



Научная статья

УДК 543.421

DOI: 10.52957/2782-1900-2024-5-3-44-53

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЧВ МЕТОДОМ АТОМНО-АБСОРБЦИОННОЙ СПЕКТРОМЕТРИИ НА СОДЕРЖАНИЕ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ (Zn, Pb, Cd, Cu)

А. И. Костоева, А. Я. Евлоева, А. Г. Акталиева

Ашура Ибрагимовна Костоева, старший преподаватель; Аза Якубовна Евлоева, старший преподаватель; Айна Гаруновна Акталиева, канд. хим. наук, доцент  
Ингушский государственный университет, Магас, Россия  
ashura.kostoeva@mail.ru; azaevlo@gmail.com; ajnaaktalieva889@qmail.com

---

**Ключевые слова:**

тяжелые металлы, загрязнение почвы, ПДК, ОДК, атомно-абсорбционный спектрометр, методика, исследования

**Аннотация.**

Изучены источники загрязнения почв тяжелыми металлами и их влияние на окружающую среду и на здоровье человека. Для оценки содержания тяжелых металлов в почвах на территории города Сунжа вблизи Федеральной трассы «Кавказ» 589км, проведен анализ содержания их кислоторастворимых форм. На основании полученных результатов сделаны выводы о степени загрязнения ими в выбранных объектах.

---

**Для цитирования:**

Костоева А.И., Евлоева А.Я., Акталиева А.Г. Исследование почв методом атомно-абсорбционной спектрометрии на содержание тяжелых металлов (Zn, Pb, Cd, Cu) // От химии к технологии шаг за шагом. 2024. Т. 5, вып. 2. С. 44-53. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/5357/view>

### Введение

В настоящее время важнейшим источником загрязнения окружающей среды являются ионы тяжелых металлов, содержащиеся в промышленных сточных водах предприятий различных отраслей промышленности, включая химическую, нефтехимическую, горнодобывающую и др. Тяжелые металлы способны накапливаться в окружающей среде, поскольку, в отличие от органических загрязнителей, не разлагаются микроорганизмами. Высокое содержание тяжелых металлов в объектах экосистемы, таких как растения, водоемы, почва, способствуют их накоплению в питьевой воде, пищевом сырье и продуктах питания, с которыми они попадают в организм человека, тем самым нанося серьезный вред здоровью [1-2].

Токсическое действие тяжелых металлов носит неспецифический характер, они способны соединяться с белками, нуклеотидами, коферментами, фосфолипидами, т.е. практически со всеми типами веществ, участвующими в метаболизме клеток [3].

Одним из сильнейших по действию и наиболее распространенным химическим загрязнением является загрязнение тяжелыми металлами. К тяжелым металлам относятся более 40 химических элементов периодической системы Д.И. Менделеева,



масса атомов которых составляет свыше 50 атомных единиц. Эта группа элементов активно участвует в биологических процессах, входя в состав многих ферментов. Группа «тяжелых металлов» во многом совпадает с понятием «микроэлементы».

Тяжелые металлы поступают в окружающую среду в ходе работы автотранспорта, а также при истирании дорожного покрытия. В результате выбросов выхлопных газов из автомобильных двигателей атмосфера обогащается рассеянным свинцом, кадмием, цинком, железом и другими металлами, оседающими на поверхность почвы в придорожной зоне.

В состав выхлопных газов входят угарный газ, оксиды азота и серы, углеводороды, соединения тяжелых металлов – вещества, чрезвычайно токсичные для живых организмов. Эти вещества вовлекаются в круговорот веществ, попадают в организмы растений, животных и человека [4].

Тяжелые металлы уже сейчас занимают второе место по степени опасности, уступая пестицидам и значительно опережая такие известные загрязнители, как двуокись углерода и серы. В перспективе они могут стать более опасными, чем отходы атомных электростанций и твердые отходы. Загрязнение тяжелыми металлами связано с их широким использованием в промышленном производстве. В связи с несовершенными системами очистки тяжелые металлы попадают в окружающую среду, в том числе в почву, загрязняя и отравляя ее.

