

увеличение доли возобновляемой энергии в общем объеме энергопотребления центров обработки данных.

Цифровизация электроэнергетических объектов имеет огромный потенциал для повышения эффективности, надежности и устойчивости отрасли. Ее экологическое влияние заключается в сокращении площади энергетических объектов, повышении надежности энергоснабжения, снижении аварийности, оптимизации использования ресурсов, снижении потерь электроэнергии, увеличении эффективности загрузки источников питания и силового оборудования, что в конечном счете это приводит к оптимизации потерь и снижению затрат. Однако важно учитывать и негативные экологические последствия этого процесса. Внедрение мер по снижению негативного воздействия, таких как повышение энергоэффективности, использование возобновляемых источников энергии и рациональное использование водных ресурсов, позволит максимально реализовать преимущества цифровизации и обеспечить устойчивое развитие энергетической отрасли.

#### **Литература:**

1. Рябчинский М. Преимущества цифровизации объектов энергетики / М. Рябчинский // Control Engineering Россия. – Санкт-Петербург, 2021. – № 1. – С. 58 – 61.
2. Текслер, А. Л. Цифровизация энергетики: от автоматизации процессов к цифровой трансформации отрасли / А. Л. Текслер // Энергетическая политика. – Москва, 2018. – № 5. – С. 3 – 6.
3. Environmental impacts of substations: a short review / A. Jevtic [et al.] // Ecological Engineering and Environment Protection. – Sofia, 2024. – № 2. – P. 5 – 11.

УДК 631.423, 332.368

### **ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЯЖЁЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПОЧВ ПАРТИЗАНСКОГО И ЗАВОДСКОГО РАЙОНОВ ГОРОДА МИНСКА**

**Степанюк М.А., магистрант**

*Научный руководитель Цыганова А.А.*

*Белорусский национальный технический университет, Беларусь*

*В статье приводятся данные о загрязнении почв тяжёлыми металлами, полученные при использовании методов атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой и рентгенофлуоресцентного анализа в промышленных районах Минска. Результаты позволили проанализировать эффективность методов оценки уровня загрязнения городских почв и разработать рекомендации по их мониторингу и контролю.*

*Ключевые слова: тяжёлые металлы, загрязнение почв, атомно-эмиссионная спектроскопия, рентгенофлуоресцентный анализ, экологический мониторинг.*

В условиях интенсивной урбанизации и промышленного развития проблема загрязнения почв тяжёлыми металлами становится одной из наиболее актуальных экологических проблем. Город Минск, как крупный промышленный и транспортный узел, подвержен значительному воздействию антропогенных факторов, что приводит к накоплению в почвах тяжёлых металлов. Эти элементы обладают высокой токсичностью, способностью к биоаккумуляции и представляют серьёзную угрозу для экосистем и здоровья населения [1]. Партизанский и Заводской районы г. Минска являются одними из наиболее промышленно развитых, что делает их почвы особенно уязвимыми к загрязнению тяжёлыми металлами. Целью данного исследования является оценка уровня загрязнения почв этих районов и сравнение эффективности различных методов определения тяжёлых металлов для разработки рекомендаций по мониторингу и контролю состояния городских почв.

Современные методы инструментального элементного анализа, такие как рентгенофлуоресцентный анализ (РФА), атомно-абсорбционная спектрофотометрия (ААС), атомно-эмиссионная спектроскопия (АЭС) и масс-спектрометрия (МС) широко применяются для изучения элементного состава почв. Эти методы отличаются высокой точностью и чувствительностью, а приборная база для их реализации постоянно совершенствуется [2]. При анализе содержания тяжёлых металлов в почвах исследуемых районов использовались следующие методы:

1) Атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП). Этот метод позволяет одновременно определять широкий спектр элементов с высокой точностью и чувствительностью. Анализ проводился на спектрометре Thermo Fisher iCAP 6300 DUO.

2) Рентгенофлуоресцентный анализ (РФА). Данный метод был применён для экспресс-анализа содержания тяжёлых металлов в почвах. Его преимущество заключается в возможности быстрого определения концентраций элементов без необходимости сложной пробоподготовки. Анализ выполнялся на энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре Skyray Instrument EDX6000B.

Исследуемые образцы почвы, результаты анализа которых представлены в таблицах 1–2, отбирались с восьми пробных площадок:

- проба № 1.1 – ул. Долгобродская (около станции метро Тракторный завод);
- проба № 1.2 – ул. Долгобродская (мост около парка имени 50-летия Великого Октября);
- проба № 2.1 – ул. Филимонова (Запорожская площадь);
- проба № 2.2 – ул. Радиальная (около фабрики «Слодыч»);

- проба № 3.1 – ул. Радиальная (около станции метро Автозаводская);
- проба № 3.2 – пр-т Партизанский (около станции метро Могилёвская);
- проба № 4.1 – ул. Герасименко (около лесопарковой зоны);
- проба № 4.2 – ул. Байкальская (около МКАД).

