

АККУМУЛЯЦИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ И ВЕГЕТАТИВНЫХ ОРГАНАХ *CAREX ROSTRATA* STOKES ПОЛЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ

© 2025

Ковалева О.В.¹, Виноградов Д.В.^{2,3}, Соромотин А.В.⁴

¹Государственный аграрный университет Северного Зауралья (г. Тюмень, Российская Федерация)

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Российская Федерация)

³Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева
(г. Рязань, Российская Федерация)

⁴Тюменский государственный университет (г. Тюмень, Российская Федерация)

Аннотация. В данной статье рассматривается загрязнение донных отложений и вегетативных органов *Carex rostrata* Stokes полей фильтрации тяжёлыми металлами. Описываются способы и пути поступления загрязнителей в донные отложения, а также особенности их накопления в вегетативных органах растений. Определение содержания тяжёлых металлов в исследуемых объектах осуществлялось на спектрофотометре. Для проведения оценки интенсивности накопления растениями тяжёлых металлов применялся коэффициент биологического поглощения. В работе представлены результаты сравнения загрязнения донных отложений тяжёлыми металлами по сравнению с кларковым значением и пресноводными донными отложениями. Построены ряды интенсивности поглощения на основании рассчитанных коэффициентов биологического поглощения. Изучение содержания тяжёлых металлов проводилось в полях фильтрации Нижнетавдинского района и Омутинского района Тюменской области. Проведенные исследования показали, что на данных территориях наблюдается повышенное содержание ряда тяжёлых металлов в донных отложениях, из которых основными элементами являются железо и марганец. При увеличении содержания тяжёлых металлов (железа, кобальта и марганца) в донных отложениях у растений интенсивность их поглощения снижалась. Полученные данные могут служить основой для дальнейшего мониторинга состояния донных отложений и растительности в контексте оценки экологической безопасности и устойчивости экосистем.

Ключевые слова: тяжёлые металлы; донные отложения; поля фильтрации; химический анализ; коэффициент биологического поглощения; фоновые значения; накопление этих элементов; уровень загрязнения.

ACCUMULATION OF HEAVY METALS IN SEDIMENTS AND VEGETATIVE ORGANS OF *CAREX ROSTRATA* STOKES FILTRATION FIELDS

© 2025

Kovaleva O.V.¹, Vinogradov D.V.^{2,3}, Soromotin A.V.⁴

¹Northern Trans-Ural State Agricultural University (Tyumen, Russian Federation)

²Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

³Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev (Ryazan, Russian Federation)

⁴University of Tyumen (Tyumen, Russian Federation)

Abstract. This article discusses the pollution of bottom sediments and vegetative organs of *Carex rostrata* Stokes filtration fields with heavy metals. The methods and pathways of pollutants entering bottom sediments, as well as the features of their accumulation in the vegetative organs of plants, are described. The content of heavy metals in the studied objects was determined using a spectrophotometer. The coefficient of biological absorption was used to assess the intensity of accumulation of heavy metals by plants. The paper presents the results of comparing the pollution of bottom sediments with heavy metals in comparison with the clarke value and freshwater bottom sediments. Absorption intensity series were constructed based on the calculated coefficients of biological absorption. The content of heavy metals was studied in the filtration fields of the Nizhnetavdinsky District and the Omutinsky District of the Tyumen Region. The studies showed that in these areas there is an increased content of a number of heavy metals in bottom sediments, the main elements of which are iron and manganese. With an increase in the content of heavy metals (iron, cobalt and manganese) in bottom sediments, the intensity of their absorption by plants decreased. The data obtained can serve as a basis for further monitoring of the state of bottom sediments and vegetation in the context of assessing the environmental safety and sustainability of ecosystems.

Keywords: heavy metals; sediments; filtration fields; chemical analysis; biological absorption coefficient; background values; accumulation of these elements; pollution level.

