

DOI: 10.22363/2313-2310-2026-34-3-391-406

EDN: FJONDR

УДК 628.35

Научная статья / Research article

Оценка содержания и миграции ионов тяжелых металлов в системе биологической очистки сточных вод с реализованным А2/О-процессом

А.Р. Новикова, Е.С. Балымова  

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань,
Российская Федерация
 ilc2013@inbox.ru

Аннотация. Оценка содержания ионов тяжелых металлов в компонентах системы биологической очистки сточных вод и изучение их миграции в процессе биоочистки является перспективным направлением исследований для обеспечения стабильности процесса очистки сточных вод, в связи с чем выбрано в качестве цели исследовательской работы. Объектом изучения являлись сточная вода и активный ил очистных сооружений Республики Татарстан с реализованным А2/О-процессом. Отбор проб проводился на каждом этапе технологического процесса, включая анаэробную, аноксидную, аэробную зоны и вторичный отстойник. Определение массовых концентраций металлов (Fe, Mn, Cu, Ni, Pb, Cd, Co, Cr, Zn) осуществлялось методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии. Установлено, что наибольшее содержание в активном иле и сточной воде характерно для ионов железа, марганца и цинка. Концентрация металлов в хлопьях активного ила значительно ниже нормативных требований. Выявлено, что аноксидная зона вносит наибольший вклад в мобилизацию тяжелых металлов, преимущественно за счет восстановления их до более подвижных форм в результате использования как альтернативных акцепторов электронов денитрифицирующими бактериями. Рассчитаны коэффициенты миграции металлов по зонам очистки, максимальный коэффициент характерен для середины оксидной зоны узла биологической очистки (на примере ионов железа). Накопление металлов в биомассе является потенциальным источником загрязнения при утилизации ила и рециркуляции биомассы с высоким содержанием ионов металлов в хлопьях активного ила как скрытый дестабилизирующий фактор процесса биоочистки.

Ключевые слова: 2/О-процесс, активный ил, пламенная атомно-абсорбционная спектроскопия, денитрификация, мобилизация металлов

Вклад авторов. Новикова А.Р. — проведение экспериментов, написание статьи, подготовка иллюстраций. Балымова Е.С. — идея эксперимента, планирование и проведение исследования, подготовка иллюстраций, научное руководство. Все авторы ознакомлены с окончательной версией статьи и одобрили ее.

© Новикова А.Р., Балымова Е.С., 2026



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Заявление о конфликте интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявление об использовании технологий искусственного интеллекта. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовались.

Заявление о доступности данных. Данные, использованные в этом исследовании, могут быть предоставлены авторами по обоснованному запросу в связи с необходимостью соблюдения конфиденциальности участников.

История статьи: поступила в редакцию 14.03.2026; доработана после рецензирования 30.03.2026; принята к публикации 08.04.2026.

Для цитирования: Новикова А.Р., Балымова Е.С. Оценка содержания и миграции ионов тяжелых металлов в системе биологической очистки сточных вод с реализованным А2/О-процессом // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2026. Т. 34. № 3. С. 391–406. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-391-406> EDN: FJONDR

Assessment of heavy metal ion content and migration in wastewater biological treatment system with implemented A2/O-process

Aigul R. Novikova, Elena S. Balymova  

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

 ilc2013@inbox.ru

Abstract. The assessment of heavy metal ion content in the components of a biological wastewater treatment system and the study of their migration during biological treatment is a promising research area for ensuring the stability of the wastewater treatment process, and therefore was chosen as the objective of this study. The study focused on wastewater and activated sludge from treatment facilities in the Republic of Tatarstan using the Anaerobic-Anoxic-Oxic-process (A2/O-process). Sampling was conducted at each stage of the process, including the anaerobic, anoxic, and aerobic zones and the secondary clarifier. Mass concentrations of metals (Fe, Mn, Cu, Ni, Pb, Cd, Co, Cr, and Zn) were determined using flame atomic absorption spectrometry. Iron, manganese, and zinc ions were found to have the highest concentrations in activated sludge and wastewater. The concentration of metals in activated sludge flocs was significantly lower than regulatory requirements. It was found that the anoxic zone makes the greatest contribution to heavy metal mobilization, primarily due to their reduction to more mobile forms as a result of their use by denitrifying bacteria as alternative electron acceptors. Metal migration coefficients were calculated for each treatment zone, with the maximum coefficient observed in the middle of the oxide zone of the biological treatment unit (using iron ions as an example). The accumulation of metals in biomass is a potential source of pollution during sludge disposal and the recirculation of biomass with high metal ion content in activated sludge flocs, acting as a hidden destabilizing factor in the biological treatment process.

Keywords: A2/O-process, activated sludge, flame atomic absorption spectrometry, denitrification, metal mobilization

Authors' contribution. *A.R. Novikova* — conducting experiments, writing the article, preparing illustrations. *E.S. Balymova* — idea of the experiment, planning and conducting the research, preparing illustrations, scientific supervision. All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Conflicts of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Statement on the use of artificial intelligence technologies. No generative artificial intelligence technologies were used in the creation of this article.