Таблица 1 – Концентрация химических элементов в образцах почвы Партизанского района, г. Минска за сентябрь 2024 года

Метод атомно-эмиссионного анализа с индуктивно-связанной плазмой				Рентгенофлуоресцентный анализ		
Химический элемент	Проба № 1.1, мг/кг	Проба № 1.2, мг/кг	% СКО, проба №1	Проба № 1.1, мг/кг	Проба № 1.2, мг/кг	% СКО, проба №1
Cr	17,313	18,587	0,901	7,746	8,316	0,403
Pb	16,700	16,513	0,132	13,522	7,388	4,337
V	22,173	20,900	0,900	9,235	12,565	2,355
Zn	56,580	57,733	0,815	45,814	25,831	14,130
Ni	14,070	15,400	0,940	11,393	6,890	3,184
Cu	51,440	53,250	1,280	41,652	23,826	12,605
Химический элемент	Проба № 2.1, мг/кг	Проба № 2.2, мг/кг	% СКО, проба №2	Проба № 2.1, мг/кг	Проба № 2.2, мг/кг	% СКО, проба №2
Cr	5,8933	4,8400	0,745	0,000	0,000	0,000
Pb	7,4200	7,7800	0,255	0,000	0,000	0,000
V	10,947	13,820	2,032	0,000	0,000	0,000
Zn	19,820	25,393	3,941	16,049	20,561	3,190
Ni	2,700	4,260	1,103	0,000	0,000	0,000
Cu	3,770	3,650	0,085	0,000	0,000	0,000

Отбор проб проводился в соответствии с требованиями ТКП 17.03-02-2020. Каждая конечная (объединённая) проба составлялась не менее чем из пяти точечных проб, отобранных на одной пробной площадке. Точечные пробы отбирались методом конверта, при этом все точки отбора находились в пределах пробной площадки. Масса каждой объединённой пробы составляла не менее 1 кг. Точечные пробы отбирались с глубины 0–19,9 см массой не менее 200 г каждая, что соответствует верхнему гумусовому горизонту, наиболее подверженному загрязнению. При отборе проб и составлении объединённой пробы исключалась возможность вторичного загрязнения. Для отбора проб использовался инструмент, не содержащий металлов [3].

Для обоих методов каждый исследуемый образец предварительно высушивался до воздушно-сухого состояния при комнатной температуре в

течение суток. Затем, в соответствии с ISO 11464, образцы почвы подвергались дроблению и просеиванию через сито для получения фракции  $\leq 0,25$  мм.

При получении представительных аналитических проб с определённой массой применялся метод квартования. Дальнейшая пробоподготовка образцов почвы для каждого метода производилась индивидуально:

1) Для атомно-эмиссионного анализа с индуктивно-связанной плазмой использовался метод разложения царской водкой (ISO 22036, ISO 13657) с применением микроволновой экстракции в системе CEM MARS 5. Масса каждого гомогенизированного образца почвы составляла 0,5 г, что соответствует инструкции по безопасной эксплуатации.

2) Для рентгенофлуоресцентного анализа просеянные образцы массой 0,5 г прессовались в таблетки с использованием гидравлического пресса. С целью улучшения прочности материала в качестве связующего агента добавлялась борная кислота. Подготовленные таблетки помещались в спектрометр для проведения анализа. Регистрация спектров выполнялась в соответствии с настройками прибора, оптимизированными для определения тяжёлых металлов.

Таблица 2 – Концентрация химических элементов в образцах почвы Заводского района г. Минска за сентябрь 2024 года

Метод атомно-эмиссионного анализа с индуктивно-связанной плазмой				Рентгенофлуоресцентный анализ		
Химический элемент	Проба № 3.1, мг/кг	Проба № 3.2, мг/кг	% СКО, проба №3	Проба № 3.1, мг/кг	Проба № 3.2, мг/кг	% СКО, проба №3
Cr	40,793	33,033	5,487	18,252	14,780	2,455
Pb	17,060	14,360	1,909	8,814	10,425	1,139
V	34,820	26,693	5,746	17,273	12,729	3,213
Zn	104,56	105,36	0,566	84,664	85,312	0,458
Ni	1,150	2,630	1,047	0,000	0,000	0,000
Cu	57,14	46,29	7,672	46,267	37,482	6,212
Химический элемент	Проба № 4.1, мг/кг	Проба № 4.2, мг/кг	% СКО, проба №4	Проба № 4.1, мг/кг	Проба № 4.2, мг/кг	% СКО, проба №4
Cr	10,550	13,520	2,100	6,116	7,838	1,218
Pb	8,500	9,260	0,537	3,928	2,368	1,103
V	19,460	20,667	0,853	8,219	6,352	1,320
Zn	0,012	0,014	0,001	0,000	0,000	0,000
Ni	1,150	2,630	1,047	0,000	0,000	0,000
Cu	8,380	9,090	0,502	1,858	1,270	0,416

Для обеспечения максимальной точности и достоверности результатов в рамках каждого метода анализа проводилось трёхкратное измерение всех проб. На основе полученных данных рассчитаны средние арифметические значения и среднеквадратическое отклонение, которые представлены в таблицах 1–2. Такой подход позволил минимизировать влияние случайных погрешностей и повысить надёжность представленных результатов.