Введение

Аккумуляция тяжёлых металлов (ТМ) в природных водоемах – сложный экологический процесс, значительно усугубляемый антропогенным воздействием. В естественных условиях, таких как озера, реки и почвы, скорость накопления тяжёлых металлов, таких как

свинец, кадмий, ртуть, хром, никель и медь, ограничена природными механизмами миграции, самоочистки и биологического разложения. Эти механизмы, включающие переосаждение, биосорбцию (поглощение металлов живыми организмами), биоаккумуляцию (накопление в тканях организмов) и биомегацию (пе-

ремещение металлов в пищевой цепи), способствуют поддержанию относительного равновесия и предотвращают катастрофическое накопление токсичных веществ. Однако человеческая деятельность – промышленность, сельское хозяйство, транспорт – значительно нарушает этот естественный баланс, вводя в окружающую среду огромные количества тяжёлых металлов, превышающие способности экосистем к саморегуляции. Это приводит к увеличению фоновому уровню загрязнения, проявляющемуся в накоплении металлов в донных отложениях, водной толще и биоте [1–3].

Различные типы водоемов по-разному реагируют на загрязнение тяжёлыми металлами. Например, озера, как относительно замкнутые системы, более подвержены накоплению этих веществ, чем реки с их постоянным течением. Анализ слоев донных отложений дает ценную информацию о динамике изменения концентрации тяжёлых металлов во времени. Однако даже в озерах происходит некоторое самоочищение: микроорганизмы способны преобразовывать более токсичные формы металлов в менее опасные, а также использовать их в своих метаболических процессах. Этот процесс биоремедиации является важным естественным механизмом снижения экологического риска [4; 5, с. 99; 6, с. 47–49].

В реках, из-за постоянного движения воды, проследить стабильность концентрации загрязняющих веществ гораздо сложнее. Динамика распределения металлов зависит от множества факторов: скорости течения, гидрологического режима, геологии русла, а также от свойств самих металлов. Например, более растворимые формы металлов быстрее переносятся водным потоком, в то время как менее растворимые могут оседать в донных отложениях, образуя зоны повышенной концентрации. Это обстоятельство усложняет оценку общего уровня загрязнения и требует более комплексного подхода, включающего мониторинг не только водной толщи, но и донных отложений, а также анализа биоты на разных уровнях пищевой цепи [7, с. 115–124; 8, с. 142].

Особое внимание уделяется спецификации тяжёлых металлов в окружающей среде. Металлы могут существовать в разных формах: ионных, органических комплексов, коллоидных частиц. Для оценки экологического риска необходимо определять не только общее содержание металлов, но и их спецификацию, используя современные аналитические методы, такие как хроматография, спектроскопия и другие [9, с. 273; 10, с. 137–140]. Поэтому комплексные исследования, объединяющие химический, биохимический и экологический подходы, являются необходимыми для адекватной оценки состояния водных экосистем и разработки мер по их охране.

Донные отложения – это сложная и динамичная система, представляющая собой совокупность твердых частиц, накопившихся на дне водоемов. Их формирование – это длительный процесс, определяемый множеством взаимосвязанных факторов, начиная от геологических особенностей водосборного бассейна и заканчивая биологической активностью самого водоема [11, с. 94; 12]. В водоеме также происходят процессы химического осаждения, например, образование карбонатов кальция, что может приводить к образованию конкреций и других специфических форм в донных отложениях. Гидродинамические условия водоема (скорость течения, волнение) играют ключевую роль в распределении и перераспределении дон-

ных отложений. Антропогенное воздействие существенно изменяет естественный ход процессов формирования донных отложений. Загрязнение водоемов приводит к накоплению в донных отложениях токсикантов, которые могут представлять угрозу для водных экосистем и человека. Эти токсиканты могут высвобождаться из отложений обратно в водную толщу при изменении условий среды (например, при изменении кислотности воды или температуры), создавая вторичное загрязнение. Поэтому изучение донных отложений – это важный инструмент для оценки экологического состояния водоемов и мониторинга загрязнения окружающей среды. Анализ состава донных отложений позволяет выявить источники загрязнения, оценить степень антропогенного воздействия и разработать эффективные меры по охране водных ресурсов.

Целью исследования являлось изучить содержание тяжёлых металлов в пробах донных отложений (ДО) и растений полей фильтрации молокоперерабатывающих предприятий Тюменской области, которые можно отнести к потенциально загрязненным.

Материалы и методика исследований

Выявление особенностей накопления ТМ в растениях позволит разработать критерии экологической оценки антропогенного воздействия и проводить мониторинг ненарушенных ландшафтов.