Data availability. The data used in this study are available from the authors upon reasonable request due to the need to maintain the confidentiality of the participants.

Article history: received 14.03.2026; revised 30.03.2026; accepted 08.04.2026.

For citation: Novikova AR, Balymova ES. Assessment of heavy metal ion content and migration in wastewater biological treatment system with implemented A2/O-process. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2026;34(3):391–406. (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2026-34-3-391-406> EDN: FJONDR

Введение

Ионы тяжелых металлов (ИТМ), такие как Pb^{2+} , Hg^{2+} , Cd^{2+} , As^{3+} , As^{5+} , Cr^{3+} , Cr^{6+} , обладают высокой токсичностью для живых организмов и способны накапливаться в объектах окружающей среды, создавая долгосрочные и нередко скрытые экологические риски [1-3]. К основным источникам загрязнения относятся промышленные выбросы (металлургия, горнодобывающая отрасль [4]), сточные воды (химические производства, металлургия, сельское хозяйство [5]) и атмосферные осадки с частицами пыли и аэрозолей [6]. В связи с этим ключевыми зонами риска являются водоемы в развитых промышленных регионах. Опасность ИТМ обусловлена биохимическими механизмами и устойчивостью в экосистемах [7]. При высоких концентрациях ИТМ нарушаются клеточные процессы с образованием активных форм кислорода, происходит блокировка ферментативных систем с нарушением метаболизма и репродуктивных функций бактериальных клеток, так как тяжелые металлы связываются с белками и нуклеиновыми кислотами, изменяя их структуру [7–9].

Для снижения опасности накопления тяжелых металлов и нагрузки на окружающую природную среду особое внимание следует уделить мониторингу качества сточных вод после биологической очистки, так как это прямой путь поступления ИТМ в природные водоемы. Их содержание в различных типах вод может варьироваться в значительном диапазоне в связи с широким применением металлов в промышленности, например, в сточных водах химической и нефтехимической промышленности содержатся ионы Cd^{2+} в кон-

центрации 0,001–0,2 мг/дм³; Pb²⁺ — 0,01–1,5 мг/дм³; Cr⁶⁺ — 0,02–0,8 мг/дм³; Ni²⁺ — 0,05–2,0 мг/дм³ [10]. Рост урбанизации и индустриализации привел к повышенному загрязнению водных ресурсов ИТМ, что представляет серьезную угрозу для здоровья человека и экосистем. Тяжелые металлы не поддаются биоразложению и могут накапливаться в окружающей природной среде, достигая опасных концентраций в живых организмах [11]. Учитывая опасность тяжелых металлов для объектов окружающей среды, следует проводить контроль за поступлением их со сточными водами, их воздействием на активный ил, осуществляющий очистку, и накоплением металлов в биомассе ила.

Цель исследования — оценка содержания тяжелых металлов в компонентах системы биологической очистки и изучение их миграции в процессе биоочистки.

Задачи, решаемые в работе:

- 1) оценка содержания тяжелых металлов в активном иле и сточных водах в процессе водоочистки (до и после);
- 2) оценка накопления и миграции тяжелых металлов в компонентах системы биологической очистки на примере очистных сооружений с реализованным А2/О-процессом.

Очистные сооружения служат эффективной линией защиты от загрязнения ИТМ, поскольку предназначены для удаления загрязняющих веществ из сточных вод в результате протекающих физико-химических и биохимических процессов. Однако сами очистные сооружения могут стать потенциальными источниками загрязнения тяжелыми металлами, если эффективность процесса недостаточна.

Одним из эффективных процессов с высокой адаптивностью к региональным условиям и сочетанием стабильности традиционной биологической очистки с возможностями глубокой денитрификации и дефосфатации является А2/О-процесс¹ [12]. Процесс А2/О в последние годы широко используется для очистки муниципальных и промышленных сточных вод в России, однако сведения о влиянии и эффективности очистки сточных вод от ИТМ, содержании их в компонентах системы биоочистки единичны или полностью отсутствуют. Для классического процесса биологической очистки (с аэробной зоной) эффективность очистки от ИТМ составляет в среднем 40–65 % (табл. 1)².

¹ ИТС 10-2019 Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов : информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Москва : Бюро НДТ, 2019. 417 с.

² Никифорова Л.О., Белопольский Л.М. Влияние тяжелых металлов на процессы биохимического окисления органических веществ: теория и практика. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 78 с. EDN: QNMTZT

Таблица 1. Эффективность очистки сточных вод и предельно допустимая концентрация для биологической очистки (ПДК_{БОВ})

Ион металла	ПДК _{БОВ} , мг/дм ³	Эффективность удаления на биологических очистных сооружениях, %
Fe ³⁺	5	65
Mn ²⁺	30	Нет данных
Zn ²⁺	1	6
Ni ²⁺	0,5	40
Pb ²⁺	0,1	40
Cu ²⁺	0,5	65
Cr ³⁺	2,5	65
Cr ⁶⁺	–	50
Co ²⁺	1,0	40
Cd ²⁺	0,1	50

Примечание. БОВ — биологическая очистка воды.

Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Балымовой.

