

## ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В СИСТЕМЕ «ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ – ВОДНАЯ РАСТИТЕЛЬНОСТЬ» РЕЧНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ЗОНЕ НАБЛЮДЕНИЯ БЕЛОРУССКОЙ АТОМНОЙ СТАНЦИИ

А. И. ПОЗДНЯКОВА<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский государственный институт метрологии,  
ул. Старовиленский тракт, 93, 220053, г. Минск, Беларусь

Показаны результаты, полученные в 2017 г., измерений тяжелых металлов в донных отложениях и водной растительности, отобранные в водных объектах в зоне наблюдения Белорусской АЭС. Приведены показатели измерения концентраций 10 тяжелых металлов, включенных Национальной системой мониторинга окружающей среды (НСМОС) Республики Беларусь и Продовольственной и сельскохозяйственной организацией ООН (ФАО) Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) в состав контролируемых загрязнителей. Измерения проводились на базе РУП «Научно-практический центр гигиены». Представлен анализ измерения концентраций тяжелых металлов, проведено их сравнение с региональными кларками и действующими нормативами (предельно-допустимыми концентрациями). Измерено содержание подвижных форм тяжелых металлов в донных отложениях и водной растительности, рассчитан их коэффициент подвижности в донных отложениях. Проведена оценка коэффициентов биологического поглощения тяжелых металлов в образцах водной растительности и смешанного травостоя, а также биогеохимической активности отдельных видов водной растительности (Элодея канадская (*Elodea canadensis*), Шелковник волосистый (*Batrachion trichophyllum*), Манник плавающий (*Glyceria fluitans*)).

**Ключевые слова:** донные отложения; водная растительность; фоновый мониторинг тяжелые металлы; ПДК; кларк; коэффициент подвижности; коэффициент биологического поглощения; коэффициент биогеохимической активности; Белорусская АЭС.

## HEAVY METALS IN THE SYSTEM BOTTOM SEDIMENTS – WATER VEGETATION RIVER ECOSYSTEMS IN THE SUPERVISED AREA OF THE BELARUSIAN NUCLEAR POWER PLANT

A. I. POZDNIAKOVA<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Belarusian State Institute of Metrology, 220053,  
93 Staravilenski trakt Street, Minsk 220053, Belarus

The article describes and presents the main results of heavy metals measurements in bottom sediments sampled in surface waters in the water objects of the Belarusian NPP, obtained in 2017. There are presented the measuring concentrations of 10 heavy metals included in the controlled pollutants by the National Environmental Monitoring System (NEMS) of the Republic of Belarus and the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) of the World Health Organization (WHO). The measurements were carried out on the basis of the RUE «Scientific and Practical Center of Hygiene». There is presented the analysis of the results and comparison with regional clarks and current standards (maximum permissible concentrations). The containing of heavy metals mobile forms was measured, and the mobility coefficient of heavy metals

### Образец цитирования:

Позднякова АИ. Тяжелые металлы в системе «донные отложения – водная растительность» речных экосистем в зоне наблюдения Белорусской атомной станции. *Журнал Белорусского государственного университета. Экология*. 2020;3:41–52.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-3-41-52>

### For citation:

Pozdniakova AI. Heavy metals in the system «bottom sediments – water vegetation» river ecosystems in the supervised area of the Belarusian nuclear power plant. *Journal of the Belarusian State University. Ecology*. 2020;3:41–52. Russian.  
<https://doi.org/10.46646/2521-683X/2020-3-41-52>

### Автор:

Позднякова Анастасия Игоревна – инженер по метрологии.

### Author:

Anastasiya I. Pozdniakova, metrology engineer.  
[anastacia.pozdnyakova@gmail.com](mailto:anastacia.pozdnyakova@gmail.com)

in bottom sediments was calculated. There are evaluated biological absorption coefficient of heavy metals in samples of aquatic vegetation and mixed grass and biogeochemical activity of aquatic vegetation certain species (*Elodea canadensis*, *Batrachion trichophyllum*, *Glyceria fluitans*).

**Keywords:** bottom sediments; background monitoring; heavy metals; maximum allowable concentration; clark; mobility coefficient; biological absorption coefficient; biogeochemical activity coefficient; Belarusian NPP.

## Введение

При оценке экологической обстановки в окружающей среде вокруг атомной электростанции основное внимание, как правило, уделяется воздействию радиоактивных выбросов и сбросов радиационно-опасного объекта. Однако Белорусская атомная электростанция (далее – Белорусская АЭС), как любой промышленный объект во время строительства и эксплуатации, оказывает на окружающую среду и человека воздействие нерадиационного характера.

Атомная станция как промышленный объект не имеет аналогов на территории Республики Беларусь, поэтому для наблюдения за ее воздействием на окружающую среду была создана самая полная, с точки зрения экологического мониторинга, программа. Для оценки воздействия Белорусской АЭС во время эксплуатации, необходима отправная точка, которой должен стать фоновый мониторинг окружающей среды, в том числе основанный на оценках фоновых концентраций тяжелых металлов в системе «донные отложения – водная растительность».

В рамках системы комплексного мониторинга в зоне наблюдения Белорусской АЭС, радиус которой составляет 12,9 км от центра промышленной площадки, организован и выполняется мониторинг загрязнения донных отложений, в том числе тяжелыми металлами (далее – ТМ), в реках Лоша, Полпе, Вилия и Гозовка. Донные отложения являются индикатором техногенного загрязнения водоемов и источником загрязнения водной растительности.

Попадая в водоем, ТМ могут находиться в различных формах: растворенные, сорбированные и аккумулярованные фитопланктоном, удерживаемые донными отложениями в результате седиментации, адсорбированные на поверхности донных отложений, находящиеся в адсорбированной форме на частицах взвеси [1; 2]. Исследования показывают, что результаты измерений концентраций ТМ собственно в воде не позволяют оценить загрязнение водного объекта в целом, так как основная часть загрязнителей, в том числе ТМ, скапливается в донных отложениях. Таким образом, донные отложения являются важным объектом фонового мониторинга.