Содержание тяжёлых металлов ($\text{мкг} \cdot \text{дм}^{-3}$) в вытяжках донных отложений и растений определялось методом атомно-абсорбционного анализа, все измерения проводились на пламенном атомно-абсорбционном спектрофотометре ContrAA 300, используя электротермический и пламенный методы атомизации проб. Вытяжки готовились по стандартным методам [13; 14; 15, с. 42; 16, с. 42]. Результаты химического анализа получены с использованием оборудования Агробиотехнологического центра Института фундаментальных и прикладных агробиотехнологий ФГБОУ ВО ГАУ Северного Зауралья. Пробы были отобраны сотрудниками института в сентябре 2022 г. в двух районах Тюменской области Нижнетавдинском (рис. 1) и Омутинском (рис. 2). Пробы отбирались с прибрежной части дна на глубине 15 см, в полях фильтрации с помощью дночерпателя Петерсена. Поля фильтрации в Нижнетавдинском районе расположены на значительном удалении от населенного пункта (см. рис. 1). Поля фильтрации Омутинского района (см. рис. 2) расположены на незначительном удалении от населенного пункта, граничат с полигоном твердых коммунальных отходов (ТКО) и, скорее всего, подвержены дополнительному антропогенному давлению.

Исследуемые поля фильтрации (очистные сооружения) являются земляными емкостями полностью или частично заглубленные и обвалованные, в которых постоянно сбрасываются промышленные сточные воды от молокоперерабатывающих предприятий различной степени загрязненности.

Все измерения на спектрофотометре проводили параллельно. Определяемый элемент в образце осадка рассчитывался для каждого определения (X_i), $\text{мг} \cdot \text{кг}^{-1}$, по формуле:

$$X_i = (C_{mi} - C_x) V k / m,$$

где C_{mi} – массовая концентрация элемента в анализируемом растворе, $\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3}$; C_x – массовая концентрация элемента в холостом растворе, $\text{мг} \cdot \text{дм}^{-3}$; V – объем раствора; k – коэффициент разбавления, если присутствует; m – масса образца донного осадка, г.



Рисунок 1 – Поля фильтрации Нижнетавдинского района



Рисунок 2 – Поля фильтрации Омутинского района

Для оценки интенсивности накопления растениями ТМ применялся коэффициент биологического поглощения, который определялся по соотношению содержания микроэлемента в золе вегетативной части растений и в корнеобитаемом слое донных отложений.

Для расчетов использовались результаты определения содержания тяжёлых металлов в слое 0–15 см донных отложений контрольных точек полей фильтрации.

Статистический анализ результатов проведён с использованием программ Excel 7.0 и Statistica 8.0.

Результаты исследований
и их обсуждение

Полученные данные химического анализа тяжёлых металлов в пробах с полей фильтрации Нижнетавдинского и Омутинского района сравнивали со значением величины кларка и официально установленными уровнями (табл. 1).

Анализируя данные можно сделать вывод, что в донных отложениях полей фильтрации наблюдается превышение показателей содержания кадмия, железа и марганца в сравнении с кларками литосферы в 5,4, 6,6 и 89,7 раза, с пресноводными донными отложениями превышение составило по тем же элементам в 2,0, 7,3 и 131,6 раз соответственно. В донных отложениях полей фильтрации Омутинского района превышение зафиксировано по двум элементам: железу и марганцу в сравнении с кларками литосферы в 11,3 и 123,3 раза, в сравнении с пресноводными донными отложениями в 12,0 и 180,8 раз соответственно. Возможно, накопление этих элементов связано с непосредственно близким расположением полигона твердых коммунальных отходов. Кроме этого в полях фильтрации на основании постоянного мониторинга установлено, превышение содержания органических соединений в десятки раз, что может изменять окислительно-восстановительные реакции и снижать мобильность данных элементов в донных отложениях.

Об уровне загрязнённости судили по коэффициенту обогащения (КО), показывающему, во сколько раз содержание тяжёлых металлов в донных отложениях превышает их кларковые или фоновые значения (табл. 2).