Table 1. Efficiency of wastewater treatment and maximum permissible concentration for biological treatment (MPC_{BWT})

Metal ion	MPC _{BWT} , mg/l	Removal efficiency at biological treatment plants, %
Fe ³⁺	5	65
Mn ²⁺	30	No data
Zn ²⁺	1	6
Ni ²⁺	0.5	40
Pb ²⁺	0.1	40
Cu ²⁺	0.5	65
Cr ³⁺	2.5	65
Cr ⁶⁺	–	50
Co ²⁺	1.0	40
Cd ²⁺	0.1	50

Note. BWT — biological wastewater treatment.

Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balymova.

Материалы и методы

Объектом исследования являлись сточная вода и активный ил, отобран-ные на действующих очистных сооружениях Республики Татарстан с реали-зованным А2/О-процессом, схема которых представлена на рис. 1. Проведен анализ 72 образцов сточной воды (до и после очистки) и 36 образцов активно-го ила, отобранных в течение одного года исследований.

Пробы отбирались на различных этапах процесса очистки с учетом гидродинамики процесса (табл. 2). Осуществлен анализ 27 образцов сточ-ной воды и 21 образца активного ила, отобранных с учетом гидродинамики А2/О-процесса.

Определение массовой концентрации активного ила проводили грави-метрическим методом по ФР 1.31.2008.04397.

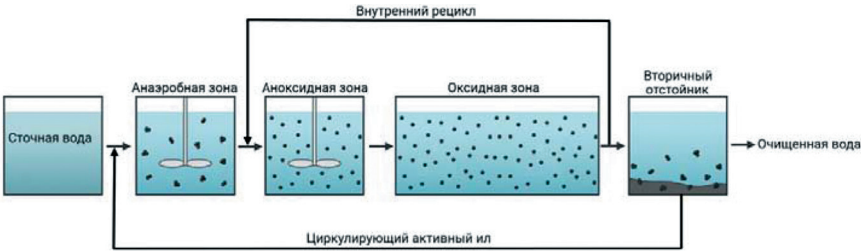


Рис. 1. Схема узла биологической очистки очистных сооружений с реализованным А2/О-процессом
Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Балымовой.

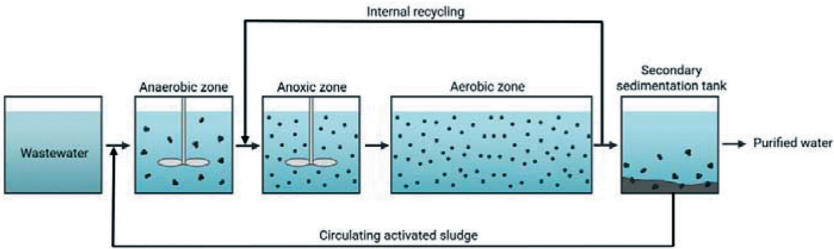


Figure 1. Schematic diagram of the biological treatment unit of a wastewater treatment plant with the implemented A2/O process
Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balymova.

Таблица 2. Места отбора проб

Место отбора проб	Сточная вода	Активный ил
Сточная вода на входе в анаэробную зону	+	–
Рецикл активного ила со вторичных отстойников	+	+
Анаэробная зона (середина)	+	+
Аноксидная зона (вход, после смешения с внутренним рециклом)	+	+
Аноксидная зона (выход)	+	+
Оксидная зона (середина)	+	+
Оксидная зона (выход)	+	+
Внутренний рецикл	+	+
Очищенная вода	+	–

Примечание: «+» — проба отбиралась; «–» — проба отсутствует.

Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Балымовой.

Table 2. Sampling locations

Sampling location	Wastewater	Activated sludge
Wastewater entering the anaerobic zone	+	–
Recycling of activated sludge from secondary settling tanks	+	+
Anaerobic zone (middle)	+	+
Anoxic zone (inlet, after mixing with internal recycle)	+	+
Anoxic zone (exit)	+	+
Oxide zone (middle)	+	+
Oxide zone (output)	+	+
Internal recycling	+	+
Treated wastewater	+	–

Note: «+» — sample was taken; «–» — sample is missing.

Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balymova.

Определение массовых концентраций металлов (железа, кадмия, кобальта, марганца, меди, никеля, свинца, хрома и цинка) в пробах сточных вод по ПНД Ф 14.1:2:4.139-98 и вытяжек из активного ила по ПНД Ф 16.1:2.2:2.3:3-36-2002 проводили методом пламенной атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС) на спектрофотометре SHIMADZU AA-7000 [13].

Миграция тяжелых металлов в компонентах системы биологической очистки оценивалась путем расчета коэффициентов распределения металлов (K_d), которые определялись как отношение концентрации металла в активном иле (C_s) к концентрации металла в сточной воде (C_w).

Аналитические измерения проводили в трех параллельных пробах для каждого образца. Для оценки точности результатов рассчитывали суммарную стандартную относительную неопределенность измерений. Статистическую значимость различий между сериями измерений определяли с применением парного t -критерия Стьюдента. Доверительные интервалы для средних значений устанавливали при $p \leq 0,05$. Все вычисления осуществлялись с использованием программного пакета Statistica 13.3.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные исследования осуществлялись на очистных сооружениях, использующих А2/О-процесс для очистки бытовых и промышленных сточных вод в Республике Татарстан. Усредненные результаты определения ионов тяжелых металлов в сточных водах (до и после очистки) и активном иле приведены в табл. 3.