В настоящее время в России для оценки загрязнения почв тяжелыми металлами используются как официально одобренные, так и не имеющие официального статуса нормативы. Основное их назначение – не допустить поступления в избыточном количестве антропогенно накапливающихся в почве твердых металлов в организм человека и тем самым избежать их негативного влияния. Тяжелые металлы не только негативно влияют на растения и на почвенно-грунтовые воды, но и на саму почву. Особенно восприимчивы к воздействию тяжелых элементов почвенные микроорганизмы, возможны также ухудшение фосфатного режима и потеря гумуса [5-7].

Исследование почвенного покрова на содержание тяжелых металлов имеет большое практическое значение. Так как тяжелые металлы могут носить негативный характер, необходимо, чтобы их содержание входило в ПДК. Полученные данные могут стать основой для мониторинговых исследований и комплексной оценки почвенного покрова. Также результаты исследования могут послужить основой и для плана работ по снижению концентрации тяжелых металлов.

Цель работы – определить влияние автотранспорта на почвенный состав пахотных земель. Для этого выбран участок земли, расположенный на территории города Сунжа вблизи Федеральной трассы «Кавказ», 589 км. Необходимо выявить содержание ионов тяжелых металлов (Zn, Cd, Pb и Cu) в почве методом атомно-абсорбционной спектроскопии.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Изучить принцип работы атомно-абсорбционного спектрометра с электротермической атомизацией «КВАНТ.Z».
- 2) Определить концентрацию каждого тяжелого металла (Zn, Pb, Cd, Cu) в образцах почв, взятых на расстоянии 5, 10 и 15 метров от автомобильной дороги.
- 3) Оценить степень загрязненности выбранного объекта.



## **Источники загрязнения почв тяжелыми металлами и их влияние на окружающую среду и на здоровье человека**

Загрязнение – это все то, что появляется не в том месте, не в то время и не в том количестве, какое неестественно для природы, что выводит ее системы из равновесия, отличается от нормы. Загрязнения подразделяются на природные (вызванные естественными причинами) и антропогенные (связанные с деятельностью человека). Непосредственными объектами загрязнения служат атмосфера, вода, почва. Косвенными объектами загрязнения оказываются растения, животные, микроорганизмы, человек [5-6].

Химическое загрязнение – увеличение количества химических компонентов определенной среды, а также проникновение (введение) в нее химических веществ в концентрациях, превышающих норму или не свойственных ей. Химические загрязнения относятся к наиболее часто реализуемому виду загрязнений, производимых вследствие многообразной хозяйственной деятельности человека. Агенты химических загрязнений включают в себя широкий спектр химических соединений. По данным Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), таких соединений около 500 тыс., из которых около 40 тыс. – вредные вещества и около 12 тыс. – токсичные [4, 6].

Загрязнение тяжелыми металлами может повлиять на всю окружающую среду, но серьезная экологическая проблема и самые длительные последствия человеческой деятельности – загрязнение почв. Накопление тяжелых металлов в почве происходит в результате добычи, плавки металлических руд, промышленных выбросов и применения пестицидов, гербицидов и удобрений. Металлы, такие как Cd, Cu, Pb, Zn и металлоиды (например, As), считаются загрязнителями окружающей среды ввиду их стойкости, биоаккумулятивности и способности оказывать серьезное негативное воздействие на здоровье человека и окружающую среду [7].

Валовое содержание тяжелых металлов в естественных незагрязненных почвах обусловлено их концентрацией в исходной материнской породе и находится под влиянием почвообразовательных процессов и почвенных характеристик, таких как содержание органического вещества, реакция среды, гранулометрический состав. Однако уровень тяжелых металлов в настоящее время изменен под влиянием антропогенного фактора. В пределах городских территорий почвы подвергаются химическому, биологическому и радиоактивному загрязнению [8]. Особое внимание в оценке химического загрязнения почв уделяется загрязнению тяжелыми металлами и органическими токсикантами. Тяжелые металлы относятся к приоритетным загрязняющим веществам, наблюдения за которыми обязательны во всех средах.

Основным показателем, характеризующим воздействие загрязняющих веществ на окружающую природную среду, являются предельно допустимая концентрация (ПДК). С позиции экологии предельно допустимые концентрации конкретного вещества представляют собой верхние пределы лимитирующих факторов среды (в частности, химических соединений), при которых их содержание не выходит за допустимые границы экологической ниши человека.



Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов в почвах с различными физико-химическими свойствами (валовое содержание, мг/кг) (дополнение к №1 к перечню ПДК и ОДК №6229-91) для определяемых элементов следующие: для почв, близких к нейтральным (суглинистые и глинистые) **Zn** - 220 мг/кг; **Cd** - 2,0 мг/кг; **Pb** - 130 мг/кг; **Cu** - 132 мг/кг [18].

От автотрасс в почву поступают свинец, кадмий, железо, никель, цинк, марганец и другие элементы. Свинец – первый элемент, который необходимо рассматривать при оценке влияния транспорта на состояние почв. Широкое использование в качестве добавки к бензину тетраэтилсвинца приводит к тому, что при его сгорании около 75 % содержащегося в бензине свинца выделяется в виде аэрозоля и рассеивается в воздухе [8].

**Свинец.** Наиболее серьезным источником загрязнения среды обитания организмов свинцом являются выхлопы автомобильных двигателей. Антидетонатор тетраметил – или тетраэтилсвинец – добавляют к большинству бензинов, начиная с 1923 г., в количестве около 80 мг/л. При движении автомобиля от 25 до 75 % этого свинца в зависимости от условий движения выбрасывается в атмосферу. Свинец не является жизненно необходимым элементом. Он токсичен и относится к I классу опасности. Его неорганические соединения нарушают обмен веществ и являются ингибиторами ферментов (подобно большинству тяжелых металлов), блокируют –SH группы белков, вызывают отравления, поражения нервной системы.

**Кадмий и цинк.** Кадмий, цинк и медь являются наиболее важными металлами при изучении проблемы загрязнений, так как они широко распространены в мире и обладают токсичными свойствами. Кадмий и цинк (так же как свинец и ртуть) обнаружены в основном в сульфидных осадках [5, 8, 9]. В результате атмосферных процессов эти элементы легко попадают в океаны. Кадмий обладает относительно высокой летучестью, поэтому он легко проникает в атмосферу. Источники загрязнения атмосферы цинком те же, что и кадмием. Цинк наименее токсичен из всех вышеперечисленных тяжелых металлов. Тем не менее все элементы становятся токсичными, если попадают в избытке; цинк не является исключением. Кадмий намного токсичнее цинка. Он и его соединения относятся к I классу опасности. Он проникает в человеческий организм в течение продолжительного периода, блокирует сульфгидридные группы ферментов, нарушает обмен железа и кальция, а также синтез ДНК. Вдыхание воздуха в течение 8 часов при концентрации кадмия 5 мг/м<sup>3</sup> может привести к смерти [9, 18].

**Медь.** Медь обнаруживают в сульфидных осадках вместе со свинцом, кадмием и цинком. Она присутствует в небольших количествах в цинковых концентратах и может переноситься на большие расстояния с воздухом и водой. Поглощение больших количеств меди человеком приводит к болезни Вильсона, при этом избыток меди откладывается в мозговой ткани, коже, печени, поджелудочной железе. Особенности действия меди на организм: повышает клеточную проницаемость, ингибирует глутатион-редуктазу, нарушает метаболизм, взаимодействуя с –SH, NH<sub>2</sub>, и COOH-группами [8-9].



### Экспериментальная часть

В данной работе для проведения анализа на содержание металлов в растворах почвенных вытяжек был применен атомно-абсорбционный спектрометр «КВАНТ-Z». Спектрометр атомно-абсорбционный «КВАНТ.Z» предназначен для проведения количественного элементного анализа жидких проб различного происхождения и состава. Принцип действия спектрометров основан на методе электротермической атомно-абсорбционной (АА) спектрометрии [16]. Анализируемая проба испаряется в графитовой трубчатой печи, нагреваемой электрическим током. Свободные атомы определяемого элемента поглощают резонансное излучение, причем максимальное поглощение происходит на аналитической резонансной спектральной линии, которая обычно используется для АА измерений. Графитовая печь располагается в продольном переменном магнитном поле [13-14].