Проблема исследований загрязнения донных отложений для последующей оценки их негативного воздействия на биоту состоит в том, что в настоящее время не существует разработанных нормативов, например, предельно допустимых концентраций (далее – ПДК), регламентирующих опасный уровень их загрязнения.

Таким образом, мониторинг ТМ в донных отложениях и в водной растительности поверхностных гидрологических объектов является необходимым компонентом общей системы экологического мониторинга для обеспечения экологической безопасности человека и окружающей среды в зоне наблюдения Белорусской АЭС.

В исследовании приведены результаты измерений концентраций ТМ в донных отложениях и образцах водной растительности, отобранных в четырех реках в зоне наблюдения. Кроме того, представлены некоторые характеристики поведения ТМ, основанные на рассмотренных в данной статье научных подходах.

Представлены расчетные значения коэффициента подвижности  $K_p$ , коэффициента биологического поглощения  $A_x$  и коэффициента биологической активности для измеренных в процессе наблюдений ТМ в системе «донные отложения – водная растительность».

## Материалы и методы исследования

**Методы отбора проб донных отложений и образцов водной растительности, подготовки и анализа.** Исследования проводились на сети комплексного мониторинга в зоне наблюдения Белорусской АЭС. Он определен Программой комплексного экологического мониторинга Белорусской АЭС, согласованной органами государственного регулирования в области радиационной и экологической безопасности (министерства по чрезвычайным ситуациям, здравоохранения, природных ресурсов и охраны окружающей среды).

В 2017 г. были отобраны пробы донных отложений и водной растительности в 6 точках на реках Вилия, Гозовка, Полпе и Лоша в зоне наблюдения Белорусской АЭС, расположение которых представлено на карте-схеме (рис. 1). В р. Вилия были исследованы донные отложения в створе выше планируемого поверхностного водозабора, где будет организован контроль сброса нормативно чистых вод. Отбор проб

производился выше водозабора и в створе реки, что позволяет оценить состояние объекта выше по течению: н. п. Нидяны-Тартак, 2 км ниже устья р. Сенканки (рис. 1, т. 1), возле устья р. Ошмянки, н. п. Маркуны (рис. 1, т. 4).

Донные отложения на р. Гозовка были исследованы в нижнем створе и в замыкающем створе, принимающем поверхностный сток с территории 5-километровой зоны АЭС (1,0 км выше н. п. Го́за (рис. 1, т. 2) и н. п. Керняны (рис. 1, т. 3)). На р. Полпе проведены исследования на водотоке, в который будет осуществляться сброс сточных вод ливневой канализации при сооружении АЭС (н.п. Чехи (рис. 1, т. 5)).

Река Лоша рассматривалась как водоем, химическая нагрузка на который возрастет за счет социально-экономического развития г. Островца (2,0 км выше н. п. Герваты (рис. 1, т. 6)).

В пробах донных отложений и водной растительности измерялись As, Pb, Cd, Hg, Cu, Co, Cr, Ni, Zn, Mn. Некоторые из ТМ (As, Pb, Cd, Hg) определены к контролю в пищевой продукции требованиями комиссии ФАО/ВОЗ, а остальные (Cu, Co, Cr, Ni, Zn, Mn, Pb, Cd) входят в перечень металлов, контролируемых НСМОС. На содержание ТМ были исследованы 6 проб донных отложений и 8 – водной растительности.

Видовой состав образцов водной растительности, отобранных в тех же точках, что и донные отложения, представлен такими растениями, как Манник наплывающий (*Glyceria fluitans*), Шелковник волосистый (*Batrachion trichophyllum*), Элодея канадская (*Elodea canadensis*), а также смешанными образцами травостоя.

