

ПРОГНОЗ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ЦВЕТНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ ДЛЯ РАСЧЕТА РИСКОВ ЗДОРОВЬЮ НАСЕЛЕНИЯ

И. З. Каманина¹, С.П. Каплина², О.А. Макаров³, Любимова А.В.⁴

¹ Доцент, университет «Дубна, Дубна, Россия, kmanina@uni-dubna.ru

² Доцент, университет «Дубна, Дубна, Россия, sv_kar@mail.ru

³ Профессор, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия, oa_makarov@mail.ru

⁴ Доцент, университет «Дубна, Дубна, Россия, anna_lioubimova@mail.ru

Аннотация

Дана оценка пространственного загрязнения почв г. Кольчугино Владимирской области тяжелыми металлами 1 и 2-го классов опасности (Cd, Pb, Zn, Cu). Максимальные превышения установленных ПДК составили: 11,8 ПДК меди, 6 ПДК свинца, 4 ПДК кадмия, 3,5 ПДК цинка. Прогноз химического загрязнения почв г. Кольчугино выполнялся с использованием балансовой модели, основанной на оценке потоков поступления, выноса и аккумуляции загрязняющих веществ, поступающих с атмосферными выпадениями. Расчеты показали, что установленный уровень загрязнения почв тяжелыми металлами, связан в первую очередь с прошлой хозяйственной деятельностью предприятий цветной металлургии. По результатам химического загрязнения почв, как базового компонента городских экосистем проведена оценка уровня риска для здоровья населения г. Кольчугино. На большей части территории г. Кольчугино суммарный канцерогенный риск для здоровья взрослого населения от загрязнения почв города тяжелыми металлами находится на уровне неприемлемого. Опасность представляет ингаляционное поступление свинца и кадмия.

Ключевые слова: почва, тяжёлые металлы, загрязнение, окружающая среда, город, риск здоровью человека.

FORECAST OF SOIL POLLUTION IN THE INFLUENCE ZONE OF NON-FERROUS METALLURGY ENTERPRISES FOR CALCULATION OF PUBLIC HEALTH RISKS

I.Z. Kamanina, S.P. Kaplina, O.A. Makarov, A.V. Lubimova

Abstract

The assessment of spatial soil contamination of the city of Kolchugino, Vladimir region, with heavy metals of the 1st and 2nd hazard classes (Cd, Pb, Zn, Cu) is given. The maximum exceedances of the established MPC were: 11.8 MPC of copper, 6 MPC of lead, 4 MPC of cadmium, 3.5 MPC of zinc. The forecast of chemical contamination of soils in Kolchugino was carried out using a balance model based on the assessment of the flows of incoming, removal and accumulation of pollutants coming from atmospheric precipitation. Calculations have shown that the established level of soil contamination with heavy metals is primarily associated with the past economic

activity of non-ferrous metallurgy enterprises. Based on the results of chemical contamination of soils as a basic component of urban ecosystems, an assessment of the level of risk to the health of the population of Kolchugino was carried out. In most of the territory of Kolchugino, the total increased risk to the health of the adult population from contamination of the city's soils with heavy metals is at an unacceptable level. The danger is the inhalation of lead and cadmium.

Keywords: soil, heavy metals, pollution, environment, city, human health risk.

Введение. Объект исследования г. Кольчугино Владимирской области относится к моногородам. В городе функционируют 19 крупных, средних и малых промышленных предприятий [4], при этом основными градообразующими предприятиями являются предприятия по обработке цветных металлов: АО «Электрокабель кольчугинский завод», ООО «Кольчугинский мельхиор, АО «Интерсилверлайн», ООО «МТК «ЗиО-Мет», «Кольчугинский завод цветных металлов» (в 2017 г вошел в состав АО «Электрокабель кольчугинский завод»). До недавнего времени на Кольчугинском заводе цветных металлов выпускалось около 30% общего объема проката цветных металлов в России.