Достаточно высоким является коэффициент обогащения донных отложений полей фильтрации Нижнетавдинского и Омутинского районов железом, содержание которого составило 315,6 и 523,6 мг/кг соответственно. Коэффициент обогащения железом по кларку литосферы при этом составил 6,79 и 11,26, а по пресноводным донным отложениям 7,26 и 12,03. То есть донные отложения полей фильтрации Омутинского района более подвержены антропогенному загрязнению. По таким показателям как свинец, цинк, медь, кобальт и никель коэффициенты обогащения не превышали 0,91, это свидетельствует о хорошей мобильности данных элементов.

Интенсивность биологического накопления микроэлементов зависит не только от свойств, присущих им как химическим элементам, а является функцией

большого числа независимых факторов, среди которых обычно выделяются две – экологическая (внешняя) и физиологическая (внутренняя). Среди экологических факторов важнейшее значение имеет концентрация химических элементов в среде питания, доступность элементов для растений, климатические, ландшафтногеохимические и другие условия их произрастания.

В природных ситуациях говорить о почвенном питании можно в тех случаях, когда корневая система не имеет контакта с водоносным горизонтом или его капиллярной каймой. При наличии такового контакта растение получает почвенно-водное питание. Оба эти источника предполагают корневое поглощение и являются основными поставщиками большинства химических элементов в растение. Большое значение для водных объектов особенно для верховых, имеет атмосферное питание, которое является основным источником накопления элементов в растениях [18, с. 146; 19, с. 88].

Содержание тяжёлых металлов в растениях и коэффициент биологического потребления представлены в таблице 3.

Анализ полученных результатов по содержанию ТМ в вегетативных органах *Carex rostrata* Stokes показал, что наибольшее накопление наблюдается в полях фильтрации Омутинского района, в которые сбрасывается наибольшее количество сточных вод и находящимся в зоне влияния полигона ТКО. На этом участке растения активно накапливают и биогенные микроэлементы. Железа и марганца в исследуемых образцах содержится чуть больше, а именно на 36,6–125,4 мг/кг и 17,8–64 мг/кг соответственно, чем в среднем по нормативам для гидропонных кормов. Коэффициент биологического поглощения железа, кобальта и марганца выше в Нижнетавдинском районе чем в Омутинском на 0,13, 0,55 и 2,07 соответственно.

Расчет коэффициентов биологического поглощения позволил построить ряды интенсивности поглощения:

- ряд интенсивности поглощения химических элементов *Carex rostrata* Stokes Нижнетавдинского района:
 $Ni (0,03) > Cd (0,14) > Pb (0,15) > Fe (0,75) > Co (0,82) > Cu (0,84) > Zn (2,60) > Mn (2,68);$
- ряд интенсивности поглощения химических элементов *Carex rostrata* Stokes Омутинского района:
 $Ni (0,04) > Pb (0,20) > Co (0,27) > Mn (0,61) > Fe (0,62) > Cu (1,45) > Zn (2,98) > Cd (10,00).$

Таблица 1 – Содержание тяжёлых металлов в донных отложениях, мг/кг

Показатель	Образцы		Кларки литосферы*	Пресноводные ДО**
	донные отложения Нижнетавдинского района	донные отложения Омутинского района		
Свинец (Pb)	13,1 ± 0,68	14,6 ± 0,71	16	28
Кадмий (Cd)	0,71 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,13	0,35
Цинк (Zn)	10,3 ± 0,45	14,1 ± 0,67	83	110
Медь (Cu)	10,2 ± 0,39	7,8 ± 0,28	47	43
Железо (Fe)	315,6 ± 1,65	523,6 ± 2,34	46,5	43,5
Кобальт (Co)	1,1 ± 0,05	4,8 ± 0,12	18	-
Никель (Ni)	26,8 ± 1,22	46,6 ± 0,98	58	55
Марганец (Mn)	98,7 ± 5,61	135,6 ± 7,25	1,10	0,75

Примечания. * – кларки литосферы (А.П. Виноградов); ** – пресноводные донные отложения (U. Forstner).

Представленный ряд демонстрирует, что растения полей фильтрации Нижнетавдинского района интенсивнее всего поглощают Ni, Cd, Pb и Fe, в то время, как их потребность в Co, Cu и, особенно, Zn и Mn минимальна. В то же время несколько иная картина наблюдается поглощением растениями полей филь-

трации Омутинского района, так наиболее интенсивно поглощаются Ni, Pb, Co и Mn, минимально Fe, Cu, Zn и Cd. Медь и цинк в обоих агроэкосистемах относятся к минимально поглощаемым.