При сравнении методов анализа установлено, что атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП) демонстрирует более высокие концентрации элементов по сравнению с рентгенофлуоресцентным анализом (РФА). Это подтверждает более высокую точность и чувствительность метода АЭС-ИСП, особенно при определении низких концентраций элементов. Например, для цинка (Zn) в пробе № 1.2 метод АЭС-ИСП показал 57,733 мг/кг, тогда как РФА – 25,831 мг/кг.

На основании данных, полученных методом АЭС-ИСП, выявлено значительное загрязнение почв Партизанского и Заводского районов Минска тяжёлыми металлами. Наиболее высокие уровни загрязнения наблюдаются в промышленных зонах и вдоль транспортных магистралей, что связано с интенсивной промышленной деятельностью и высокой транспортной нагрузкой.

Установлено, что концентрации тяжёлых металлов в почвах Заводского района (ул. Радиальная, пр-т Партизанский) оказались выше, чем в Партизанском районе (ул. Долгобродская). В частности, концентрации цинка (Zn) выше в 1,84 раза, меди (Cu) – в 1,01 раза, хрома (Cr) – в 2,06 раза, ванадия (V) – в 1,43 раза, свинца (Pb) – в 0,95 раза. Однако для никеля (Ni) наблюдается обратная ситуация: в почвах Партизанского района (ул. Долгобродская) его концентрация в 7,8 раз выше, чем в Заводском районе (ул. Радиальная). В почвах, менее подверженных интенсивному антропогенному воздействию (ул. Герасименко, ул. Филимонова, ул. Байкальская), концентрации тяжёлых металлов были значительно ниже, чем в зонах с высокой промышленной и транспортной нагрузкой.

Таким образом, наибольшие концентрации загрязняющих элементов отмечены в Заводском районе, где промышленная активность наиболее интенсивна. В Партизанском районе уровни загрязнения ниже, но всё же превышают фоновые значения, особенно вблизи транспортных магистралей. Почвы Заводского района загрязнены сильнее, чем в Партизанском, что подчёркивает необходимость применения эффективных методов анализа. Сравнение методов анализа показало, что атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно-связанной плазмой обладает высокой чувствительностью, позволяя определять широкий спектр элементов, включая их низкие концентрации. В то же время рентгенофлуоресцентный анализ является более быстрым и экономичным методом для экспресс-анализа почв с высокой концентрацией

загрязнителей. Комплексное использование этих методов позволит не только выявлять текущий уровень загрязнения, но и своевременно принимать меры для минимизации негативного воздействия на экосистемы и здоровье населения.

### **Литература:**

1. Водяницкий, Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами / Ю. Н. Водяницкий, Д. В. Ладонин, А. Т. Савичев ; Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. – Москва : Типография Россельхозакадемии, 2012. – 304 с.
2. Землянкина, А. С. Комплексный подход к элементному анализу пробы с неизвестным составом / А. С. Землянкина, Д. А. Коркина, И. Л. Гринштейн // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – № 11. – С. 44–47.
3. Alloway, B. J. Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability / B. J. Alloway. – UK : Springer, 2020. – 597 p.

УДК 332.368

## **ПРОБЛЕМА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ ГОРОДА МИНСКА ТЯЖЁЛЫМИ МЕТАЛЛАМИ**

**Степанюк М.А., магистрант**

*Научный руководитель Цыганова А.А.*

*Белорусский национальный технический университет, Беларусь*

*В данной статье рассматривается проблема загрязнения почв тяжелыми металлами как одна из ключевых экологических угроз современного общества. Проанализированы основные источники поступления тяжелых металлов в почвы города Минска и их негативное влияние на экосистемы. Предлагаются меры по снижению уровня загрязнения.*

*Ключевые слова: загрязнение почв, тяжелые металлы, металлоиды, антропогенная нагрузка, мониторинг почв, источники загрязнения территории.*

Современное общество сталкивается с различными экологическими угрозами, среди которых загрязнение почв тяжелыми металлами занимает одно из ведущих мест. Увеличение антропогенной нагрузки на городские территории приводит к накоплению токсичных элементов, что в свою очередь негативно влияет на здоровье населения и состояние экосистем. Эффективное определение концентрации тяжелых металлов в почвах является важной задачей для обеспечения экологической безопасности и устойчивого развития городов. На сегодняшний день исследователи всё чаще проводят совместное изучение тяжелых металлов и металлоидов в почвах, объединяя их в одну группу, которая охватывает 58 химических элементов периодической системы Д.И. Менделеева с атомной массой свыше 50. Наиболее распространенными тяжелыми металлами являются: Pb, Cd, Hg, Cu, Zn, Sn, V, Cr, Mo, Mn, Ni, а из металлоидов