Создание комфортной городской среды предполагает отсутствие угрозы окружающей природной среде и здоровью населения. Почвы в городе выполняют важные экосистемные функции, которые часто остаются недооцененными. Оздоровление городской среды, создание экологического каркаса невозможно без оценки состояния городских почв [3, 13]. Одним из аспектов изучения городских территорий является моделирование пространственно-временной картины полей загрязнения компонентов окружающей среды [5, 7, 8, 12]. В условиях цифровизации прогноз загрязнения почв, как базового компонента городских экосистем может быть использован для оценки экологических рисков и рисков здоровью населения. Это позволит более эффективно решать экологические проблемы урбанизированных территорий в условиях техногенной нагрузки.

Материалы и методы. Прогноз химического загрязнения городских почв г. Кольчугино выполнялся с использованием балансовой модели Лубковой [9]. Расчетная модель прогнозирования загрязнения в экосистемах, предложенная Лубковой Т.Н. основана на оценке потоков поступления, выноса и аккумуляции загрязняющих веществ, поступающих с выпадениями из атмосферы. Данная модель позволила по интенсивностям твердофазных выпадений провести оценку и прогноз загрязнения почв тяжелыми металлами. Анализ снежного покрова успешно применяется для мониторинга атмосферного воздуха, а также поступления загрязняющих веществ из атмосферы в сопредельные среды за зимний период [2, 10, 19].

Исходными данными для расчетов являются результаты мониторинга снежного покрова и почв за определенный период. Отбор образцов почв и снежного покрова проводился по равномерной случайно-упорядоченной сетке с охватом всех функциональных зон города (промышленной, селитебной, рекреационной

и сельскохозяйственной). Всего с территории г. Кольчугино было отобрано 24 пробы почвы и 24 пробы снега. В пробах почв и снега (раздельно твердая и жидкая фазы) определяли содержания тяжелых металлов 1 и 2 классов опасности методом атомной абсорбции в эколого-аналитической лаборатории кафедры экологии и наук о Земле государственного университета «Дубна» по стандартным методикам. В качестве основного оборудования был использован атомно-абсорбционный спектрофотометр «КВАНТ-2А» фирмы НПО «Кортек».

Визуализация полученных данных проводилась с использованием программно-технологического комплекса ГИС INTEGRО, который представляет собой картографическую ГИС с расширенными возможностями для решения задач исследования природной среды.

По результатам химического загрязнения почв, как базового компонента городских экосистем была проведена оценка уровня риска для здоровья населения г. Кольчугино в соответствии с Р 2.1.10.1920–04 «Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду» [15]. Так как большинство тяжелых металлов относятся к веществам, вызывающим канцерогенный эффект, был рассчитан уровень индивидуального пожизненного канцерогенного риска для взрослого населения. Учитывалось ингаляционное и пероральное воздействие на организм человека от загрязненной почвы.

Результаты и обсуждение. Как показали результаты обследования почв г. Кольчугино превышение санитарно-гигиенических нормативов (ПДК валовых форм) отмечаются для всех исследованных металлов. Статистические характеристики содержания валовых форм тяжелых металлов в почвах города Кольчугино Владимирской области представлены в таблице 1. Среднее содержание свинца, кадмия, цинка и меди превышает ПДК от 1,5 до 2,8 раз. Превышение ПДК свинца отмечается в 33% обследованных проб, максимальное превышение составляет 6 ПДК. Превышения ПДК валовых форм кадмия выявлено в 75% проб, максимальное превышение 4,4 ПДК. Превышение ПДК цинка отмечается в 79% случаев, максимальное составляет 3,5 ПДК. Превышение ПДК валовых форм меди отмечается в 62% случаев, максимальное превышение составляет 11,8 ПДК.

