cd (2,9) > Cr (1,9) > Pb (1,8)	227,4
	Ганцевичи	Zn (19,2) > Cu (2,0) > Cd (1,9) > Pb (0,6) = Ni (0,6) > Mn (0,4) > Cr (0,1)	24,2
	Малорита	Zn (14,0) > Cu (2,5) > Cd (1,8) > Pb (0,6) > Ni (0,5) > Cr (0,1) = Mn (0,1)	18,2
	Каменец	Zn (13,3) > Cu (3,4) > Cd (1,2) > Pb (0,5) = Ni (0,5) > Cr (0,2) > Mn (0,1)	17,9
Среднее значение для ОГСВ Брестской области		Zn (33,4) > Cu (9,1) > Cd (2,1) > Ni (2,0) > Cr (1,4) > Pb (0,9) > Mn (0,2)	

*В скобках указаны величины коэффициентов опасности (K_o).

**Для значений $K_o > 1$.

Примечание. Обозначения те же, что и в табл. 2.

Для большинства рассматриваемых городов потенциал опасности ОГСВ обусловлен главным образом содержанием цинка в их составе. Как следует из рис. 4, практически во всех городах, за исключением Лунинца, вклад цинка в формирование потенциала опасности составляет больше половины (от 55 до 74 %). В ОГСВ Ивацевичей и Лунинца высок также вклад меди в формирование потенциала опасности – 35 и 32 % соответственно.

Расчеты показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ в зонах воздействия очистных сооружений Кобрин, Берёзы и Малориты (на промплощадках и в ближних зонах воздействий – до 300 м) [19] показали широкий диапазон их значений, что обусловлено как значительными различиями в содержании ТМ в ОГСВ, формами нахождения и подвижностью химических элементов, так и местными ландшафтно-геохимическими условиями (табл. 4).

Наименьшие значения показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ характерны для цинка (2–4 %) и меди (3–13 %). Средние значения реализации загрязняющего потенциала – для никеля (от 37 до 52 %), а также для свинца в зонах воздействия очистных сооружений Кобрин и Малориты (30 и 37 % соответственно), несколько ниже данный показатель в Берёзе – 14 %.

Наибольшие значения показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ, превышающие 100 %, характерны для марганца в зонах воздействия очистных сооружений Берёзы и Малориты (162 и 427 %), что обусловлено природными источниками аномального содержания марганца в почвах полесских ландшафтов [20].

Низкие значения показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ, прежде всего по цинку и меди, при высоком загрязняющем потенциале ОГСВ по данным химическим элементам, позволяют сделать вывод об ожидаемой тенденции дальнейшего накопления меди и цинка в почвах в зонах воздействия городских очистных сооружений.