Сточные воды после очистки на изучаемых очистных сооружениях согласно нормам по железу, марганцу и цинку можно отнести к недостаточно очищенным. Для свинца, кадмия и хрома характерны минимальные концентрации как в исследуемых сточных водах, так и в активном иле. Во всех пробах наибольшее содержание среди всех определяемых ИТМ характерно для железа, марганца и цинка, а в пробах активного ила дополнительно — медь, никель и кобальт. Концентрация меди во всех исследованных пробах ила варьируется в пределах 50–150 мг/кг, это значение ниже критического (500 мг/кг по исследованиям Н.С. Жмур) [14]. Концентрация ИТМ в хлопьях активного ила значительно ниже нормы, предъявляемой к осадкам сточных вод. Необходимо отметить, что при минимальных концентрациях меди и кобальта в поступающих и очищенных сточных водах отмечено их накопление в хлопьях активного ила. Это свидетельствует о периодическом (возможно залповом) кратковременном поступлении данных металлов со сточными водами, вероятно, не регистрируемом в рамках производственного лабораторного контроля. Такой фактор может приводить к дестабилизации биологической очистки сточных вод.

Таблица 3. Усредненное содержание металлов в сточных водах и активном иле за период исследования

Металл	Концентрация, мг/дм³		ПДК _{рх}	Активный ил	Концентрация, мг/кг сухого вещества			
	Сточная вода до очистки	Сточная вода после очистки			Требования			
					ГОСТ Р 17.4.3.07-2001 для I группы осадков	для II группы осадков	для биологической рекультивации	ГОСТ Р 54534-2011 для технической рекультивации
Fe	0,16 ± 0,03	0,10 ± 0,03	0,1 0,05*	1686,27 ± 505,88	–	–	–	–
Mn	0,046 ± 0,013	0,024 ± 0,007	0,01 0,05*	2234,89 ± 670,47	–	–	–	–
Zn	0,066 ± 0,018	0,060 ± 0,017	0,01 0,05*	852,61 ± 255,78	1750	3500	3500	7000
Ni	0,015 ± 0,001	<0,01	0,01 0,01*	183,12 ± 54,94	200	400	400	800
Pb	<0,005	<0,005	0,006 0,01*	<10	250	500	500	1000
Cu	<0,01	<0,01	0,001 0,005*	150,46 ± 45,14	750	1500	750	1500
Cr	<0,01	<0,01	0,02 (Cr ⁶⁺) 0,07 (Cr ³⁺)	<5	500	1000	1000	2000
Co	<0,01	<0,01	0,01 0,005*	8,58 ± 2,57	–	–	–	–
Cd	<0,0025	<0,0025	0,005 0,01*	<1	15	30	30	60

Примечания: ПДК_{рх} — предельно допустимая концентрация загрязняющих веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения; * — норматив для морской воды.
Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Бальмовой.

Table 3. Average content of metals in wastewater and activated sludge during the study period

Metal	Concentration, mg/l		MPC _н	Activated sludge	Concentration, mg/kg dry matter			
	Wastewater before treatment	Wastewater after treatment			Requirements			
					GOST R 17.4.3.07-2001			
					for precipitation group I	for precipitation group II	GOST R 54534-2011 for technical reclamation	
Fe	0.16 ± 0.03	0.10 ± 0.03	0.1 0.05*	1686.27 ± 505.88	–	–	–	
Mn	0.046 ± 0.013	0.024 ± 0.007	0.01 0.05*	2234.89 ± 670.47	–	–	–	
Zn	0.066 ± 0.018	0.060 ± 0.017	0.01 0.05*	852.61 ± 255.78	1750	3500	7000	
Ni	0.015 ± 0.001	< 0.01	0.01 0.01*	183.12 ± 54.94	200	400	800	
Pb	< 0.005	< 0.005	0.006 0.01*	< 10	250	500	1000	
Cu	< 0.01	< 0.01	0.001 0.005*	150.46 ± 45.14	750	1500	1500	
Cr	< 0.01	< 0.01	0.02 (Cr ⁶⁺) 0.07 (Cr ³⁺)	< 5	500	1000	2000	
Co	< 0.01	< 0.01	0.01 0.005*	8.58 ± 2.57	–	–	-	
Cd	< 0.0025	< 0.0025	0.005 0.01*	< 1	15	30	60	

Notes: MPC_{Fi} — maximum permissible concentration of pollutants in waters of water bodies of fishery importance; * — standard for sea water.
Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balyмова.

На следующем этапе оценили возможную миграцию ИТМ в процессе биочистки. Результаты исследований (табл. 4) показали, что поступающая на очистку сточная вода содержала значительные концентрации тяжелых металлов, наиболее значимые концентрации характерны для железа, марганца, цинка и никеля.