Ряды биологического поглощения металлов для *Carex rostrata* Stokes представлено в таблице 4.

Таблица 2 – Коэффициенты обогащения по кларку литосферы и пресноводным донным отложениям

Показатель	Коэффициенты обогащения			
	по кларку литосферы		по пресноводным донным отложениям	
	ДО Нижнетавдинского района	ДО Омутинского района	ДО Нижнетавдинского района	ДО Омутинского района
Свинец (Pb)	0,82	0,91	0,47	0,58
Кадмий (Cd)	5,46	0,23	2,03	0,09
Цинк (Zn)	0,12	0,17	0,09	0,13
Медь (Cu)	0,22	0,17	0,24	0,18
Железо (Fe)	6,79	11,26	7,26	12,03
Кобальт (Co)	0,06	0,27	–	–
Никель (Ni)	0,46	0,80	0,49	0,85
Марганец (Mn)	89,72	123,27	131,6	180,8

Таблица 3 – Содержание тяжёлых металлов в растениях (мг/кг) и коэффициент биологического потребления

Показатель	Содержание в растениях (летний период)		Нормативы для гидропонных кормов*	Коэффициент биологического поглощения (КБП)	
	Нижнетавдинского района	Омутинского района		Нижнетавдинского района	Омутинского района
Свинец (Pb)	1,9 ± 0,56	2,9 ± 0,34	3–5	0,15	0,20
Кадмий (Cd)	0,1 ± 0,01	0,3 ± 0,01	до 0,4	0,14	10,00
Цинк (Zn)	26,8 ± 3,24	42,0 ± 3,87	50–100	2,60	2,98
Медь (Cu)	8,6 ± 1,53	11,3 ± 2,02	до 30	0,84	1,45
Железо (Fe)	237,6 ± 6,21	325,4 ± 7,86	100–200	0,75	0,62
Кобальт (Co)	0,9 ± 0,02	1,3 ± 0,21	1–3	0,82	0,27
Никель (Ni)	0,7 ± 0,01	1,7 ± 0,09	1–3	0,03	0,04
Марганец (Mn)	36,8 ± 2,56	83,0 ± 3,54	10–19	2,68	0,61

Примечание. * – В.Н. Голубев, Т.Н. Назаренко.

Таблица 4 – Ряды биологического поглощения металлов в вегетативных органах *Carex rostrata* Stokes

Функциональная зона	Группы элементов				
	Биологического накопления		Биологического захвата		
	Элементы энергичного накопления, КБП = 100–10	Элементы сильного накопления, КБП = 10–1,0	Элементы слабого накопления и среднего захвата, КБП = 1–0,1	Элементы слабого захвата, КБП = 0,1–0,01	Элементы очень слабого захвата, КБП = 0,01–0,001
Нижнетавдинский район	–	Mn (2,68), Zn (2,60)	Cu (0,84), Co (0,82), Fe (0,75), Pb (0,15), Cd (0,14)	Ni (0,03)	–
Омутинский район	–	Cd (10,00), Zn (2,98), Cu (1,45)	Fe (0,62), Mn (0,61), Co (0,27), Pb (0,20)	Ni (0,04)	–

В результате расчета КБП исследуемых металлов в вегетативных органах *Carex rostrata* Stokes, произрастающих в полях фильтрации, установили, что ТМ распределяются по 3 группам элементов: элементы сильного накопления, элементы слабого накопления и среднего захвата и элементы слабого захвата.

В ходе расчетов КБП Zn в вегетативных органах *Carex rostrata* Stokes, произрастающего в исследуемых полях фильтрации, установлено, что он относится к элементам сильного накопления (КБП Zn составил от 2,60 до 2,98), кроме этого эту же группу относится Mn (2,68) по Нижнетавдинскому району, и в Омутинском районе Cd (10,00) и Cu (1,45).

Элементы слабого накопления и среднего захвата наиболее многочисленны, в обоих функциональных зонах здесь присутствуют Fe (КБП 0,62–0,75), Co (КБП 0,27–0,82) и Pb (КБП 0,14–0,20).