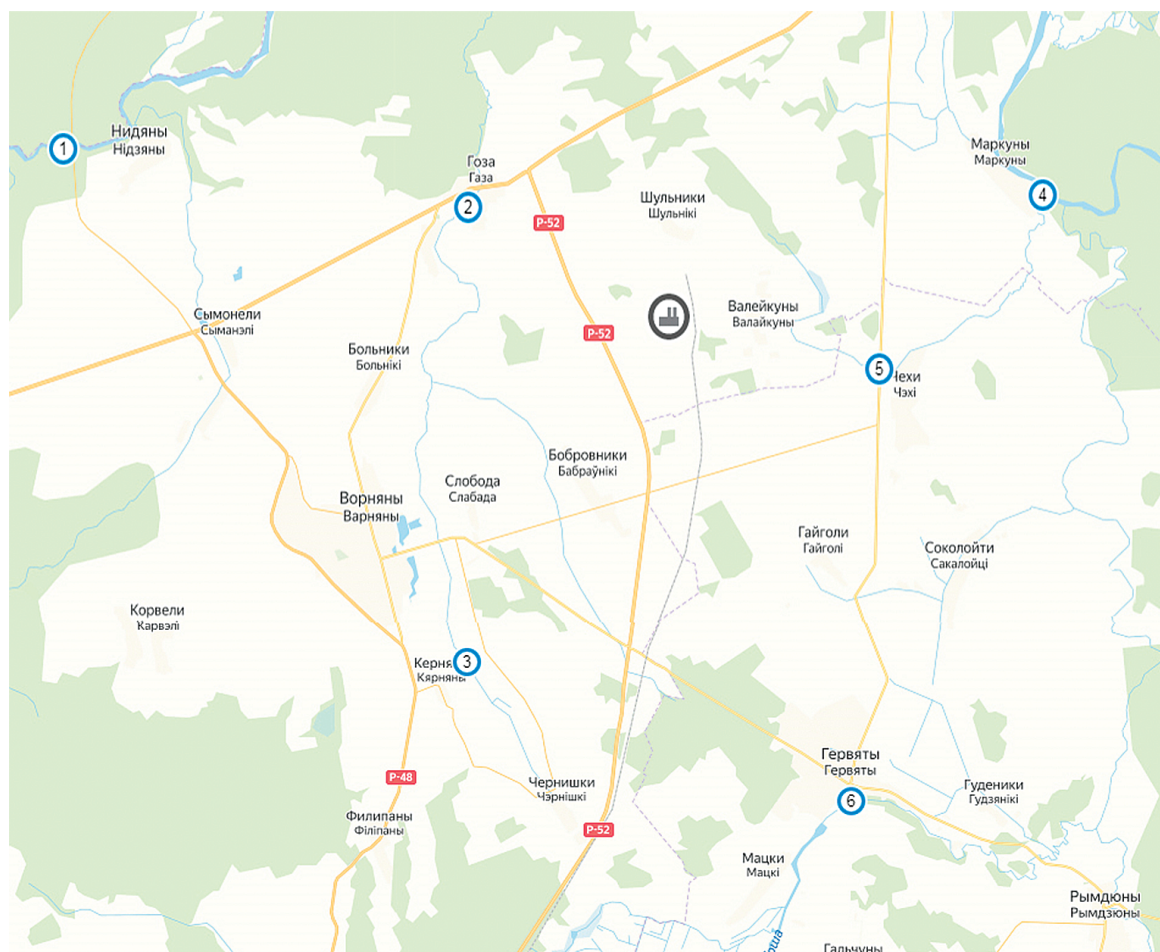


Рис. 1. Карта-схема отбора проб донных отложений и водной растительности в районе наблюдения Белорусской АЭС

Fig. 1. Map of bottom sediments and aquatic vegetation sampling in the supervised area of Belarusian NPP

Как указано выше, отбор проб водной растительности и донных отложений производился на площадках, определенной Программой комплексного мониторинга. Пробы отбирались в одной и той же фазе гидрологического режима (летняя межень). Их отбор и подготовка осуществлялись в соответствии с [3; 4].

Исследования на содержание ТМ в отобранных объектах проводились в лаборатории государственного предприятия «Научно-практический центр гигиены» Министерства здравоохранения Республики Беларусь, аккредитованной на соответствие требованиям СТБ ИСО/МЭК 17025-2004. Определение валовых



форм ТМ в образцах донных отложений и водной растительности осуществлялось согласно [5] с помощью комплексов пробоподготовки многооперационных МКП 04.

Определение содержания подвижных форм ТМ в образцах донных отложений проводилось с помощью ацетатно-аммонийного буфера в соответствии с [6]. Измерения количественного содержания тяжелых металлов осуществлялись по надлежащим методикам [7–11].

Для количественного определения содержания тяжелых металлов в пробах использовалось оборудование:

- атомно-эмиссионный спектрометр Horiba JU 2000 (Horiba Yobin Ivon (Япония, Франция));
- атомно-абсорбционный спектрометр ContrAA 700 (Analytik Jena, Германия);
- атомно-абсорбционный спектрометр SpectrAA 240Z (Agilent, США);
- анализатор ртути «Юлия-5К» (ООО НПО «Метрология», РФ);
- анализатор ртути «Юлия-2М» (ООО НПО «Метрология», РФ).

**Методы оценки результатов.** Неопределенность полученных результатов измерений концентраций ТМ в пробах донных отложений и водной растительности была оценена согласно [12].

Расчет коэффициента подвижности ТМ в донных отложениях проводился по формуле [13]:

$$K_{\text{п}} = \frac{C_{\text{пф}}}{C_{\text{вф}}}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{пф}}$  – содержание подвижной формы металла,  
 $C_{\text{вф}}$  – содержание валовой формы металла.

Расчет коэффициент биологического поглощения ТМ водной растительностью [14] проводился по формуле:

$$A_x = \frac{l_x}{n_x}, \quad (2)$$

где  $l_x$  – содержание элемента в золе растений,  
 $n_x$  – содержание элемента в горной породе или почве, на которой произрастает данное растение, кларк литосферы.

Расчет коэффициента биогеохимической активности вида (далее – БХА) проводился согласно Перельману [14] по формуле:

$$\text{БХА} = \sum A_x, \quad (3)$$

где  $A_x$  – коэффициент биологического поглощения каждого элемента.

## Результаты исследования и их обсуждение

Результаты измерений концентраций ТМ в донных отложениях в реках Вилия, Лоша, Полпе и Гозовка, в сравнении с региональными кларками и ПДК в почвах, представлены в табл. 1–4.

Как указано во введении, в практике обеспечения экологической безопасности отсутствуют общепризнанные подходы по оценке воздействия загрязнения ТМ в донных отложениях на биотические и абиотические объекты гидросферы. Поэтому предлагается использовать способы, которые применяются для почв, обоснованные тем, что сами донные отложения и их загрязнение формируются как в результате твердого стока с поверхности водосбора, так и за счет осадков и сбросов в гидрографическую сеть загрязняющих веществ, а также аэральных выпадений на зеркало водоема. Широко используемый метод сравнения концентраций ТМ в почве с региональным ТМ в почвах (по Н. Н. Петуховой и В. А. Кузнецову) позволяет предложить использовать кларки в почве как фоновые/эталонные концентрации ТМ в донных отложениях.

Таким образом, применяя такой подход, отметим, что до начала эксплуатации Белорусской АЭС в зоне наблюдения сложилось «фоновое» состояние, которое характеризуется кларком/эталон и (или) фоном, который включает в себя кларк/эталон и учитывает техногенное загрязнение ТМ в предыдущие периоды.

Однако в практике обеспечения экологической безопасности для оценки воздействия используются ПДК, поэтому проведено сравнение измеренных концентраций ТМ в пробах донных отложений с ПДК ТМ в почвах.

В донных отложениях р. Вилия наблюдается значительное содержание марганца и кадмия по сравнению с региональным кларком: превышение в 2,7 и 26,6 раз соответственно. Содержание остальных металлов не превышает региональный кларк и ПДК. По отношению к региональному кларку, концентрации остальных ТМ располагаются в следующем порядке: Zn (50 %) > Pb (40 %) > As (27 %) > Co (26 %) > Ni (24 %) > Cu (15 %) > Cr (7 %).