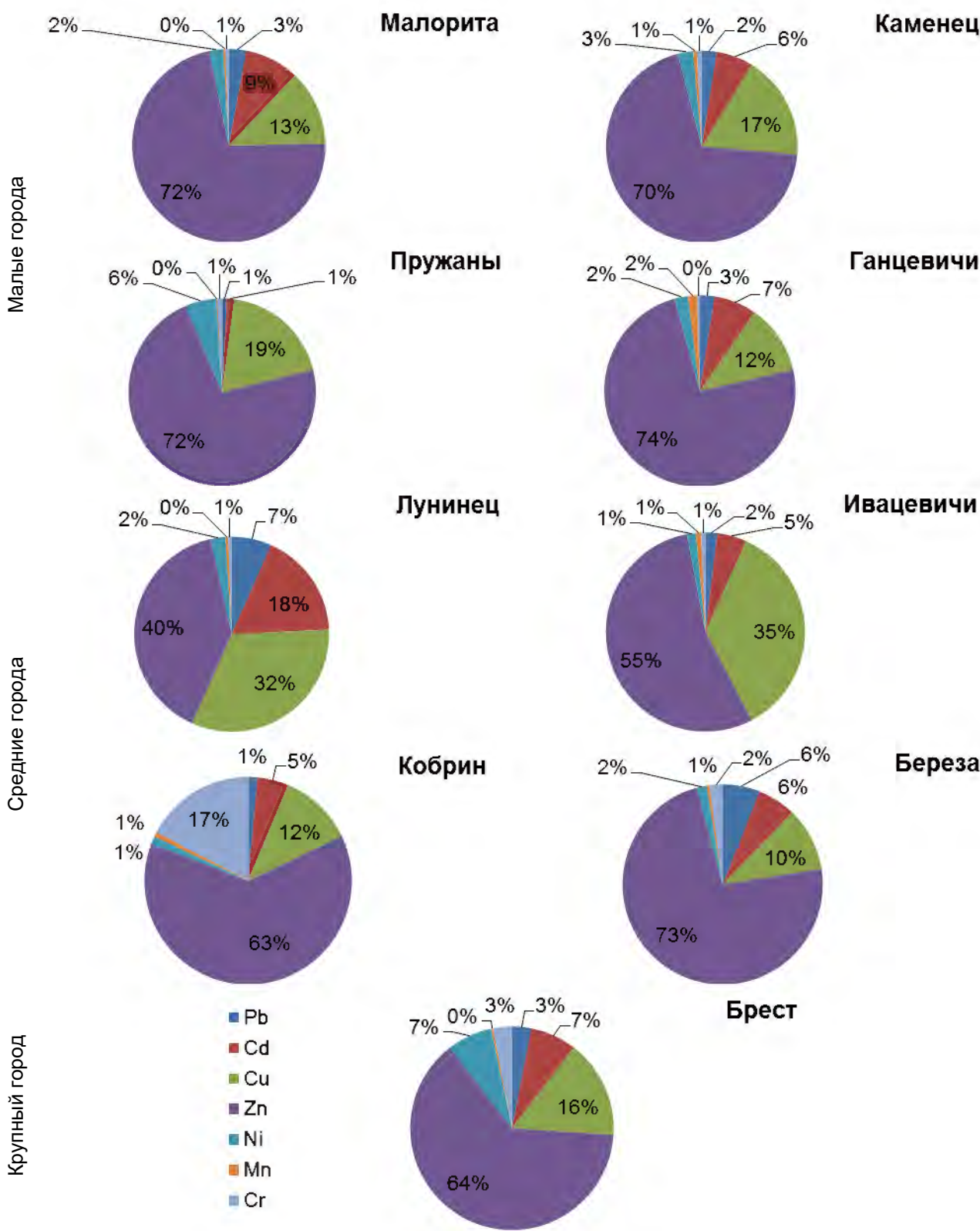


Рис. 4. Доля тяжелых металлов в потенциальной опасности загрязнения почв осадками городских сточных вод с превышениями гигиенических нормативов

Fig. 4. The share of heavy metals in the potential danger of soil contamination by precipitation of UWWWS exceeding hygienic standards

Таблица 4. Оценка реализации загрязняющего потенциала осадков городских сточных вод в зонах воздействия очистных сооружений некоторых городов Брестской области**Table 4. Assessment of the implementation of the UWWs polluting potential in the impact zones of wastewater treatment plants in some cities of the Brest region**

Город	Показатель	Pb	Cu	Zn	Ni	Mn	Cr
Кобрин	P_z	3,7	71,9	130,5	6,3	4,6	147,6
	$P_{\text{реал. ср.}}, \%$	30	3	2	52	47	3
	$P_{\text{реал. max}}, \%$	54	9	3	192	110	13
Берёза	P_z	8,4	35,0	82,7	5,1	1,5	9,9
	$P_{\text{реал. ср.}}, \%$	14	9	3	37	162	30
	$P_{\text{реал. max}}, \%$	29	23	20	100	288	162
Малорита	P_z	3,0	32,1	60,9	5,1	0,81	2,0
	$P_{\text{реал. ср.}}, \%$	37	13	4	46	427	–
	$P_{\text{реал. max}}, \%$	55	25	15	80	1112	–

Необходимо отметить, что в пунктах наблюдений с максимальными зафиксированными концентрациями ТМ в почвах показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ в 1,5–6,6 раза выше рассчитанного для средних концентраций, что свидетельствует о потенциале дальнейшего накопления загрязняющих веществ в почвах.

При этом наибольшие риски связаны с накоплением в почвах цинка, максимальные концентрации которого в ряде случаев превышают гигиенические нормативы.

Заключение. В Беларуси на начало 2024 г. накоплено 14,8 млн т осадков сточных вод, которые согласно реестру объектов хранения и захоронения отходов Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь хранятся на 142 объектах хранения осадков сточных вод, среди которых 92 объекта используются для хранения ОГСВ.