При этом Ni (КБП 0,03–0,04) находится в группе элементов слабого захвата в обоих функциональных зонах.

Выводы

Донные отложения, находящиеся в полях фильтрации двух исследуемых районов, демонстрируют значительное обогащение металлами с переменной валентностью, среди которых преобладают железо и марганец. Этот процесс, вероятно, обусловлен диффузией из нижних слоев донных отложений, где находятся хорошо растворимые восстановленные формы этих металлов. Важно отметить, что обогащение окисленного слоя осадка происходит за счет превращения этих металлов в малорастворимые соединения, которые выпадают в осадок. Это явление не только способствует накоплению металлов в верхних слоях, но и создает условия для их дальнейшей диффузии из нижележащих слоев.

Содержание тяжёлых металлов в вегетативных органах *Carex rostrata* Stokes в разных зонах различалось. Так, растения, произрастающие в зоне влияния полигона ТКО (Омутинский район), характеризовались наибольшим содержанием тяжёлых металлов.

У растений, произрастающих при разном уровне загрязнения агроэкосистем, интенсивность биотехнологической аккумуляции металлов отличалась.

Таким образом, в результате проведенных нами исследований установлено, что *Carex rostrata* Stokes реагирует на изменение содержания тяжёлых металлов в донных отложениях полей фильтрации. При увеличении содержания ТМ (железа, кобальта и марганца) в донных отложениях у растений интенсивность их поглощения снижалась. Это подчеркивает важность мониторинга состояния донных отложений и растительности в контексте оценки экологической безопасности и устойчивости экосистем. Поэтому возникает необходимость выделения новых параметров дальнейших исследований, направленных на понимание механизмов взаимодействия между растениями и загрязнителями, а также на разработку методов биоремедиации, которые могут помочь в очистке загрязненных территорий.

Список источников:

1. Briffa J., Sinagra E., Blundell R. Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans // *Heliyon*. 2020. Vol. 6 (8). E04691.
2. Kovaleva O., Sannikova N., Ilyasov O. Content of heavy metals in the bottom sediments of the wastewater of the

processing enterprise // *E3S Web of Conferences*: 22. Voronezh, 2021. P. 01009.

3. Skopina L.Yu., Demin E., Kostomakhin N.M., Kovaleva O.V. Sanitary and microbiological assessment of wastewater when using a biological treatment system // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: International Scientific and Practical Conference: Food and Environmental Security in Modern Geopolitical Conditions: Problems and Solutions*. Vol. 1206. IOP Publishing Ltd, 2023. P. 012040.

4. Zhou Q., Yan N., Li Y., Ren B., Ding X., Bian H., Yao X. Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017 // *Global Ecology and Conservation*. 2020. Vol. 22. E00925.

5. Ковалева О.В., Костомахин Н.М., Лебедько Е.Я. Влияние биопрепаратов на состав осадка сточных вод молокоперерабатывающих предприятий // *Аграрная наука*. 2020. № 5. С. 98–101.

6. Оценка устойчивости компонентов экосистем к техногенному воздействию как основа экологического нормирования // *Экологическая безопасность ракетно-космической деятельности* / под ред. Н.С. Касимова. М.: Спутник+, 2015. С. 45–54.

7. Иванов Е.С., Чёрная В.В., Виноградов Д.В., Позняк С.С., Кочуров Б.И. Экологическое ресурсоведение: учеб. пособие. Рязань, 2018. 514 с.

8. Щур А.В., Виноградов Д.В., Валько В.П. Влияние различных уровней агроэкологических нагрузок на биохимические характеристики почвы // *Юг России: экология, развитие*. 2016. Т. 11, № 4. С. 139–148.

9. Полетаева М.А., Осадчая О.С., Рузаева Н.А. Пути решения проблемы очистки сточных вод молочного предприятия // *Ползуновский вестник*. 2013. № 1. С. 273–275.

10. Хабарова Т.В., Виноградов Д.В., Кочуров Б.И., Левин В.И., Бышов Н.В. Агроэкологическая эффективность использования осадка сточных вод и вермикомпостов в агроценозе овса посевного // *Юг России: экология, развитие*. 2018. Т. 13, № 2. С. 132–143.