Максимальное накопление железа и марганца в биомассе наблюдается в анаэробной и аэробной зонах, резкое снижение содержания этих металлов в активном иле на выходе из аноксидной зоны (в 20–25 раз для железа) указывает на процессы высвобождения ИТМ, так как денитрифицирующие бактерии используют железо (III) и марганец (IV) как альтернативные акцепторы электронов, восстанавливая их до более подвижных форм (Fe^{2+} , Mn^{2+}). Концентрации в очищенной воде стабильны и близки к исходным, что свидетельствует о преобладании сорбционных механизмов удаления. Однако динамическое равновесие между сорбцией и десорбцией может привести к вторичному загрязнению при нарушении гидродинамического режима.

Цинк, никель и медь демонстрируют сходную динамику в процессе очистки с максимальной сорбцией в анаэробной зоне, снижением в аноксидной, повторным ростом в аэробной. Концентрации в очищенной воде находятся ниже пределов обнаружения для меди и никеля или близки к фоновым для цинка, что подтверждает высокую эффективность биосорбции, так как в аэробных условиях увеличивается продукция внеклеточных полисахаридов с высоким содержанием функциональных групп, способных к комплексообразованию. Доступность и содержание карбоксильных групп заметно влияет на связывание металлов и усиливается при уменьшении степени этерификации макромолекулы, при переходе от групп $-\text{COOCH}_3$ в группы $-\text{COOH}$ [15].

Концентрации свинца, кадмия, хрома и кобальта в сточной воде и активном иле во всех пробах находятся ниже пределов обнаружения методов атомно-абсорбционной спектроскопии. Это может свидетельствовать как о низком исходном содержании данных элементов в сточных водах предприятия, так и об их эффективном связывании на предшествующих стадиях очистки (механической, физико-химической).

Во вторичном отстойнике происходит гравитационное разделение фаз (активный ил и сточная вода), что обеспечивает концентрирование ИТМ в циркулирующем активном иле. Рецикл активного ила создает замкнутый цикл миграции металлов, повышая общую эффективность их улавливания. Избыточный ил, удаляемый из системы, представляет собой потенциальный источник вторичного загрязнения и требует специальных методов утилизации (стабилизация, термическая обработка, захоронение).

Коэффициент миграции металлов является важным показателем эффективности очистки сточных вод от тяжелых металлов. Изменение коэффициента миграции по зонам биологической очистки отражает различные механизмы связывания металлов в каждой зоне А2/О-процесса. Расчетный коэффициент миграции для железа (в качестве примера) по зонам биологической очистки представлен на рис. 2.

Таблица 4. Содержание тяжелых металлов в сточных водах и активном иле, отобранных с учетом гидродинамики процесса очистки

Проба		Концентрация, мг/дм³									
		Fe	Mn	Zn	Ni	Pb	Cu	Cr	Co	Cd	
Сточная вода на входе в анаэробную зону	СВ	0,43 ± 0,09	0,14 ± 0,03	0,066 ± 0,018	0,018 ± 0,001	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
	АИ	527,80 ± 158,34	975,25 ± 292,58	256,06 ± 76,82	49,98 ± 14,99	< 10	56,51 ± 16,95	< 5	< 5	< 1	
Рецикл активного ила со вторичных отстойников	СВ	0,34 ± 0,07	0,14 ± 0,03	0,053 ± 0,015	0,010 ± 0,004	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
	АИ	1974,20 ± 592,26	1195,96 ± 358,79	1026,89 ± 308,07	281,71 ± 84,51	< 10	157,57 ± 47,27	< 5	8,34 ± 2,502	< 1	
Анаэробная зона (середина)	СВ	0,31 ± 0,06	0,15 ± 0,03	0,072 ± 0,020	0,020 ± 0,006	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
	АИ	1974,20 ± 592,26	1195,96 ± 358,79	1026,89 ± 308,07	281,71 ± 84,51	< 10	157,57 ± 47,27	< 5	8,34 ± 2,502	< 1	
Аноксидная зона (вход, после смешения с внутренним рециклом)	СВ	0,10 ± 0,03	0,089 ± 0,025	0,052 ± 0,015	0,022 ± 0,006	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
	АИ	1454,87 ± 436,46	922,90 ± 276,87	219,38 ± 65,81	168,80 ± 50,64	< 10	150,71 ± 45,21	< 5	9,40 ± 2,82	< 1	
Аноксидная зона (выход)	СВ	0,12 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,049 ± 0,014	0,015 ± 0,004	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
	АИ	68,89 ± 20,67	516,92 ± 155,08	249,34 ± 74,80	55,33 ± 16,60	< 10	30,68 ± 9,20	< 5	< 5	< 1	
Оксидная зона (середина)	СВ	0,066 ± 0,018	0,12 ± 0,02	0,074 ± 0,021	0,019 ± 0,005	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
	АИ	1686,27 ± 505,88	2234,89 ± 670,47	852,61 ± 255,78	183,12 ± 54,94	< 10	150,46 ± 45,14	< 5	8,58 ± 2,57	< 1	
Оксидная зона (выход)	СВ	0,13 ± 0,03	0,12 ± 0,03	0,069 ± 0,019	< 0,01	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
	АИ	1478,59 ± 443,58	2029,56 ± 608,87	871,49 ± 261,45	196,68 ± 59,00	< 10	150,08 ± 45,02	< 5	8,36 ± 2,51	< 1	
Внутренний рецикл	СВ	0,15 ± 0,03	0,10 ± 0,02	0,088 ± 0,025	< 0,01	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	
	АИ	1055,03 ± 316,51	1114,28 ± 334,28	154,27 ± 46,28	159,50 ± 47,85	< 10	136,80 ± 41,04	< 5	6,49 ± 1,95	< 1	
Очищенная вода	СВ	0,13 ± 0,03	0,091 ± 0,025	0,080 ± 0,022	< 0,01	< 0,005	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0025	