Выполненные исследования содержания ТМ в ОГСВ и рассчитанные коэффициенты концентрации (K_c) показали высокую степень обогащения ОГСВ ТМ по сравнению с региональным фоном. Средние концентрации цинка в ОГСВ рассматриваемых девяти городов выше фонового значения в 36,0–717,1 раза, меди – в 32,1–567,6, никеля – в 4,8–138,6, хрома – в 2,0–147,6, кадмия – в 3,3–10,1, свинца – в 2,6–9,7 раза, что свидетельствует о высоком загрязняющем потенциале ОГСВ исследованных городов. Ранжированный ряд средних коэффициентов концентрации ТМ (K_c) по отношению к субрегиональному фону для девяти рассматриваемых городов: Zn (145,5) > Cu (118,8) > Cr (24,3) > Ni (22,0) > Cd (5,8) > Pb (5,0) > Mn (2,6) > Co (2,0).

Наиболее высокий загрязняющий потенциал характерен для ОГСВ Пружан (по цинку и меди), высокий – для ОГСВ Кобрин (по меди и цинку), Ивацевичей (по меди) и Пружан (по никелю). Средний уровень потенциала характерен для Бреста (по цинку и меди), Лунинца и Кобрин (по меди), Берёзы, Ивацевичей, Ганцевичей, Малориты и Каменца (по цинку).

Суммарный загрязняющий потенциал ОГСВ в рассматриваемых городах изменяется в широких пределах – от 108,1 в Малорите до 1480,6 в Пружанах. В малых городах загрязняющий потенциал ОГСВ в наибольшей степени обеспечивается за счет цинка (49–56 %) и в меньшей степени – за счет меди (26–38 %). В сумме их вклад составляет 82–87 %. В средних городах вклад цинка в загрязняющий потенциал ОГСВ несколько ниже, за исключением Берёзы (56 %). В Ивацевичах и Лунинце загрязняющий потенциал в наибольшей степени обеспечивается за счет меди (61 и 58 % соответственно), в Кобрине – за счет хрома (39 %) и цинка (35 %). В Бресте, относящемся к крупным городам, загрязняющий потенциал ОГСВ связан главным образом с цинком (42 %) и медью (32 %), в меньшей степени – с никелем (12 %) и хромом (8 %).

Расчеты показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ в зонах воздействия очистных сооружений Кобрин, Берёзы и Малориты показали широкий диапазон их значений: от 2–4 % для цинка и 3–13 % для меди – до 100 % и более для марганца.

Низкие значения показателя реализации загрязняющего потенциала ОГСВ, прежде всего по цинку и меди, при высоком загрязняющем потенциале ОГСВ по данным химическим элементам позволяют сделать вывод об ожидаемой тенденции дальнейшего накопления меди и цинка в почвах в зонах воздействия городских очистных сооружений.

Благодарность. Авторы выражают благодарность научному сотруднику лаборатории биогеохимии Полесского аграрно-экологического института НАН Беларуси М. М. Дашкевичу за помощь в определении содержания ТМ в ОГСВ.

Acknowledgments. The authors express their gratitude to M. M. Dashkevich, research associate of the Laboratory of Biogeochemistry of Polesky Agrarian and Ecological Institute of the National Academy of Sciences of Belarus M. Dashkevich for his help in determining the content of TM in OGSV.