Атомно-абсорбционная спектрофотометрия (ААС) позволяет определять валовое содержание Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na, Mn, Ti в почвах, многих биологически важных микроэлементов (валовое содержание и подвижные формы) - Zn, Cu, Co, Ni, Cr, V и др. Этим методом можно определить обменные основания и емкость поглощения, исследовать состав и количество водорастворимых катионов в почве [15]. Основными особенностями являются универсальность и селективность. Анализатор, благодаря своей высокой селективности, позволяет определять содержание широкого круга элементов в пробах самого разного состава – без или с минимальной пробоподготовкой. ААС с ЭТА (с электротермической атомизацией) и корректором неселективного поглощения во всем мире признан в качестве референтного метода при определении малых содержаний элементов в пробах сложного состава. Управление процессом измерения и обработка полученной информации производится с помощью компьютера с установленным программным обеспечением.

### Определение Zn, Cd, Pb и Cu методом атомно-абсорбционной спектрометрии

Метод атомно-абсорбционного спектрального анализа основан на явлении поглощения резонансного излучения свободными атомами элемента. Для каждого элемента существуют определенные разрешенные состояния – энергетические уровни. Следовательно, для каждого элемента существуют определенные длины волн излучения и поглощения [14].

В АА измерении используются резонансные линии, соответствующие переходам атомов с невозбужденного уровня на возбужденные уровни. Перевод пробы в состояние атомного пара производится в аналитической ячейке (графитовой трубчатой печи) электротермического атомизатора, нагреваемой до температуры атомизации определяемого элемента по специальной температурно-временной программе, включающей выпаривание пробы до сухого остатка, его озоление и атомизацию, сопровождающуюся измерением абсорбционности металла на его резонансной спектральной линии, излучаемой соответствующей лампой с полым катодом [13,17]. Условия проведения измерений на атомно-абсорбционном спектрофотометре с атомизацией в графитовой кювете для Zn, Cd, Pb и Cu приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Условия проведения анализа

Элемент	Длина волны, нм	Ширина щели, нм	Температура озоления, °С	Температура атомизации, °С
Cd	228,8	0,2	800	1400
Cu	324,8	0,7	1200	2400
Pb	283,3	0,2	1300	2200
Zn	213,9	0,2	700	1600

## Основные этапы проведения исследования

### 1. Приготовление градуировочных растворов

Рабочие градуировочные растворы готовят в мерных колбах последовательным разбавлением. Для разбавления применяют азотную кислоту с массовой концентрацией 0,1 моль/дм<sup>3</sup>.

При приготовлении рабочих градуировочных растворов берем раствор основного объема (Zn - 1,0 мг/дм<sup>3</sup>, Pb - 1.0 мг/дм<sup>3</sup>, Cu - 0.50 мг/дм<sup>3</sup>, Cd - 0.50 мг/дм<sup>3</sup>) в мерные колбы 100 см<sup>3</sup> и доводим до метки азотной кислотой с массовой концентрацией 0,1 моль/дм<sup>3</sup>, и тщательно перемешиваем. Азотную кислоту с концентрацией 0,1 моль/дм<sup>3</sup> используют как фоновый раствор при установлении градуировочной характеристики.

В мерные колбы с градуировочными растворами добавляют концентрированную серную кислоту из расчета 0,5 см<sup>3</sup> на 10 см<sup>3</sup> градуировочного раствора.

Приготовление рабочих градуировочных растворов для анализа почв проводится в соответствии с табл. 2.

**Таблица 2.** Значения рабочих градуировочных растворов для анализа почв

Наименование металла	Массовая концентрация исходного раствора, мг/дм <sup>3</sup>	Отбираемый объем промежуточного раствора, мм				
		Номер рабочего градуировочного раствора				
		1	2	3	4	5
Медь, свинец, цинк	2,0	20	50	100	200	400
Кадмий	0,5	4	10	20	40	80

Указанные в табл. 3 объемы промежуточных растворов кадмия, меди, свинца и цинка с массовой концентрацией 2,0 и 0,5 мг/дм<sup>3</sup> отбирают с помощью дозаторов типа ДПВ-1 со сменными наконечниками и вносят в мерные колбы соответствующих вместимостей, доводят до метки фоновым раствором и перемешивают.

Для холостого измерения концентраций металлов в почвах навеску анализируемой пробы массой 2 г помещают в стеклянный стакан, приливают 10 см<sup>3</sup> азотной кислоты с молярной концентрацией 0,5 моль/дм<sup>3</sup>, перемешивают и нагревают смесь при температуре 90 °С. Затем отфильтровывают пробу через бумажный фильтр в мерную колбу на 100 см<sup>3</sup> и доводят объем раствора до метки бидистиллированной водой.