Таблица 1 – Статистические характеристики содержания валовых форм тяжелых металлов в почвах г. Кольчугино и нагрузки тяжелых металлов с атмосферными выпадениями по данным снеговой съемки

| Характеристика | Тяжелые металлы | | | |
|----------------|---------------------------|-----------|-------------|-------------------|
| | 1 класс опасности | | | 2 класс опасности |
| | Свинец (Pb) | Цинк (Zn) | Кадмий (Cd) | Медь (Cu) |
| объем выборки | 24 | | | |
| | Содержание в почве, мг/кг | | | |
| min | 5,48 | 35,07 | 0,273 | 7,57 |
| max | 192,49 | 190,00 | 2,119 | 391,20 |
| среднее | 41,38 | 82,77 | 1,078 | 91,78 |

| | | | | |
|-------------------|--|----------|-------|----------|
| медиана | 19,94 | 72,53 | 0,969 | 51,86 |
| стандартное откл. | 54,75 | 37,88 | 0,604 | 100,82 |
| ошибка среднего | 11,18 | 7,73 | 0,123 | 20,58 |
| дисперсия | 2997,90 | 1434,96 | 0,365 | 10164,88 |
| | Нагрузка ΔQ_{TM} , г/кв.км в год | | | |
| min | 525 | 3089 | 41 | 178 |
| max | 4099 | 30421 | 440 | 2833 |
| среднее | 1227 | 12011 | 182 | 1302 |
| медиана | 751 | 11374 | 175 | 1252 |
| стандартное откл. | 984 | 7264 | 126 | 785 |
| ошибка среднего | 220 | 1624 | 28 | 176 |
| дисперсия | 968173 | 52761825 | 15924 | 616092 |

Уровень загрязнения почв на территории г. Кольчугино устанавливался в соответствии с утвержденным Минприроды РФ порядком определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами [14]. Результаты распределения почв по уровню загрязнения приведены в таблице 2. Загрязнение выше установленных ПДК в почвах г. Кольчугино выявлено по кадмию на 75%, по цинку 71 %, по меди 69 % и по свинцу 34 % территории (табл. 2). Особо следует отметить, что «средний» уровень загрязнения фиксируется сразу по двум металлам (свинцу и меди) и ареолы загрязнения находятся на территории селитебной части города (рис. 1).

Таблица 2 – Площадь загрязнения почв города Кольчугино Владимирской области тяжелыми металлами, кв.км (% от площади города)

| | 1 уровень «допустимый»* | 2 уровень «низкий»* | 3 уровень «средний»* | 4 уровень «высокий»* |
|----------------|----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Свинец (Pb) | <ПДК | ПДК–125 мг/кг | 125–250 мг/кг | 250–600 мг/кг |
| | 20,8 (66%) | 6,5 (21%) | 3,9 (13%) | 0 |
| Цинк (Zn) | <ПДК | ПДК–500 мг/кг | 500–1500 мг/кг | 1500–3000 мг/кг |
| | 9,1 (28%) | 22,1 (71%) | 0 | 0 |
| Кадмий (Cd) | <ПДК | ПДК–3 мг/кг | 3–5 мг/кг | 5–20 мг/кг |
| | 7,8 (24%) | 23,4 (75%) | 0 | 0 |
| Медь (Cu) | <ПДК | ПДК–200 мг/кг | 200–300 мг/кг | 300–500 мг/кг |
| | 11,7 (37%) | 13 (42%) | 5,2 (17%) | 1,3 (4%) |

* уровни загрязнения в соответствии с [14]