Список использованных источников

1. Янин, Е. П. Источники и пути поступления загрязняющих веществ в реки промышленно-урбанизированных регионов / Е. П. Янин // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – М., 2002. – № 6. – С. 2–56.
2. Басалай, Е. Н. Геоэкологическая оценка пригодности осадков городских сточных вод для различных видов использования (на примере Брестской области) / Е. Н. Басалай // Природопользование. – 2021. – № 1. – С. 93–117.
3. Лихачева, А. В. Оценка воздействия иловых площадок на окружающую среду в системе обращения с избыточным активным илом / А. В. Лихачева, В. Н. Марцуль // Новые технологии рециклинга вторичных ресурсов : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 24–26 окт. 2001 г. / Белорус. гос. технол. ун-т. – Минск, 2001. – С. 159–164.
4. Дрегуло, А. М. Трансформация иловых карт в объекты накопленного экологического ущерба: риски, факторы, техногенез / А. М. Дрегуло. – М. : Библио-Глобус, 2019. – 270 с.
5. Вага, И. И. Анализ отечественных технологий и передовых мировых практик подготовки осадков производственных сточных вод / И. И. Вага, А. И. Чухольский, А. А. Кравченко, М. Ю. Семашко // Природнае асяроддзе Палесся: асаблівасці і перспектывы развіцця : зб. навук. прац VIII Міжнар. навук. канф. «Природнае асяроддзе Палесся і навукова-практычныя аспекты рацыянальнага рэсурсакарыстання», Брэст, 14–16 верас. 2022 г. / НАН Беларусі, Палескі агр.-экалаг. ін-т ; рэдкал. М. В. Міхальчук (гал. рэд.) [і інш.]. – Брэст : Альтэрнатыва, 2022. – Вып. 14. – С. 152–156.
6. Об утверждении РД РБ «Методика отбора проб отходов» (РД РБ 0212.6-2002) : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 8 янв. 2003 г. № 3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2003. – 9 с.
7. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Методы отбора и подготовки проб : ГОСТ Р 56226-2014. – М. : Стандартинформ, 2019. – 13 с.
8. Охрана окружающей среды и природопользование. Аналитический (лабораторный) контроль и мониторинг окружающей среды. Характеристика отходов. Отбор проб отходов. Ч 1. Руководство по выбору и применению критериев отбора проб при различных условиях : СТБ СЕН/TR 15310-1-2018. – Минск : Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2018. – 52 с.
9. Качество почвы. Определение содержания кадмия, хрома, кобальта, меди, свинца, марганца, никеля и цинка, экстрагированных царской водкой из почвы. Пламенный и электротермический методы атомно-абсорбционной спектроскопии : СТБ ИСО 11047-2006. – Минск : Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь, 2006. – 24 с.
10. Продукты пищевые. Методика определения токсичных элементов атомно-эмиссионным методом : ГОСТ 30538-97. – М. : Стандартинформ, 2010. – 31 с.
11. Михальчук, Н. В. Фоновое содержание тяжелых металлов и микроэлементов в почвах и растительности юго-запада Беларуси как основа для сравнительных оценок при производстве органической продукции на основе принципов зеленой экономики / Н. В. Михальчук, А. Н. Мялик // Эколого-географические проблемы перехода к зеленой экономике ; редкол.: В. С. Хомич (гл. ред.), В. Ф. Логинов, Е. В. Санец. – Минск : Строй-МедиаПроект, 2019. – С. 266–281.
12. Об утверждении гигиенических нормативов : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 25 янв. 2021 г. № 37 : с изм. и доп. от 29.11.2022 № 829, 05.12.2024 № 904 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2021. – 5/48783.
13. Об обращении с отходами : Закон Респ. Беларусь от 20 июля 2007 г. № 271-3 : с изм. и доп. от 29 дек. 2023 г. № 333-3 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2007. – № 183. – 2/1368.
14. О порядке обращения с отходами : постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 28 нояб. 2019 г. № 818 : с изм. и доп. от 06.05.2020 № 271, 17.01.2020 № 16, 30.06.2020 № 388, 25.01.2021 № 36, 17.07.2008 № 1042, 28.11.2019 № 818, 02.07.2021 № 388, 21.12.2021 № 736, 25.03.2022 № 175, 10.05.2023 № 301, 21.06.2023 № 400, 06.09.2024 № 658, 18.06.2024 № 683 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2019. – 5/47436.
15. Об утверждении, введении в действие общегосударственного классификатора Республики Беларусь : постановление Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь от 9 сент. 2019 г. № 3-Т : с изм. и доп. от 02.11.2023 № 11-Т, 20.02.2024 № 7-Т // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. – 2019. – 8/34631.
16. Реестр объектов хранения, захоронения и обезвреживания отходов (хранение, захоронение). – URL: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2025/02/реестр-объектов-хранения-захоронения-и-обезвреживания-отходов-хранение-захоронение-2.pdf> (дата обращения: 20.02.2025).
17. Наличие, образование и движение отходов производства по блокам, группам и подгруппам классификатора отходов. – URL: <https://ecoportal.gov.by/otkhody/nalichie-obrazovanie-i-dvizhenie-otkhodov/otkhody-proizvodstva-ro-klassifikatoru> (дата обращения: 11.01.2025).
18. Установить объем, номенклатуру и структуру формирования твердых отходов на территории Беларуси с целью последующей разработки концепции их переработки и утилизации : отчет о НИР / Ин-т геологии, геохимии и геофизики, Ин-т проблем использования природных ресурсов и экологии АН Беларуси ; науч. рук. А. В. Кудельский ; отв. исп. В. С. Хомич. – М., 1992.