11. Виноградов Д.В., Макарова М.П., Зубкова Т.В. Применение удобрительных смесей на основе осадков сточных вод и цеолита в агроценозах масличных культур // *Теоретическая и прикладная экология*. 2023. № 1. С. 93–100.

12. Hoang H.-G., Lin C., Tran H.-T., Chiang C.-F., Bui X.-T., Kiprotich Cheruiyot N., Shern C.-C., Lee C.-W. Heavy metal contamination trends in surface water and sediments of a river in a highly-industrialized region // *Environmental Technology & Innovation*. 2020. Vol. 20. 101043.

13. Методический документ РД 52.18.289-90. Методические указания. Методы измерения массовой доли подвижных форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия, кобальта, хрома, марганца) в почвенных образцах атомно-абсорбционным методом. М.: Государственный комитет по гидрометеорологии, 1990.

14. М-МВИ-80-2008. Методы измерения массовой доли элементов в образцах почвы, грунтовых и донных отложений методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии. СПб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 2008.

15. Ковальский В.В., Раецкая Ю.И., Грачева Т.И. Микроэлементы в растениях и кормах. М.: Колос, 1971. 235 с.

16. Круглова М.И., Анисина О.В., Гринь С.А., Мельник Н.В., Мельник Р.Н., Самуйленко А.Я., Ефимченко Н.А., Денисов А.А. Инновационные технологии в очистке городских и промышленных сточных вод // *Ветеринария и кормление*. 2019. № 5. С. 42–43.

17. Tashyrev O.B., Sioma I.B., Tashyreva G.O., Novorukha V.M. Natural and synthetic solid carriers in flow module for microbial sewage filtrate purification // *Biotechnology Acta*. 2018. Vol. 11, № 6. P. 73–81.

18. Богатырев К.С., Корнилов А.Г. Экологическое состояние поверхностных водных объектов под воздействием

комплексов тепличных хозяйств // *Геология, география и глобальная энергия*. 2020. № 4 (79). С. 143–150.

19. Демидова С.Е., Балог М.М., Троян В.В. Устойчивое развитие и экологическая безопасность в аспекте «зеленой» проблематики // *ЭТАП: экономическая теория, анализ, практика*. 2020. № 5. С. 87–107.

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
Ковалева Ольга Викторовна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры экологии и рационального природопользования; Государственный аграрный университет Северного Зауралья (г. Тюмень, Российская Федерация). E-mail: kovalevaov@gausz.ru. Виноградов Дмитрий Валерьевич, доктор биологических наук, профессор, старший научный сотрудник лаборатории агроэкологии; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (г. Москва, Российская Федерация); заведующий кафедрой агрономии, агрохимии и защиты растений; Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева (г. Рязань, Российская Федерация). E-mail: vdv-rz@rambler.ru. Соромотин Андрей Владимирович, доктор биологических наук, доцент, директор научно-исследовательского института экологии и рационального использования природных ресурсов; Тюменский государственный университет (г. Тюмень, Российская Федерация). E-mail: a.v.soromotin@utmn.ru.	Kovaleva Olga Viktorovna, candidate of agricultural sciences, associate professor of Ecology and Rational Nature Management Department; Northern Trans-Ural State Agricultural University (Tyumen, Russian Federation). E-mail: kovalevaov@gausz.ru. Vinogradov Dmitry Valerievich, doctor of biological sciences, professor, senior researcher of Laboratory of Agroecology; Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation); head of Agronomy, Agrochemistry and Plant Protection Department; Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev (Ryazan, Russian Federation). E-mail: vdv-rz@rambler.ru. Soromotin Andrey Vladimirovich, doctor of biological sciences, associate professor, director of Scientific Research Institute of Ecology and Rational Use of Natural Resources; University of Tyumen (Tyumen, Russian Federation). E-mail: a.v.soromotin@utmn.ru.

Для цитирования:

Ковалева О.В., Виноградов Д.В., Соромотин А.В. Аккумуляция тяжёлых металлов в донных отложениях и вегетативных органах *Carex rostrata* Stokes полей фильтрации // Самарский научный вестник. 2025. Т. 14, № 1. С. 29–35. DOI: 10.55355/snv2025141104.