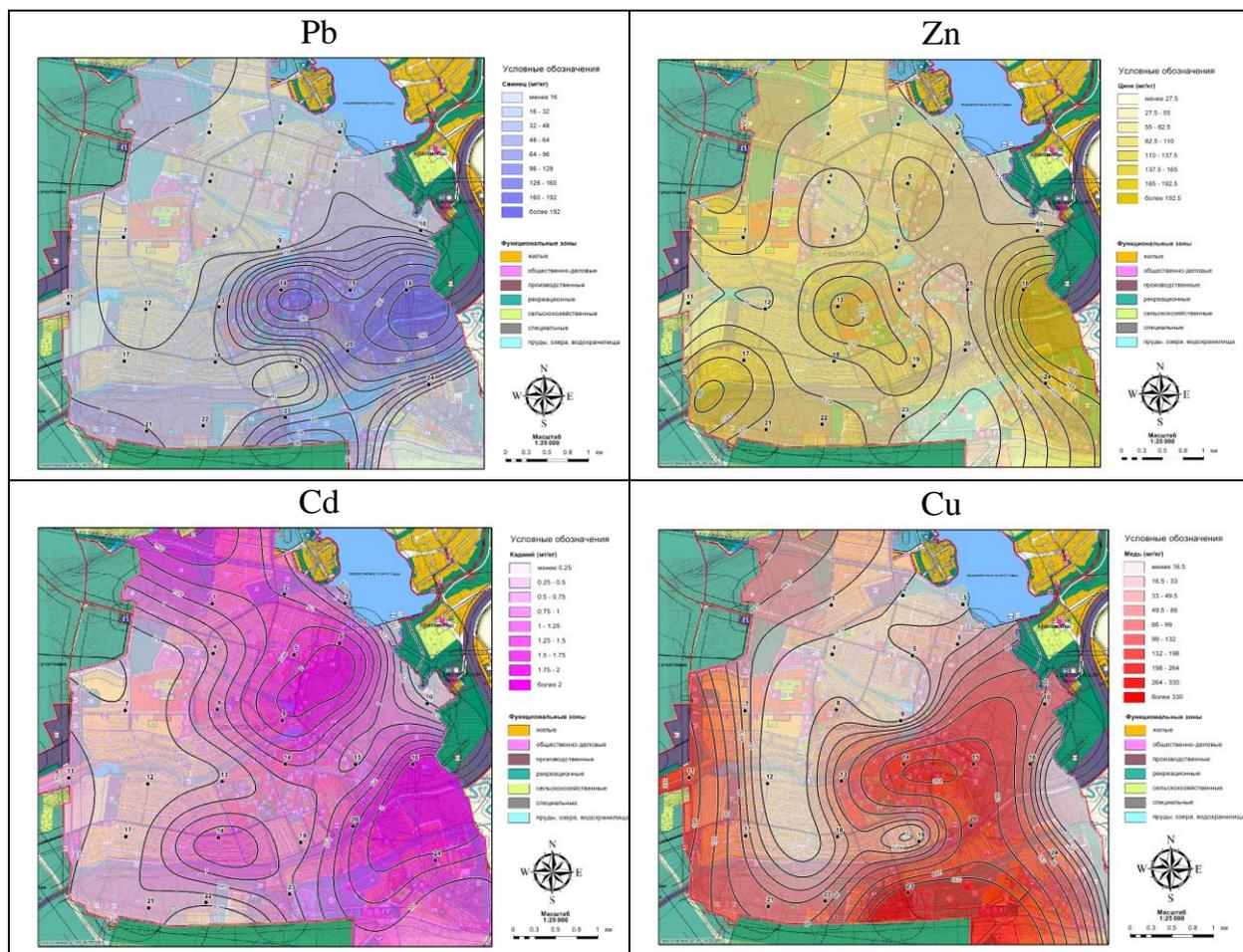


Рисунок 1 – Карты-схемы содержания ТМ в почвах г. Кольчугино

Расчеты нагрузки тяжелых металлов с атмосферными выпадениями на территорию г. Кольчугино по данным снеговой съемки представлены в табл.1. Тяжелые металлы, поступающие с пылевыми выпадениями, аккумулируются в верхних горизонтах почв, непосредственно контактирующей с приземным слоем атмосферы. Более высокая нагрузка поступления тяжелых металлов с атмосферными выпадениями характерна для восточной и юго-восточной части города (рис. 2). Интенсивность выпадения меди и цинка убывает при удалении от территории промплощадки, где сосредоточены основные градообразующие предприятия цветной металлургии. Для свинца и кадмия зависимость имеет менее выраженный характер, что указывает на поступление тяжелых металлов, в том числе от других источников, таких как городские котельные, автомобильный и железнодорожный транспорт и др.