19. Басалай, Е. Н. Геоэкологическая оценка влияния городских очистных сооружений на компоненты природной среды (на примере Брестской области) : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 25.03.13 / Басалай Екатерина Николаевна ; НАН Беларуси, Ин-т природопользования. – Минск, 2023. – 23 с.
20. Петухова, Н. Н. Геохимия почв Белорусской ССР / Н. Н. Петухова. – Минск : Наука и техника, 1987. – 229 с.

References

1. Yanin E. P. *Istochniki i puti postupleniya zagryaznyayushchih veshchestv v reki promyshlennno-urbanizirovannyh regionov* [Sources and routes of pollutants entering the rivers of industrially urbanized regions]. *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty ohrany okruzhayushchej sredy* [Scientific and technical aspects of environmental protection]. Moscow, 2002, vol. 6, pp. 2–56. (in Russian)
2. Basalaj E. N. *Geoekologicheskaya ocenka prigodnosti osadkov gorodskih stochnyh vod dlya razlichnyh vidov ispol'zovaniya (na primere Brestskoj oblasti)* [Geoecological assessment of suitability of urban wastewater sludge for various uses (on the example of Brest region)]. *Prirodopol'zovanie = Nature Management*, 2021, no. 1, pp. 93–117. (in Russian)
3. Lihacheva A. V. *Ocenka vozdeystviya ilovyh ploshchadok na okruzhayushchuyu sredu v sisteme obrashcheniya s izbytochnym aktivnym ilom* [Assessment of the impact of silt sites on the environment in the system of handling excess activated sludge]. *Novye tekhnologii reciklinga vtorichnyh resursov* [New technologies for recycling secondary resources]. *Materialy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Proc. int. sci. and techn. conf.]. Minsk, 2001, pp. 159–164.
4. Dregulo A. M. *Transformaciya ilovyh kart v ob"ekty nakoplennoy ekologicheskogo ushcherba: riski, faktory, tehnogenez* [Transformation of silt maps into objects of accumulated environmental damage: risks, factors, and technogenesis]. Moscow, Biblio-Globus Publ., 2019, 270 p. (in Russian)
5. Vaga I. I., Chuhol'skij A. I., Kravchenko A. A., Semashko M. Yu. *Analiz otechestvennyh tekhnologij i peredovyh mirovyh praktik podgotovki osadkov proizvodstvennyh stochnyh vod* [Analysis of domestic technologies and advanced global practices in the treatment of industrial wastewater sludge]. *Pryrodnae asyaroedze Palesyya: asablivasci i perspektyvy razvicya* [The natural environment of Polesie: features and prospects of development]. *Zbornik navukovyh prac VIII Mizhnarodnaj navukovaj kanferencyi "Pryrodnae asyaroedze Palesyya i navukova-praktychnyya aspekty racyanal'naga resursakarystannya"* [Proc. VIII Int. sci. conf. "The natural environment of Polesie and sci. and practical aspects of rational resource management"]. Brest, 2022, vol. 14, pp. 152–156. (in Russian)
6. *Ob utverzhdenii RD RB "Metodika otbora prob othodov" (RD RB 0212.6-2002)* [On approval of RD RB "Waste sampling methodology" (RD RB 0212.6-2002)]. *Postanovlenie Ministerstva prirodnih resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus', 08 yanv. 2003 № 3* [Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus, 08 January 2003 no. 3]. National legal internet portal of the Republic of Belarus, 2003, 6 p. (in Russian)