### 2. Подготовка пробы к анализу

Перед измерением концентрации металла в пробирку Эппендорфа вместимостью 2,0 см<sup>3</sup> вносят дозатором типа ДПВ-1 раствор соответствующего модификатора (для кадмия, меди и свинца по 20 мкг/см<sup>3</sup> Pd, а для цинка 100 мкг/см<sup>3</sup> Mg) и доводят объем до метки подготовленной холостой пробой и перемешивают. Пересчитывают на среднее



содержание металла в одном фильтре. Это значение вычитают из результатов, полученных при анализе проб растворов.

### 3. Подготовка ААС с электротермической атомизацией

ААС готовят к работе для измерения массовых концентраций металлов в соответствии с руководством по эксплуатации ААС.

Дозирование пробы в графитовую кювету дозатором типа ДПВ-1 и температурно-временная программа нагрева атомизатора ААС для измерения массовой концентрации металлов выбираются также в соответствии с программой ААС [15, 16].

То есть программа автоматически устанавливает необходимую температуру и время проведения измерения для каждого металла соответственно.

### 4. Установление градуировочных зависимостей

Выполняют три измерения при атомизации градуировочного образца с нулевой концентрацией иона металла (холостая проба) и не менее трех измерений при атомизации градуировочных образцов в порядке возрастания их концентраций.

По полученным средним значениям аналитического сигнала холостой пробы и градуировочных образцов по программе обработки данных ААС рассчитываются градуировочные зависимости для каждого металла методом наименьших квадратов в координатах: концентрация металла в  $\text{мкг/дм}^3$  – величина аналитического сигнала в единицах абсорбционности.

### 5. Порядок выполнения измерений

Для выполнения измерений на ААС приготовленный раствор дозируют в графитовую печь и выполняют измерение массовой концентрации каждого металла по соответствующей программе ААС. Повторяют измерение и значения массовой концентрации металла усредняют, если расхождение между ними не превышает величины предела повторяемости.

Затем по градуировочной характеристике находят значение массовой концентрации определяемого элемента в анализируемых и холостом растворах по среднему значению выходного сигнала.

Значение массовой концентрации элемента в растворах ( $C_{m1}$ ,  $C_{m2}$  – параллельные определения и  $C_x$ ) при использовании программного обеспечения прибора указывается автоматически.

Вычисляют среднее значение массовой доли элемента для двух определений ( $\bar{X}^{ААС}$ ) по формуле:

$$\bar{X}^{ААС} = \frac{X^{ААС_1} + X^{ААС_2}}{2} \quad (1)$$

и проверяют приемлемость результатов параллельных определений по условию:

$$\frac{X^{ААС_1} - X^{ААС_2}}{\bar{X}^{ААС}} \cdot 100 \leq d, \quad (2)$$

где  $d$  - норматив (предел повторяемости результатов параллельных определений);  $d = 30\%$  [16].



## Результаты анализа

Полученные в ходе анализа числовые значения концентраций металлов, содержащихся в пробах почв, взятых на расстоянии 5, 10 и 15 метров от дороги, указаны в табл. 3.

**Таблица 3.** Числовые значения концентрации определяемых металлов в образцах почв

<b>Числовые значения концентраций металлов в образце почвы, отобранной на расстоянии 5 метров от дороги</b>			
Наименование металла	Значение холостой пробы	Наиболее близкие значения	Среднее арифметическое значение
Cu	0,069	0,264±0,395	0,330
Pb	0,160	0,690±0,520	0,605
Cd	0,013	0,035±0,010	0,027
Zn	0,046	0,680±0,557	0,619

<b>Числовые значения концентраций металлов в образце почвы, отобранной на расстоянии 10 метров от дороги</b>			
Наименование металла	Значение холостой пробы	Наиболее близкие значения	Среднее арифметическое значение
Cu	0,069	0,270±0,341	0,306
Pb	0,160	0,645±0,523	0,584
Cd	0,013	0,019±0,024	0,021
Zn	0,046	0,462±0,414	0,438

<b>Числовые значения концентраций металлов в образце почвы, отобранной на расстоянии 15 метров от дороги</b>			
Наименование металла	Значение холостой пробы	Наиболее близкие значения	Среднее арифметическое значение
Cu	0,044	0,283±0,305	0,294
Pb	0,105	0,525±0,498	0,517
Cd	0,023	0,011±0,013	0,012
Zn	0,031	0,423±0,460	0,428

Последним действием с помощью формул 1 и 2 вычислены полученные числовые значения, указанные в таблицах выше, и получены следующие округленные средние значения для каждого отдельного металла (табл. 4).