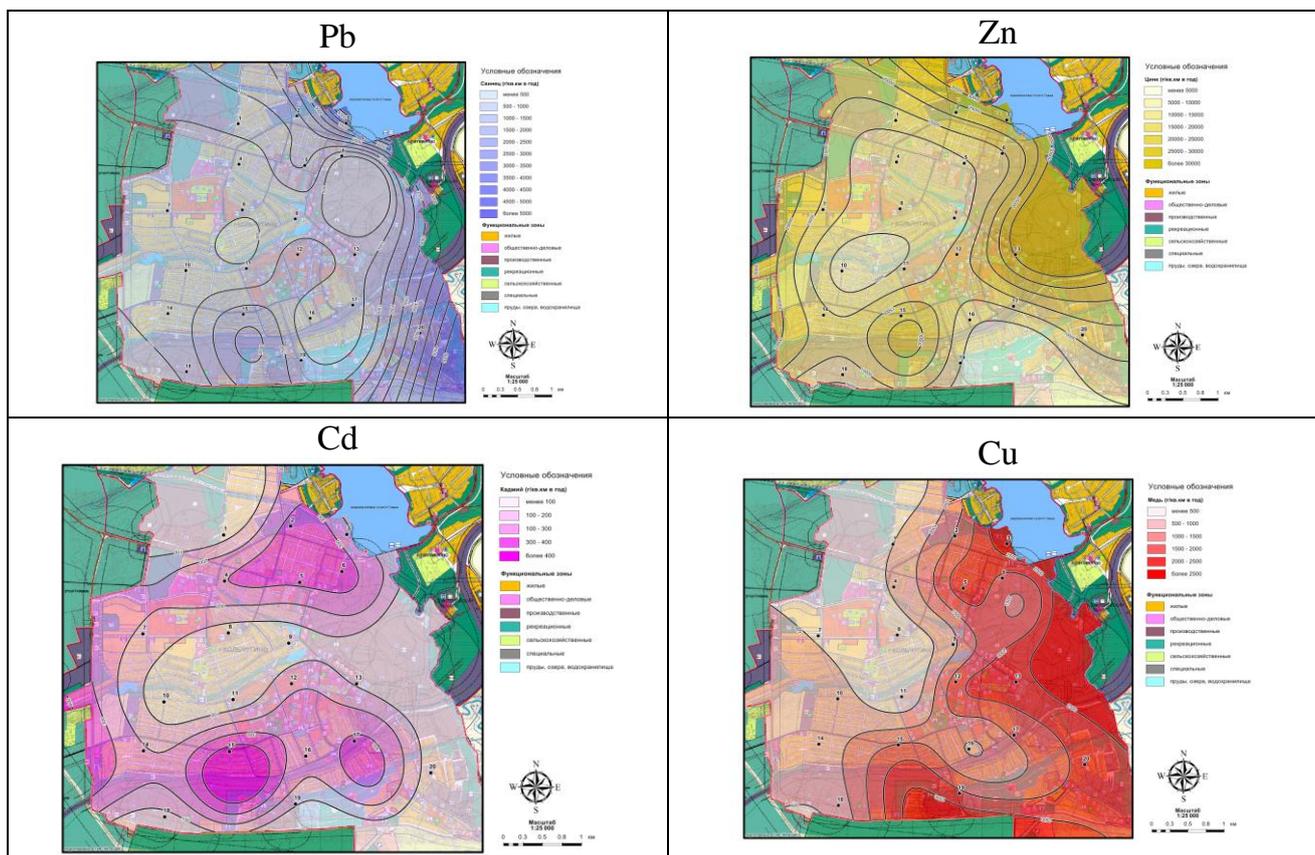


Рисунок 2 – Нагрузка тяжелых металлов с атмосферными выпадениями на территории г. Кольчугино

Расчет прогнозируемых (на конец расчетного периода n) концентраций тяжелых металлов в почвах (слое мощностью h) выполняли по уравнению:

$$C(n) = C(0) + \frac{1}{h \cdot d} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Q_{TM}}{S},$$

где $C(n)$ и $C(0)$ – прогнозируемые и текущие концентрации тяжелых металлов в почвах; d – плотность почв.

Как показали расчеты содержание свинца и меди в почвах г. Кольчугина в течение 100 лет остается в пределах уже существующего загрязнения. Содержание цинка в соответствии с расчетами в течение 100 лет достигнет низкого уровня загрязнения на 83 % территории города. По содержанию кадмия «допустимый» уровень загрязнения перейдет в «низкий» на площади в 2,6 кв.км. Таким образом, высокий уровень загрязнения почв г. Кольчугино тяжелыми металлами связан в первую очередь с прошлой хозяйственной деятельностью предприятий цветной металлургии, существующей в городе с 1871 года. В настоящее время в связи с модернизацией предприятий цветной металлургии отмечается значительное сокращение выбросов.