7. *Resursosberezenie. Osadki stochnyh vod. Metody otbora i podgotovki prob. GOST R 56226-2014* [Resource conservation. Sewage sludge. Methods of sampling and preparation of samples. GOST R 56226-2014]. Moscow, Standartinform Publ., 2019, 13 p. (in Russian)
8. *Ohrana okruzhayushchej sredy i prirodopol'zovanie. Analiticheskij (laboratornyj) kontrol' i monitoring okruzhayushchej sredy. Harakteristika othodov. Otbora prob othodov. Ch 1. Rukovodstvo po vyboru i primeneniyu kriteriev otbora prob pri razlichnyh usloviyah : STB CEN/TR 15310-1-2018* [Environmental protection and environmental management. Analytical (laboratory) control and environmental monitoring. Characteristics of waste. Waste sampling. Part 1. Guidelines for the selection and application of sampling criteria under various conditions. STB CEN/TR 15310-1-2018]. Minsk, State committee for standardization of the Republic of Belarus, 2018, 52 p. (in Russian)
9. *Kachestvo pochvy. Opredelenie soderzhaniya kadmiya, hroma, kobal'ta, medi, svinca, marganca, nikelya i cinka, ekstragirovannyh carskoj vodorodnoj iz pochvy. Plamennyj i elektrotermicheskij metody atomno-absorbcionnoj spektrometrii : STB ISO 11047-2006* [Soil quality. Determination of the content of cadmium, chromium, cobalt, copper, lead, manganese, nickel and zinc extracted by aqua regia from the soil. Flame and electrothermal methods of atomic absorption spectrometry. STB ISO 11047-2006]. Minsk, State committee for standardization of the Republic of Belarus, 2006, 24 p. (in Russian)
10. *Produkty pishchevye. Metodika opredeleniya toksichnyh elementov atomno-emissionnym metodom : GOST 30538-97* [Food products. The method of determining toxic elements by atomic emission method. GOST 30538-97]. Moscow, Standartinform Publ., 2010, 31 p. (in Russian)
11. Mihal'chuk N. V., Myalik A. N. *Fonovoe soderzhanie tyazhelyh metallov i mikroelementov v pochvah i rastitel'nostiy ugo-zapada Belarusi kak osnova dlya sravnitel'nyh ocenok pri proizvodstve organicheskoy produkcii na osnove principov zelenoj ekonomiki* [Background content of heavy metals and trace elements in soils and vegetation of the South-West of Belarus as a basis for comparative assessments in the production of organic products based on the principles of green economy]. *Ekologo-geograficheskie problemy perekhoda k zelenoj ekonomike* [Ecological and geographical problems of transition to a green economy]. Minsk, 2019, pp. 266–281. (in Russian)
12. *Ob utverzhdenii gigenicheskikh normativov* [On the approval of hygiene standards]. *Postanovlenie Soveta ministrov Respubliki Belarus', 25 yanv. 2021 g. № 37* [Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, January 25, 2021, No. 37]. *S izmeneniyami i dopolneniyami ot 29.11.2022 № 829, 05.12.2025 № 904* [With amendments and additions dated 29 November 2022 no. 829, 5 December 2024 no. 904]. National legal internet portal of the Republic of Belarus, 2021, 5/48783. (in Russian)