Таблица 1

Результаты измерений концентрации валовых форм ТМ в донных отложениях р. Вилия

Table 1

The measurements results of the heavy metals gross forms concentration in the Viliya river bottom sediments

Химический элемент	Кларк мг/кг	ПДК, мг/кг	Средняя концентрация (фоновая), мг/кг	Расширенная неопределенность измерений при k=2, P=95 %, мг/кг
As	1,5	2,0	0,39	0,12
Pb	12	32	4,91	0,36
Cd	0,05	0,5	1,33	1,18
Cr	36	100	2,37	0,55
Ni	20	20	4,77	1,56
Mn	247	1500	674,10	147,44
Co	6	20	1,57	0,45
Zn	35	55	17,74	4,02
Cu	13	33	1,94	0,13

В донных отложениях р. Гозовка содержится большое количество кадмия – превышение кларка в 19 раз и ПДК в 2 раза. По отношению к региональному кларку, концентрации остальных ТМ располагаются в следующем порядке: Mn (65 %) > Zn (49 %) > Co (30 %) > Ni (22 %) > Pb (2 1%) > Cu (20 %) > As (13 %) > Cr (11 %).

В донных отложениях р. Лоша кадмий значительно превышает кларк и ПДК: в 26 и 2,6 раз соответственно. По отношению к региональному кларку, концентрации остальных ТМ располагаются в следующем порядке: Mn (84 %) > Pb (47 %) > Zn (42 %) > Co (30 %) > Cu (26 %) > Ni (23 %) > As (13 %) > Cr (5 %).

В донных отложениях р. Полпе наблюдается высокое содержание кадмия: превышение кларка и ПДК в 17 и 1,7 раза соответственно. Содержание марганца близко к значению регионального кларка для почв. По отношению к региональному кларку, концентрации остальных ТМ располагаются в следующем порядке: Zn (58 %) > Co (36 %) > Pb (30 %) > Ni (29 %) > Cu (28 %) > Cr (12 %) > As (11 %).

Таблица 2

Результаты измерений концентрации валовых форм ТМ в донных отложениях реки Гозовка

Table 2

The measurements results of the heavy metals gross forms concentration in the Gozovka river bottom sediments

Химический элемент	Кларк мг/кг	ПДК, мг/кг	Средняя концентрация (фоновая), мг/кг	Расширенная неопределенность измерений при k=2, P=95 %, мг/кг
As	1,5	2,0	0,20	0,06
Pb	12	32	2,48	0,42
Cd	0,05	0,5	0,97	0,70
Cr	36	100	4,10	0,95
Ni	20	20	4,42	1,44
Mn	247	1500	160,91	35,23
Co	6	20	1,78	0,51
Zn	35	55	17,27	3,93
Cu	13	33	2,56	0,18

Таблица 3

Результаты измерений концентрации валовых форм ТМ в донных отложениях р. Лоша

Table 3

The measurements results of the heavy metals gross forms concentration in the Losha river bottom sediments

Химический элемент	Кларк мг/кг	ПДК, мг/кг	Средняя концентрация (фоновая), мг/кг	Расширенная неопределенность измерений при $k=2$ , $P=95\%$ , мг/кг
As	1,5	2,0	0,20	0,06
Pb	12	32	5,63	0,49
Cd	0,05	0,5	1,29	1,80
Cr	36	100	1,71	0,40
Ni	20	20	4,52	1,48
Mn	247	1500	206,44	45,16
Co	6	20	1,80	0,52
Zn	35	55	14,75	3,35
Cu	13	33	3,45	0,24

Таблица 4

Результаты измерений концентрации валовых форм ТМ в донных отложениях р. Полпе

Table 4

The measurements results of the heavy metals gross forms concentration in the Polpe river bottom sediments

Химический элемент	Кларк мг/кг	ПДК, мг/кг	Средняя концентрация (фоновая), мг/кг	Расширенная неопределенность измерений при $k=2$ , $P=95\%$ , мг/кг
As	1,5	2,0	0,16	0,05
Pb	12	32	3,57	0,52
Cd	0,05	0,5	0,85	1,39
Cr	36	100	4,30	1,00
Ni	20	20	5,79	1,89
Mn	247	1500	253,71	55,66
Co	6	20	2,19	0,63
Zn	35	55	20,25	4,59
Cu	13	33	3,69	0,25

Проанализировав представленные в табл. 1–4 данные, необходимо отметить, что наиболее высокие концентрации ТМ отмечены в реках Полпе и Вилия, низкие – в реках Гозовка и Лоша. Это можно объяснить тем, что пробы донных отложений в реках Вилия и Полпе отбирались вблизи населенных пунктов, тогда как наблюдательные пункты в реках Лоша и Гозовка находятся выше по течению. На р. Вилия отмечены относительно высокое содержание мышьяка, кадмия и марганца, в р. Полпе – кобальта, меди, хрома, никеля и цинка.

Если рассматривать содержания ТМ в донных отложениях относительно ПДК с целью их использования, то следует обратить внимание на повышенное содержание кадмия, присущее всем отобраным пробам. Концентрации кадмия во всех пробах донных отложений превосходят региональный кларк [15] в почве в 19–27 раз, а ПДК для почв превышен в 2–2,7 раз. Наибольшее его содержание наблюдается в донных отложениях р. Вилия, наименьшее – в отложениях р. Лоша. Согласно исследованиям [16], в антропогенно-измененных почвах Беларуси отмечается повышенное содержание кадмия, что может быть источником

его поступления в реки за счет смыва с поверхности водосборов, при этом, согласно [2], кадмий активно сорбируется донными отложениями, что соответствует полученным экспериментальным данным.

В донных отложениях р. Вилия содержание марганца превышает кларк в почве почти в 3 раза. Содержание марганца в донных отложениях рек Полпе и Лоша находится в пределах регионального кларка в почве, и не превышает ПДК.