Примечания: СВ — сточная вода; АИ — активный ил.
Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Бальмовой.

Table 4. Content of heavy metals in wastewater and activated sludge, selected taking into account the hydrodynamics of the treatment process

Sample		Concentration, mg/l									
		Fe	Mn	Zn	Ni	Pb	Cu	Cr	Co	Cd	
Wastewater entering the anaerobic zone	VW	0.43 ± 0.09	0.14 ± 0.03	0.066 ± 0.018	0.018 ± 0.001	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025	
	AS	527.80 ± 158.34	975.25 ± 292.58	256.06 ± 76.82	49.98 ± 14.99	< 10	56.51 ± 16.95	< 5	< 5	< 1	
Recycling of activated sludge from secondary settling tanks	VW	0.34 ± 0.07	0.14 ± 0.03	0.053 ± 0.015	0.010 ± 0.004	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025	
	AS	1974.20 ± 592.26	1195.96 ± 358.79	1026.89 ± 308.07	281.71 ± 84.51	< 10	157.57 ± 47.27	< 5	8.34 ± 2.502	< 1	
Anaerobic zone (middle)	VW	0.31 ± 0.06	0.15 ± 0.03	0.072 ± 0.020	0.020 ± 0.006	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025	
	AS	1974.20 ± 592.26	1195.96 ± 358.79	1026.89 ± 308.07	281.71 ± 84.51	< 10	157.57 ± 47.27	< 5	8.34 ± 2.502	< 1	
Anoxic zone (inlet, after mixing with internal recycle)	VW	0.10 ± 0.03	0.089 ± 0.025	0.052 ± 0.015	0.022 ± 0.006	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025	
	AS	1454.87 ± 436.46	922.90 ± 276.87	219.38 ± 65.81	168.80 ± 50.64	< 10	150.71 ± 45.21	< 5	9.40 ± 2.82	< 1	
Anoxic zone (exit)	VW	0.12 ± 0.02	0.11 ± 0.02	0.049 ± 0.014	0.015 ± 0.004	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025	
	AS	68.89 ± 20.67	516.92 ± 155.08	249.34 ± 74.80	55.33 ± 16.60	< 10	30.68 ± 9.20	< 5	< 5	< 1	
Oxide zone (middle)	VW	0.066 ± 0.018	0.12 ± 0.02	0.074 ± 0.021	0.019 ± 0.005	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025	
	AS	1686.27 ± 505.88	2234.89 ± 670.47	852.61 ± 255.78	183.12 ± 54.94	< 10	150.46 ± 45.14	< 5	8.58 ± 2.57	< 1	
Oxide zone (output)	VW	0.13 ± 0.03	0.12 ± 0.03	0.069 ± 0.019	< 0.01	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025	
	AS	1478.59 ± 443.58	2029.56 ± 608.87	871.49 ± 261.45	196.68 ± 59.00	< 10	150.08 ± 45.02	< 5	8.36 ± 2.51	< 1	
Internal recycling	VW	0.15 ± 0.03	0.10 ± 0.02	0.088 ± 0.025	< 0.01	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025	
	AS	1055.03 ± 316.51	1114.28 ± 334.28	154.27 ± 46.28	159.50 ± 47.85	< 10	136.80 ± 41.04	< 5	6.49 ± 1.95	< 1	
Treated wastewater	VW	0.13 ± 0.03	0.091 ± 0.025	0.080 ± 0.022	< 0.01	< 0.005	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.0025	

Notes: VW — wastewater, AS — activated sludge.
Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balymova.

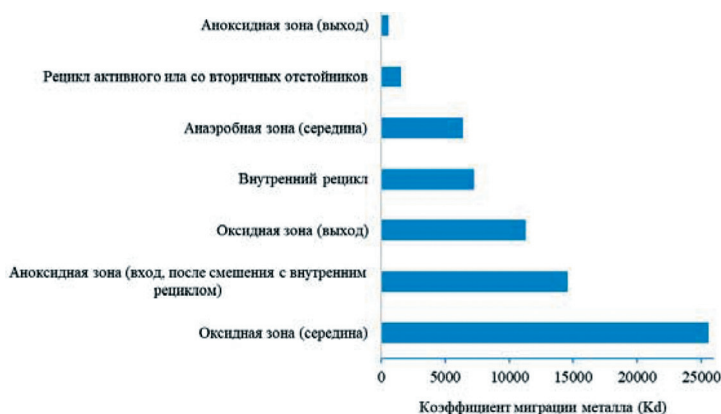


Рис. 2. Коэффициент миграции железа по зонам биологической очистки

Источник: составлено А.Р. Новиковой, Е.С. Балымовой.