13. *Ob obrashchenii s othodami* [On waste management]. *Zakon Respubliki Belarus' ot 20 iyulya 2007 g. № 271-Z* [Law of the Republic of Belarus dated 20 July 2007 no. 271-Z]. *S izmeneniyami i dopolneniyami ot 29 dek. 2023 g. № 333-Z* [With amendments and additions dated 29 December 2023 no. 333-Z]. National legal internet portal of the Republic of Belarus, 2007, no. 183, 2/1368. (in Russian)
14. *O poryadke obrashcheniya s othodami* [On the waste management procedure]. *Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus', 28 noyab. 2019 g. № 818* [Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, 28 November 2019 no. 818]. *S izmeneniyami i dopolneniyami ot 06.05.2020 № 271, 17.01.2020 № 16, 30.06.2020 № 388, 25.01.2021 № 36, 17.07.2008 № 1042, 28.11.2019 № 818, 02.07.2021 № 388, 21.12.2021 № 736, 25.03.2022 № 175, 10.05.2023 № 301, 21.06.2023 № 400, 06.09.2024 № 658, 18.06.2024 № 683* [With amendments and additions dated 05 June 2020 no. 271, 17 January 2020 no. 16, 30 June 2020, no. 388, 25 January 2021 no. 36, 17 July 2008 no. 1042, 28 November 2019 no. 818, 02 July 2021 no. 388, 21 December 2021 no. 736, 25 March 2022 no. 175, 10 May 2023 no. 301, 21 June 2023 no. 400, 06 September 2024 no. 658, 18 June 2024 no. 683]. National legal internet portal of the Republic of Belarus, 2019, 5/47436. (in Russian)
15. *Ob utverzhenii, vvedenii v dejstvie obshchegosudarstvennogo klassifikatora Respubliki Belarus'* [On the approval and implementation of the national classifier of the Republic of Belarus]. *Postanovlenie Ministerstva prirodnyh resursov i ohrany okruzhayushchej sredy Respubliki Belarus' ot 09 sent. 2019 g. № 3-T* [Resolution of the Ministry of Natural Resources and Environmental Protection of the Republic of Belarus dated 09 September 2019 no. 3-T]. *S izmeneniyami i dopolneniyami ot 02 noyab. 2023 g. № 11-T, 20 fevralya 2024 g. № 7-T* [With amendments and additions dated 02 November 2023 no. 11-T, 20 February 2024 no. 7-T]. National legal internet portal of the Republic of Belarus, 2019, 8/34631. (in Russian)
16. *Reestr ob"ektov khraneniya, zakhoroneniya i obezvrezhivaniya otkhodov (khranenie, zakhoronenie)* [The register of objects of storage, burial and neutralization of waste (storage, burial)]. Available at: <https://www.ecoinfo.by/wp-content/uploads/2025/02/реестр-объектов-хранения-захоронения-и-обезвреживания-отходов-хранение-захоронение-2.pdf> (accessed 20 February 2025). (in Russian)
17. *Nalichie, obrazovanie i dvizhenie otkhodov proizvodstva po blokam, gruppam i podgruppam klassifikatora otkhodov* [The presence, formation and movement of industrial waste by blocks, groups and subgroups of the waste classifier]. Available at: <https://ecoportal.gov.by/otkhody/nalichie-obrazovanie-i-dvizhenie-otkhodov/otkhody-proizvodstva-po-klassifikatoru> (accessed 11 February 2025). (in Russian)
18. *Ustanovit' ob'em, nomenklaturu i strukturu formirovaniya tverdyh otkhodov na territorii Belarusi s cel'yu posleduyushchej razrabotki koncepcii ih pererabotki i utilizacii : otchet o NIR* [To establish the volume, nomenclature and structure of solid waste formation on the territory of Belarus for the purpose of subsequent development of the concept of their processing and utilization: report on research work]. *Institut geologii, geohimii i geofiziki, Institut problem ispol'zovaniya prirodnyh resursov i ekologii AN Belarusi* [Institute of Geology, Geochemistry and Geophysics, Institute of Problems of Natural Resources Use and Ecology of the Academy of Sciences of Belarus]. *Nauchnyj rukovoditel' A. V. Kudel'skij* [Scientific director A. V. Kudelsky]. *Otvetstvennyj ispolnitel' V. S. Homich* [Responsible executive V. S. Khomich]. Moskva, 1992.
19. Basalaj E. N. *Geoekologicheskaya ocenka vliyaniya gorodskih ochistnyh sooruzhenij na komponenty prirodnoj sredy (na primere Brestskoj oblasti)*. *Avtoreferat dissertacii kandidata geograficheskikh nauk* [Geoecological assessment of the impact of urban wastewater treatment plants on components of the environment (on the example of the Brest region). Abstract of the diss. cand. geogr. sci.]. Minsk, 2023, 23 p. (in Russian)
20. Petuhova N. N. *Geohimiya pochv Belorusskoj SSR* [Geochemistry of soils of the Belarusian Soviet Socialist Republic]. Minsk, 1987, 229 p. (in Russian)

Информация об авторах

Басалай Екатерина Николаевна – кандидат географических наук (ул. Стафеева, 17, 224007, г. Брест, Беларусь). E-mail: basalaiekaterina@yandex.ru

Хомич Валерий Степанович – доктор географических наук, доцент, главный научный сотрудник, Институт природопользования НАН Беларуси (ул. Ф. Скорины, 10, 220076, г. Минск, Беларусь). E-mail: valery_khomich@mail.ru

Information about the authors

Ekaterina N. Basalai – Ph. D. (Geography) (17, Stafeeva Str., 224007, Brest, Belarus). E-mail: basalaiekaterina@yandex.ru

Valery S. Khomich – D. Sc. (Geography), Associate Professor, Chief Researcher, Institute of Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus (10, F. Skoriny Str., 220076, Minsk, Belarus). E-mail: valery_khomich@mail.ru