Установлены различия в содержании хрома, марганца и кадмия в донных отложениях исследуемых водных объектов. Так, по содержанию хрома, свинца и меди наблюдаемые различия составили 2 раза, мышьяка 2,5 раза, марганца 4 раза.

Если сравнить измеренные концентрации ТМ в донных отложениях с данными, представленными в [17], то можно отметить, что содержание свинца, меди и хрома близко к минимальным значениям по стране, содержание цинка близко к средним значениям, а содержание марганца колеблется от минимального до среднего уровня.

Помимо валовых, были проанализированы результаты содержания подвижных форм ТМ в донных отложениях. Полученные данные представлены в табл. 5.

Таблица 5

Содержание подвижных форм ТМ (мг/кг) в донных отложениях рек Вилия, Полпе, Гозовка, Лоша

Table 5

The containing of heavy metals mobile forms in the bottom sediments of rivers Viliya, Polpe, Gozovka, Losha

Химический элемент	Наименование реки			
	Вилия	Гозовка	Полпе	Лоша
As	0,11	0,08	0,09	0,08
Pb	0,70	0,49	0,71	0,72
Cd	0,32	0,15	н. о.	0,33
Cr	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Ni	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Mn	219,64	47,55	135,04	103,74
Co	н. о.	н. о.	н. о.	н. о.
Zn	2,93	1,81	2,39	4,71
Cu	0,45	н. о.	н. о.	н. о.

Примечание. н. о. – содержание элемента в пробе ниже предела обнаружения прибора.

Таким образом, можно сделать вывод, что в р. Вилия, по сравнению с остальными объектами, наиболее подвижными являются мышьяк, марганец, медь и кадмий. В р. Лоша подвижны соединения кадмия и цинка. Следовательно, можно предположить, что соединения этих металлов могут переходить в растения.

На основании полученных результатов был рассчитан коэффициент подвижности  $K_{\text{п}}$ . Полученные данные, распределенные по рекам, представлены в табл. 6.

Таким образом, коэффициент подвижности мышьяка и марганца составил около 0,40, что составляет почти половину от валового содержания. Коэффициенты подвижности свинца и цинка ниже в два раза – около 0,20. По степени подвижности ТМ расположились в следующем порядке: As (0,42) > Mn (0,41) > Zn (0,18) > Pb (0,17) > Cd (0,12) > Cu (0,06).

Таким образом, при проведении мониторинга необходимо обратить внимание на содержание мышьяка, марганца и цинка в водной растительности. Помимо них в р. Вилия подвижны соединения кадмия и меди, а в реках Гозовка и Полпе – соединения свинца, которые могут поступать в растения. Те металлы, у которых коэффициент подвижности низкий или равен 0 (медь, кобальт, никель, хром, кадмий), находятся в нерастворимом состоянии и накапливаются в донных отложениях.

Особо следует обратить внимание на фоновое содержание кобальта, поскольку в технологических системах атомной электростанции накапливается радиоактивный кобальт-60, который потенциально может оказаться в объектах окружающей среды.

На содержание ТМ были проанализированы образцы водной растительности, а для сравнения – смешанные образцы травостоя. Полученные результаты представлены в табл. 7.

Таблица 6

Коэффициент подвижности тяжелых металлов в реках Вилия, Гозовка, Полпе и Лоша

Table 6

The mobility coefficient of heavy metals in the rivers Viliya, Gozovka, Polpe and Losha

Химический элемент	Наименование реки				Среднее
	Вилия	Гозовка	Полпе	Лоша	
As	0,29	0,42	0,57	0,42	0,42
Mn	0,33	0,30	0,53	0,50	0,41
Zn	0,17	0,10	0,12	0,32	0,18
Pb	0,14	0,20	0,20	0,13	0,17
Cd	0,20	0,16	0	0,13	0,12
Cu	0,23	0	0	0	0,06

Таблица 7

Результаты измерений концентрации ТМ в образцах водной растительности рек Вилия, Гозовка, Полпе, Лоша

Table 7

The containing of heavy metals gross forms concentration in the aquatic vegetation samples of rivers Viliya, Polpe, Gozovka, Losha

Химический элемент	р. Вилия		р. Гозовка		р. Полпе	р. Лоша
	Манник плавающий	Шелковник волосистый	смешанный образец травостоя	Элодея канадская	смешанный образец травостоя	смешанный образец травостоя
Pb	0,19	0,22	0,37	0,64	1,07	0,27
Cd	0,02	н.о.	0,44	0,06	0,07	0,20
Cr	0,22	0,27	0,26	1,32	0,84	0,29
Ni	0,57	0,54	1,99	1,54	1,54	0,89
Mn	46,73	40,79	459,3	494,7	535,1	893,9
Cu	1,13	6,40	2,39	6,56	2,53	4,56
Zn	13,18	22,45	44,17	32,95	20,59	45,29

Примечание. н. о. – содержание элемента в пробе ниже предела обнаружения прибора.

Отмечено, что в измеренных образцах растительности р. Лоша наблюдается самое высокое содержание марганца и цинка по сравнению с остальными образцами.

В Маннике плавающем р. Вилия наименьшее содержание ТМ среди всех отобранных образцов. Однако, по результатам исследования донных отложений, содержание ТМ в них было самым высоким из всех изученных водных объектов.

В водной растительности р. Вилия отмечено низкое содержание марганца, никеля, кадмия и свинца по сравнению с остальными объектами, при этом треть соединений марганца в донных отложениях находится в подвижном состоянии (согласно  $K_d$ ).

В водной растительности концентрация кадмия относительно невелика, несмотря на то что во всех пробах донных отложений было отмечено содержание кадмия выше регионального кларка для почвы.