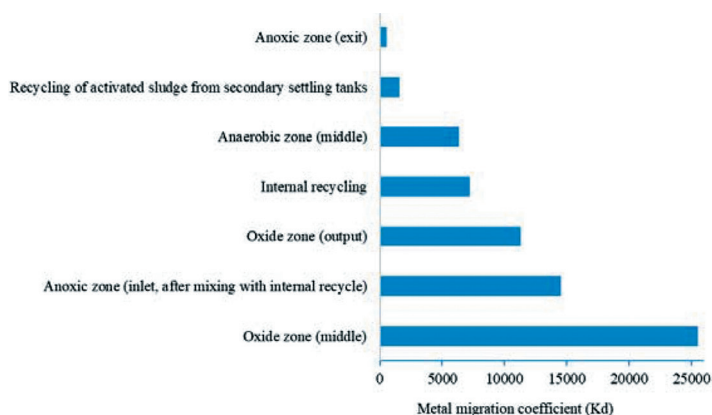


Figure 2. Iron migration coefficient by biological treatment zones

Source: compiled by A.R. Novikova, E.S. Balymova.

Высокие значения K_d свидетельствуют о преобладании процессов сорбции и иммобилизации металлов в биомассе ила, тогда как низкие значения указывают на переход металлов в растворенную форму. Можно отметить, что на выходе из аноксидной зоны происходит резкое падение K_d , это указывает на необходимость строгого контроля соотношения нитрат-ионов и органического субстрата для предотвращения вторичного загрязнения ИТМ. Оксидная зона обеспечивает наиболее надежное связывание железа, это подтверждают максимальные значения K_d . Потоки рецикла (внутренний рецикл и циркулирующий активный ил) являются буферной системой с умеренными значениями K_d , что свидетельствует о стабильности процесса и способности системы компенсировать локальные колебания.

Результаты экспериментальных исследований показывают, что система биологической очистки с реализованным А2/О-процессом является эффективной в удалении тяжелых металлов из сточных вод. Аноксидная зона играет ключевую роль в мобилизации металлов, а в оксидной зоне происходит свя-

зывание тяжелых металлов с экзополисахаридным матриксом активного ила. При сорбции тяжелых металлов возможно их накопление в концентрации, при которой они будут токсикантами для бактерий активного ила. В настоящее время эти концентрации не определены, что является скрытым риском для системы биологической очистки при рециркуляции ила с высоким содержанием ИТМ [14]. Накопление тяжелых металлов в биомассе также является потенциальным источником загрязнения окружающей природной среды, особенно в случае использования избыточного ила для рекультивации или в качестве удобрения.

Заключение

Оценено содержание ИТМ в активном иле и сточных водах в процессе водоочистки очистных сооружений с реализованным А2/О-процессом. Для свинца, кадмия и хрома характерны минимальные концентрации. Во всех пробах наибольшее содержание среди всех определяемых металлов характерно для железа, марганца и цинка.

Оценена миграция металлов в компонентах системы биологической очистки очистных сооружений с реализованным А2/О-процессом. Оксидная зона обеспечивает наиболее надежное связывание ионов железа (максимальные значения K_d).

Рекомендовано проводить мониторинг аноксидной зоны из-за риска вторичного загрязнения ИТМ, а также входной контроль токсичных микроэлементов (Pb, Cd, Cr), поскольку их присутствие даже в следовых количествах может ингибировать ключевые группы микроорганизмов (нитрификаторов, денитрификаторов).

Список литературы / References

- [1] Parray JA, Shameem N, Haghi AK. *Sustainable Urban Environment and Waste Management*. Singapore: Springer Nature; 2025. <https://doi.org/10.1007/978-981-96-1140-9> EDN: KHFЕНО
- [2] Hussain I, Majeed A, Al-Rawi SS, Ibrahim AH, Iqbal MA, Hanif A, Asad M, Ahmad F, Shahzadi A, Haider MT. From wastewater to sustainability: tackling heavy metal contamination in agriculture with conventional and AI techniques. *Chemistry Africa*. 2025;8(5):1743–1762. <http://doi.org/10.1007/s42250-025-01311-2> EDN: KHFЕНО
- [3] Tolkachev GYu, Korzhenevskiy BI, Kolomiitsev NV. Features of the study contamination of sediments by the trace elements. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2024;32(4):325–336. (In Russ.). <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-325-336> EDN: MSXQQH
 Толкачев Г.Ю., Корженевский Б.И., Коломийцев Н.В. Особенности изучения загрязнения микроэлементами донных отложений водных объектов // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2024. Т. 32. № 4. С. 325–336. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2024-32-4-325-336> EDN: MSXQQH