**Таблица 4.** Средние значения массовой доли определяемых металлов

Металлы, содержащиеся в пробах почв на расстоянии 5 метров от дороги	Среднее значение, вычисленное по формулам 1 и 2	Металлы, содержащиеся в пробах почв на расстоянии 10 метров от дороги	Среднее значение, вычисленное по формулам 1 и 2	Металлы, содержащиеся в пробах почв на расстоянии 15 метров от дороги	Среднее значение, вычисленное по формулам 1 и 2
Cu	39,7	Cu	23,2	Cu	7,5
Pb	28,1	Pb	20,9	Pb	5,2
Cd	59,3	Cd	23,8	Cd	16,7
Zn	19,9	Zn	10,9	Zn	8,3



В результате проведения анализа на атомно-абсорбционном спектрометре было обнаружено, что в пробах почв, расположенных ближе к автотранспортной дороге (на расстоянии 5 метров) содержание металлов больше, чем в пробах почв, находящихся на расстоянии 10 и 15 метров от дороги. По сравнению с ориентировочно допустимыми концентрациями (ОДК) и предельно-допустимыми концентрациями (ПДК) показатели не превышают значения допустимых концентраций (перечень ПДК и ОДК №6229-91 [17]), но важно сделать вывод о том, что автотранспорт оказывает сильное влияние на загрязнение почв, расположенных вблизи автодороги.

Более наглядно результаты лабораторных анализов методом атомно-абсорбционной спектрометрии представлены на рис. 1.

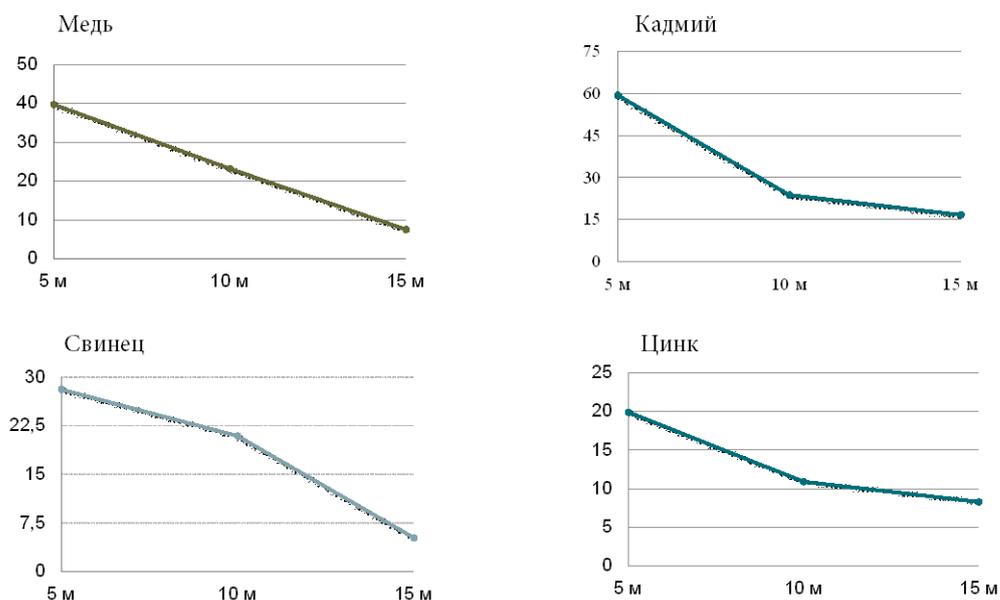


Рис. 1. Значение результатов лабораторных анализов методом атомно-абсорбционной спектрометрии

### Заключение

При современном развитии автомобильной промышленности и постоянном росте числа автомобилей отрицательное воздействие автотранспорта на окружающую среду и человека ощущается все более остро, что приводит к необходимости детального изучения всех аспектов этого вопроса, разработки системы мониторинга и поиска решений по минимизации вредного влияния.