Также был рассчитан коэффициент биологического поглощения  $A_x$  [14]. Это соотношение концентрации валовых форм тяжелых металлов в золе растений к концентрации валовых форм тяжелых металлов в донных отложениях, отобранных в одной точке. В зависимости от величины  $A_x$  химические элементы разделены следующим образом: элементы биологического накопления ( $A_x > 1$ ) и биологического захвата ( $A_x < 1$ ).

Коэффициенты биологического поглощения тяжелых металлов водной растительностью представлены в табл. 8.



Таблица 8

Коэффициент биологического поглощения ТМ водной растительностью в объектах исследований

Table 8

Biological absorption coefficient of heavy metals by aquatic vegetation samples taken in the research objects

Химический элемент	р. Виляя		р. Гозовка		р. Полпе	р. Лоша
	Манник плавающий	Шелковник волосистый	Элодея канадская	смешанный образец травостоя	смешанный образец травостоя	смешанный образец травостоя
Pb	0,14	0,03	0,16	0,34	0,08	0,19
Cd	0,014	0,00	0,07	0,42	0,10	0,03
Cr	0,09	0,11	0,19	0,21	0,07	0,49
Ni	0,14	0,10	0,24	0,84	0,15	0,34
Mn	0,14	0,04	1,91	7,27	3,52	2,59
Cu	0,54	3,56	1,57	2,58	1,23	0,73
Zn	1,02	1,00	1,18	6,66	2,24	1,40

Примечание. 0,00 – содержание тяжелых металлов в образцах растений ниже предела обнаружения прибора.

Из полученных данных следует, что медь, цинк и марганец являются элементами наибольшего накопления, так как в образцах травостоя и некоторых водных растений КБП значительно превысил 1. Это можно объяснить интенсивным участием этих элементов в метаболизме растений [18].

Следует обратить внимание, что Манник плавающий и Шелковник волосистый, отобранные в р. Виляя, не накапливают марганца, который имеет высокий коэффициент подвижности в донных отложениях (табл. 6). В р. Гозовка были отмечены высокие значения коэффициента подвижности у свинца, кадмия и марганца. Элодея канадская (отобранная в этой реке) накапливает марганец, тогда как соединения кадмия и свинца практически не поглощаются. Следует отметить, что все образцы растений накапливают соединения цинка, коэффициент подвижности которого в донных отложениях не высок. Таким образом, использование коэффициента биологического накопления ТМ в растениях представляется более показательным для оценки поведения ТМ в водном объекте, чем коэффициент подвижности их в донных отложениях.

Такие элементы, как свинец, хром, никель, кадмий, меньше всего накапливаются растениями, поскольку у них КБП ниже единицы. К тому же никель и хром относительно слабо поглощаются корнями растений [19].

Для Манника плавающего (*Glyceria fluitans*), Шелковника волосистого (*Batrachion trichophyllum*) и Элодеи канадской (*Elodea canadensis*) был рассчитан коэффициент БХА, который выражает общую способность вида к концентрации микроэлементов.

Результаты расчета коэффициента БХА по формуле (3) для образцов водной растительности представлены в табл. 9 и на рис. 2.

Таблица 9

Коэффициент биогеохимической активности водной растительности, отобранных в изучаемых объектах

Table 9

Contribution of heavy metals to the biogeochemical activity coefficient of aquatic vegetation species taken in the research objects

Химический элемент	Манник плавающий ( <i>Glyceria fluitans</i> )	Шелковник волосистый ( <i>Batrachion trichophyllum</i> )	Элодея канадская ( <i>Elodea canadensis</i> )
Pb	0,07	0,01	0,02
Cd	0,01	0	0,01
Cr	0,04	0,02	0,03
Ni	0,07	0,02	0,03
Mn	0,07	0,01	0,26
Cu	0,26	0,74	0,21
Zn	0,49	0,21	0,16

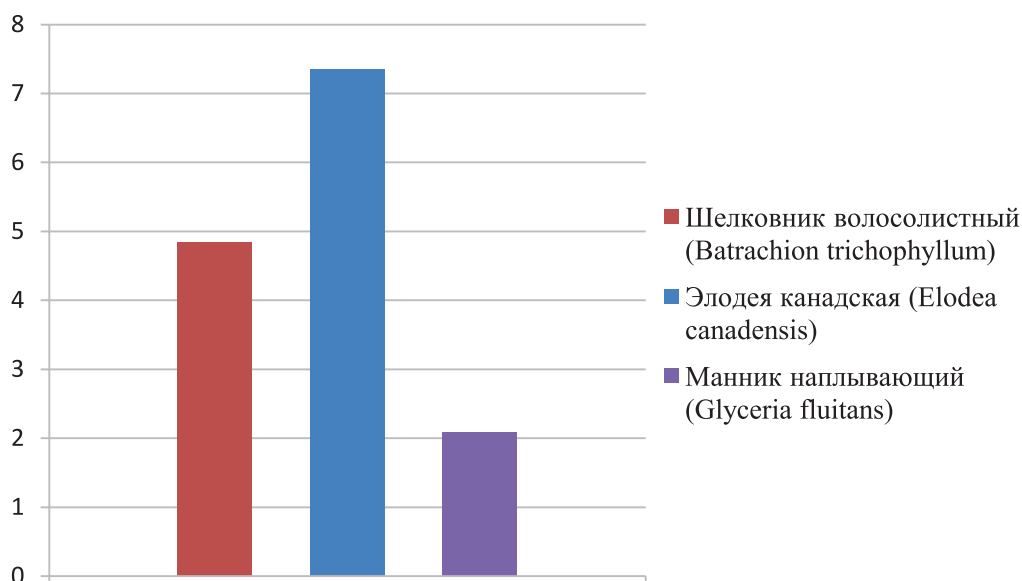


Рис. 2. Коэффициент биогеохимической активности видов водной растительности, произрастающих в зоне наблюдения Белорусской АЭС

Fig. 2. Biogeochemical activity coefficient of aquatic vegetation species growing in the supervised area of Belarusian NPP

Как следует из табл. 9 и рис. 2, в зоне наблюдения Белорусской АЭС наибольшая биогеохимическая активность к поглощению ТМ отмечена у Элодеи канадской. При этом коэффициент БХА формируется на 26 % за счет накопления марганца, 21 % – накопления меди. Наименьшая биохимическая активность отмечена у Манника плавающего, у которого максимальный вклад в коэффициент дает цинк – 49 %. Биогеохимическая активность Шелковника волосолистного на 74 % обусловлена накоплением меди. Способность данных растений к поглощению ТМ отмечена и другими авторами [20].