- [4] Rajan M, Karunanidhi D, Jaya J, Preethi B, Subramani T, Aravinthasamy P. A comprehensive review on human health hazards due to groundwater contamination: a global perspective. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2024;135:103637. <http://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103637> EDN: XHRLNM
- [5] Rule KL, Comber SDW, Ross D, Thornton A, Makropoulos CK, Rautiu R. Diffuse sources of heavy metals entering an urban wastewater catchment. *Chemosphere*. 2006;63(1):64–72. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.07.052> EDN: KIAAAB
- [6] Sachdev S, Ansari SA, Ansari MI, Fujita M, Hasanuzzaman M. Abiotic stress and reactive oxygen species: generation, signaling, and defense mechanisms. *Antioxidants*. 2021;10(2):277. <http://doi.org/10.3390/antiox10020277> EDN: ZNNXOM
- [7] Kaleem Z, Xu W, Ulhassan Z, Shahbaz H, He D, Naeem S, Ali S, Shah AM, Sheteiwy MS, Zhou W. Harnessing the potential of copper-based nanoparticles in mitigating abiotic and biotic stresses in crops. *Environmental Science and Pollution Research*. 2024;31:59727–59748. <http://doi.org/10.1007/s11356-024-35174-w> EDN: XLSEAU
- [8] Akhmadullina FYu, Balymova ES, Zakirov RK. New organizational principles of combined treatment of the electroplating industry wastewater. *Tsvetnye Metally*. 2019;10:85–91. (In Russ.) <http://doi.org/10.17580/tsm.2019.10.14> EDN: GTGYQO
Ахмадуллина Ф.Ю., Балымова Е.С., Закиров Р.К. Новые принципы организации комбинированной совместной очистки сточных вод гальванопроизводства // Цветные металлы. 2019. № 10. С. 85–91. <http://doi.org/10.17580/tsm.2019.10.14> EDN: GTGYQO
- [9] Ejaz U, Khan SM, Khalid N, Ahmad Z, Jehangir S, Rizvi ZF, Lho LH, Han H, Raposo A. Detoxifying the heavy metals: a multipronged study of tolerance strategies against heavy metals toxicity in plants. *Frontiers in Plant Science*. 2023;14:37251771. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1154571> EDN: TZJAJ5
- [10] Teplay GA. Heavy metals as a factor of environmental pollution (review). *Astrakhan Bulletin of Ecological Education*. 2013;(1):182–192. (In Russ.) EDN: PXNTRR
Теплая Г.А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) // Астраханский вестник экологического образования. 2013. № 1 (23). С. 182–192. EDN: PXNTRR
- [11] Ali H, Khan E, Ilahi I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*. 2019;2019:6730305. <http://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- [12] Guo H, Yao H-Y, Huang Qi-Qi, Li T, Show De-Ya, Ling M, Yan Yu-G, Show K-Ye, Lee D-J. Anaerobic-anoxic-oxic biological treatment of high-strength, highly recalcitrant polyphenylene sulfide wastewater. *Bioresource Technology*. 2023;371:128640. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128640> EDN: WXQJRJ
- [13] Kochanov MA, Ladonin DV. Determination of the content of mobile forms of heavy metals by atomic absorption spectrometry with various types of atomization. *RosAgrohimsluzhba: Pochvy. Udobreniya. Urozhaj*. 2025;5(5):18–22. (In Russ.) EDN: PDFFRM
Кочанов М.А., Ладонин Д.В. Определение содержания подвижных форм тяжелых металлов методами атомно-абсорбционной спектроскопии с различными типами атомизации // РосАгрохимслужба: Почвы. Удобрения. Урожай. 2025. № 5 (5). С. 18–22. EDN: PDFFRM
- [14] Zhmur NS. *Technological and biochemical processes for wastewater treatment at facilities with aeration tanks (Tekhnologicheskie i biokhimicheskie protsessy ochistki stochnykh vod na sooruzheniyakh s aerotenkami)*. Moscow: AKVAROS Publ.; 2003. (In Russ.) EDN: QNKHHB
Жмур Н.С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. Москва : АКВАРОС. 2003. 512 с. EDN: QNKHHB

- [15] Abarca-Cabrera L, Fraga-García P, Berensmeier S. Bio-nano interactions: binding proteins, polysaccharides, lipids and nucleic acids onto magnetic nanoparticles. *Biomaterials Research*. 2021;12(25):18. <https://doi.org/10.1186/s40824-021-00212-y>

Сведения об авторах:

Новикова Айгуль Рафаэлевна, аспирант кафедры промышленной биотехнологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Российская Федерация, 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68. E-mail: aignovikova@yandex.ru

Балымова Елена Сергеевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры промышленной биотехнологии, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Российская Федерация, 420015, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 68. ORCID: 0000-0002-4268-7600; eLIBRARY SPIN-код: 8906-5120. E-mail: ilc2013@inbox.ru

Bio notes:

Aigul R. Novikova, postgraduate student of Department of Industrial Biotechnology, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx St, Kazan, 420015, Russian Federation. E-mail: aignovikova@yandex.ru

Elena S. Balymova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Industrial Biotechnology, Kazan National Research Technological University, 68 Karl Marx St, Kazan, 420015, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-4268-7600; eLIBRARY SPIN-code: 8906-5120. E-mail: ilc2013@inbox.ru