Повышение осведомленности и внимание к данной проблеме необходимы, чтобы обеспечить безопасное окружающее пространство и сохранить здоровье будущих поколений.

### Список источников

1. Никифорова Т.Е., Вокурова Д.А., Софронов А.Р. Извлечение ионов меди сорбентом на основе льняного волокна, модифицированного L-аргинином // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2022. Т. 3, вып. 3. С. 17-26. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/5031/view> (дата обращения 03.07.2024).



2. **Vardhan K.H., Kumar P.S., Panda R.C.** A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: current trends and future perspectives // *J. Mol. Liq.* 2019. Vol. 290. 111197. DOI: 10.1016/j.molliq.2019.111197.
3. **Lindholm-Lehto P.** Biosorption of heavy metals by lignocellulosic biomass and chemical analysis // *BioRes.* 2019. Vol. 14(2). Pp. 4952–4995. DOI: 10.15376/biores.14.2.Lindholm-Lehto.
4. **Водяницкий Ю.Н.** Природные и техногенные соединения тяжелых металлов в почвах // *Почвоведение.* 2014. №4. С. 1-131. DOI: 10.7868/S0032180X14040108.
5. Техногенное загрязнение природной среды: [сайт]. URL: <https://studfile.net/preview/7615608/page:9/> (дата обращения 03.07.2024).
6. **Водяницкий Ю.Н.** Загрязнение почв тяжелыми металлами и металлоидами и их экологическая опасность (аналитический обзор) // *Почвоведение.* 2013. №7. С. 872. DOI: 10.7868/S0032180X13050171
7. **Болтунова А.Д., Смирнова С.В., Солтис В.В.** Накопление тяжелых металлов в почвах под влиянием промышленного производства // *Современные проблемы науки и образования.* 2017. № 4. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=26637> (дата обращения 03.07.2024).
8. **Ладонин, Д.В.** Соединения тяжелых металлов в почвах - проблемы и методы изучения // *Почвоведение.* 2002. №6. С. 682-692.
9. **Сердюкова. А.Ф., Барабанщиков Д.А.** Последствия загрязнения почвы тяжелыми металлами // *Молодой ученый.* 2017. № 51 (185). С. 131-135. URL: <https://moluch.ru/archive/185/47382/>
10. **Водяницкий Ю.Н., Ладонин Д.В., Савичев А.Т.** Загрязнение почв тяжелыми металлами. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. – М.: Типография Россельхозакадемии, 2012. – 304 с.
11. **Минкина Т.М., Могузова Г.В., Назаренко О.Г.** Состав соединений тяжелых металлов в почвах. - Ростов-на-Дону: Южный федер. ун-т, 2009. – 208 с.
12. **Кошелева Н.Е., Касимов Н.С., Власов Д.В.** Факторы накопления тяжелых металлов и металлоидов на геохимических барьерах в городских почвах // *Почвоведение.* 2015. №5. С. 536-553.
13. **Ермаченко Л.А., Ермаченко В.М.** Атомно-абсорбционный анализ с графитовой печью: Методическое пособие для практического использования в санитарно-гигиенических исследованиях М.: ПАИМС, 1999. 220 с.
14. **Громовик А.И., Йонко О.А.** Современные инструментальные методы в почвоведении. Теория и практика. Воронеж, 2010. – 60 с.
15. **Пупышев А.А.** Атомно-абсорбционный спектральный анализ. – М.: Техносфера., 2009. - 782 с.
16. Спектрометр атомно-абсорбционный «КВАНТ.Z» Руководство по эксплуатации ГКНЖ.84.000.000 РЭ, Москва, 2019.
17. РД 52.24.535-2019. Руководящий документ. Массовая доля кадмия, кобальта, свинца и хрома в донных отложениях. Методика измерений атомно-абсорбционным методом с использованием микроволновой обработки проб (введен в действие Приказом Росгидромета от 25.06.2019 N 296).
18. Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» (с изменениями на 30 декабря 2022 года).

Поступила в редакцию 18.07.2024

Одобрена после рецензирования 30.08.2024

Принята к опубликованию 04.09.2024