### Заключение

В соответствии с Программой комплексного экологического мониторинга Белорусской АЭС, представлены результаты измерений концентраций ТМ в пробах донных отложений, водной растительности (в том числе образцах травостоя) в зоне наблюдения атомной станции. Полученные результаты могут быть использованы как оценка фоновое состояние в системе «донные отложения – водная растительность» до начала ее эксплуатации. Получены и представлены оценки средних фоновых концентраций меди, цинка, свинца, кадмия, хрома, никеля, марганца, ртути, а также мышьяка, в донных отложениях рек Вилия, Гозовка, Полпе и Лоша в зоне наблюдения Белорусской АЭС.

Результаты исследований свидетельствуют, что в донных отложениях из 10 изученных ТМ, только марганец и кадмий превышают региональный кларк в 1,4 и 22 раза соответственно. Поскольку источников загрязнения донных отложений этими металлами не установлено, то необходимо проводить дальнейшие исследования. Концентрации остальных ТМ не превышают региональный кларк для почв.

Концентрации ТМ в образцах водной растительности составили от 0,07 мг/кг (кадмий) до 634,0 мг/кг (марганец). Исследования показали, что наиболее подвижными являются соединения мышьяка и марганца. Вместе с тем высокий коэффициент БХА позволяет сделать вывод о том, что Элодею канадскую можно использовать как индикатор при определении загрязнения донных отложений марганцем, а Манник наплывающий – цинком. Коэффициент биологического поглощения тяжелых металлов водной растительностью свидетельствует, что в водных растениях р. Вилия происходит преимущественно накопление цинка, р. Гозовка – марганца, цинка и меди, р. Полпе – марганца и цинка, р. Лоша – меди, хрома, цинка и марганца.

### Библиографические ссылки

1. Орлов ДС, Садовникова ЛК, Лозановская ИН. *Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении*. Москва: Высшая школа; 2002. 334 с.
2. Будников ГК. Тяжелые металлы в экологическом мониторинге водных систем. *Соросовский образовательный журнал*. 1998;5:23–29.
3. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб: ГОСТ 17.4.3.01–83: введен РБ 17.12.92. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации; 1992. 8 с. (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу).

4. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа: ГОСТ 17.4.4.02-84: введен РБ 17.12.92. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации; 1992. 12 с. (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу).
5. Методика автоклавной пробоподготовки продовольственного сырья, пищевых продуктов, биологических материалов, косметической продукции, почвы, отходов производства и потребления для определения содержания в них токсичных и минеральных элементов: Инструкция 4.1.10-14-5-2006: утверждена Постановлением Главного государственного санитарного врача РБ 17.02.2006: введен 17.02.2006. Минск: Минздрав; 2006. 18 с.
6. Временные методические рекомендации по контролю загрязнения почв. Москва: Гидрометеиздат, 1983. Часть 1. 128 с.
7. Методика выполнения измерений концентраций тяжелых металлов в твердых матрицах методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии: МВИ.МН 3280-2009: утверждено Главным государственным санитарным врачом РБ 30.12.2009: введен 30.12.2009. Минск: Минздрав; 2009. 28 с.
8. Качество воды. Определение некоторых элементов методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (ICP-OES): СТБ ISO 11885-2011. Взамен СТБ ИСО 11885-2002; введен РБ 01.07.2011. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации; 2011. 32 с. (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу).
9. Вода питьевая. Определение содержания элементов методами атомной спектроскопии: ГОСТ 31870-2012: введен РБ 01.01.2015. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации; 2015. 26 с. (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу).
10. Качество воды. Определение содержания ртути. Метод атомной абсорбционной спектроскопии (AAS) с обогащением и без обогащения: ISO 12846-2012. – Взамен ИСО 16590:2000, ISO 5666:1999; введен РБ 15.04.2012. Минск: Белорусский государственный институт стандартизации и сертификации; 2012. 24 с. (Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу).
11. Анцукевич ВВ, редактор. *Сборник методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении измерений в области охраны окружающей среды*. В 3 частях. 4-е издание, переработанное и дополненное. Минск: БелНИЦ «Экология»; 2011. Часть 2. 270 с.
12. Методика расчета неопределенности измерений при определении концентраций ионов тяжелых металлов в твердых матрицах (приложение МВИ.МН 3280-2009): утверждено Главным государственным санитарным врачом РБ: введен 30.12.2009. Минск: Минздрав; 2009. 8 с.
13. Корельская ТА, Попова ЛФ. Тяжелые металлы в почвенно-растительном покрове селитебного ландшафта города Архангельска. *АиС*. 2012;7:1–17.
14. Перельман АИ, Касимов НС. *Геохимия ландшафта*. Москва: Высшая школа. 1999. 610 с.
15. Петухова НН, Кузнецов ВА. К кларкам микроэлементов в почвенном покрове Беларуси. *Доклады АН Беларуси*. 1992;36(5):461–465.
16. Головатый СЕ, Ковалевич ЗС, Лукашенко НК. Пространственное распределение химических загрязнителей в почвах территорий, прилегающих к предприятиям ПО «Беларускалий». *Почвоведение и агрохимия*. 2008;2(41):244–255.
17. Жуковская НВ, Власов БП, Ковальчик НВ. Содержание микроэлементов в донных отложениях водоемов и водотоков Беларуси по данным мониторинга. *Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология*. 2019;1:22–34.
18. Лозинская ОВ. Оценка содержания солей тяжелых металлов в почве и листьях березы повислой из естественных и антропогенно-измененных ландшафтов. *Экологический вестник*. 2017;2(40):43–51.
19. Соколова ОЯ. Тяжелые металлы в системе элемент – почва – зерновые культуры. *Вестник ОГУ*. 2006;4(54):106–110.
20. Гигевич ГС, Власов БП, Вынаев ГВ. *Высшие водные растения Беларуси*. Минск: БГУ; 2001. 420 с.

## References

1. Orlov DS, Sadovnikova LK, Lozanovskaya IN. *Ekologia i okhrana biosfery pri khimicheskom zagraznenii* [Ecology and conservation of the biosphere during chemical pollution]. Moscow: Vysshaja shkola; 2002. 334 p. Russian.
2. Budnikov GK. Heavy metals in environmental monitoring of water systems. *Sorosovskiy obrazovatelnyy zhurnal* [Soros Educational Journal]. 1998;5:23–29. Russian.
3. Nature conservation. The soil. General requirements for sampling: GOST 17.4.3.01–83. Enter RB 1992 December 17. Minsk: Belarusian state institute of standardization and certification; 1992. 8 p. (System of standards on information, librarianship and publishing). Russian.
4. Nature conservation. The soil. Methods of sampling and sample preparation for chemical, bacteriological, helminthological analysis: GOST 17.4.4.02-84. Enter RB 1992 December 17. Minsk: Belarusian state institute of standardization and certification; 1992. 12 p. (System of standards on information, librarianship and publishing). Russian.
5. The technique of autoclave sample preparation of food raw materials, food products, biological materials, cosmetic products, soil, production and consumption waste to determine the content of toxic and mineral elements in them: Instruction 4.1.10-14-5-2006. Uтверждена Постановлением Главного государственного врача РБ 2006 February 17. Introduction 2006 February 17. Minsk: Minzdrav; 2006. 18 p. Russian.
6. *Vremennye metodicheskie rekomendatsii po kontrolyu zagrazneniya pochv* [Temporary guidelines for the control of soil pollution]. Moscow: Gidrometeizdat; 1983. Part 1. 128 p.
7. Methodology for measuring concentrations of heavy metals in solid matrices by flame atomic absorption spectrometry: MP 3280-2009. Uтверждена Постановлением Главного государственного врача РБ 2009 December 30. Introduction. 2009 December 30. Minsk: Minzdrav; 2009. 28 p. Russian.
8. Water quality. Determination of some elements by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-OES): ISO 11885-2011. Instead of ISO 11885-2002. Enter RB 2011 July 01. Minsk: Belarusian state institute of standardization and certification; 2011. 32 p. (System of standards on information, librarianship and publishing). Russian.
9. Water. Determination of the content of elements by atomic spectrometry: GOST 31870-2012. Enter. RB 2015 January 01. Minsk: Belarusian state institute of standardization and certification; 2015. 26 p. (System of standards on information, librarianship and publishing). Russian.

10. Water quality. Determination of mercury content. Atomic absorption spectrometry (AAS) method with and without enrichment: ISO 12846-2012. Instead of ISO 16590: 2000, ISO 5666: 1999. Enter RB 2012 April 15. Minsk: Belarusian state institute of standardization and certification; 2012. 24 p. (System of standards on information, librarianship and publishing). Russian.
11. Antsukevich VV, editor. *Sbornik metodik vypolnenia izmereniy, dopushchennykh k primeneniю pri vypolnenii izmereniy v oblasti okhrany okruzhajushchey sredy* [Collection of measurement techniques approved for use in environmental measurements]. In 3 parts. 4<sup>th</sup> edition, revised and supplemented. Minsk: BelSIC «Ecology»; 2011. Part 2. 270 p. Russian.
12. The methodology for calculating the measurement uncertainty in determining the concentration of heavy metal ions in solid matrices (Appendix MP 3280-2009): Utverzhdena Postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo vracha RB. Enter 2009 December 30. Introduction. 2009 December 30. Minsk: Minzdrav; 2009. 8 p. Russian.
13. Korelskaya TA, Korelskaya TA. Heavy metals in the soil and vegetation cover of the residential landscape of Arkhangelsk. *AiS [AaN]*. 2012;7:1–17. Russian.
14. Perelman AI, Kasimov NS. *Geokhimiya landshafta* [Geochemistry of the landscape]. Moscow: Vysshaja shkola; 1999. 610 c. Russian.
15. Petukhova NN, Kuznetsov VA. The clarks of trace elements in the soil cover of Belarus. *Doklady akademii nauk Belarusi* [Reports Academy of Sciences of Belarus]. 1992;36(5):461–465. Russian.
16. Golovatyi SE, Kovalevitch ZS, Lukashenko NK. Spatial distribution chemical pollutants in soil of territories, adjacent side to the enterprises on «Belaruskali». *Pochvovedenie i agrokimiya* [Soil science and agrochemistry]. 2008;2(41):244–255. Russian.
17. Zhukovskaya NV, Vlasov BP, Kovalchik NV. Trace elements contents in Belarusian reservoirs and rivers bottom sediments according to monitoring. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Geografia. Geologia* [Journal of the Belarusian. state university. Geography. Geology. 2019;1:22–34. Russian.
18. Lozinskaya OV. Evaluation of the content of salts of heavy metals in the soil and leaves of birch hanging from natural and man-made landscapes. *Ekologicheskij vestnik* [Ecological Bulletin]. 2017;2(40):43–51. Russian.
19. Sokolova OY. Heavy metals in the element – soil – grain crops system. *Vestnik OGU* [Bulletin of OSU]. 2006;4(54):106–110. Russian.
20. Gigevich GS, Vlasov BP, Vynaev GV. *Vysshie vodnye rastenija Belarusi* [Higher aquatic plants of Belarus]. Minsk: BSU; 2001. 420 p. Russian.

Статья поступила в редколлегию 08.08.2020.  
Received by editorial board 08.08.2020.