Данные по содержанию тяжелых металлов 1 и 2-го классов опасности в почвах города Кольчугино, а также результаты прогнозируемого содержания легли в основу расчётов суммарный канцерогенный риск для здоровья взрослого населения. Оценке риска здоровью уделяется большое внимание при оценке экологического состояния урбанизированных территорий, испытывающих

техногенную нагрузку в результате настоящей или прошлой хозяйственной деятельности [1, 11, 16] При расчете суммарного канцерогенного риска учитывалась возможность перорального и ингаляционного поступления свинца и кадмия, тяжелых металлов, обладающих канцерогенным воздействием [15]. Результаты расчетов показали [6], что при ингаляционном пути поступления свинца и кадмия, содержащихся в почвах города, канцерогенный риск для здоровья взрослого населения большей частью находится на уровне неприемлемого. Опасность представляет ингаляционное поступление тяжелых металлов. При пероральном поступлении свинца и кадмия из загрязнённых почв канцерогенный риск для взрослого населения характеризуется как минимальный или риск на уровне повседневного, и не требует дополнительных мероприятий по снижению. Тем не менее такой риск подлежит периодическому контролю. В то же время при ингаляционном поступлении из почвы свинца 16% территории города испытывает высокий канцерогенный риск, в 71% случаев риск оценивается как средний и только 13% территории города находится на приемлемом для населения уровне канцерогенного риска. При ингаляционном поступлении кадмия вся территория города Кольчугино испытывает неприемлемый для населения уровень канцерогенного риска. В 75% случаев риск для здоровья населения является высоким, а в 25% – средним.

При сохранении современных темпов атмосферного поступления тяжелых металлов уровень суммарного канцерогенного риска не только сохранится, но повысится его категория. Так в среднесрочной перспективе высокий уровень риска прогнозируется на 96% территории города.

Обеспечение качества окружающей среды в целях сохранения здоровья населения является приоритетной задачей в рамках экологической политики России [17, 18]. Экологическое состояние окружающей среды моногородов отражает многие проблемы, связанные с развитием конкретной отрасли производства. Несмотря на модернизацию предприятий цветной металлургии в городе Кольчугино сохраняется высокий уровень напряженности, связанный в первую очередь с накоплением загрязнения в депонирующих средах (почвах, донных отложениях и др.) [20], что в свою очередь отражается в неприемлемом уровне риска здоровью населения. Так как процесс самоочищения почв от тяжелых металлов занимает сотни лет и сопряжен с поступлением загрязнителей в сопредельные среды, то необходимо разработать систему и мероприятий по реамедитации почв г. Кольчугино, и снижение риска здоровью населения, связанного с загрязнением почв.

Заключение. В почвах г. Кольчугино выявлено превышение установленных ПДК меди до 11,8ПДК, свинца до 6 ПДК, кадмия до 4 ПДК, цинка до 3,5 ПДК. Ареолы загрязнения тяжелыми металлами находятся на территории селитебной части города. Установленный уровень загрязнения почв тяжелыми металлами, связан в первую очередь с прошлой хозяйственной деятельностью предприятий цветной металлургии, существующей в городе с 1871 года.

Нагрузка поступления меди и цинка с атмосферными выпадениями убывает при удалении от территории промплощадки, где сосредоточены основные

градообразующие предприятия цветной металлургии. Пространственное распределения атмосферного поступления свинца и кадмия указывает на наличие других источников, таких как городские котельные, автомобильный и железнодорожный транспорт и др.

На большей части территории г. Кольчугино суммарный канцерогенный риск для здоровья взрослого населения от загрязнения почв города тяжелыми металлами находится на уровне неприемлемого. Опасность представляет ингаляционное поступление свинца и кадмия.

Список цитированных источников

1. Боев Б.М. Гигиеническая оценка канцерогенного риска здоровью населения, ассоциированного с загрязнением деponирующих сред тяжёлыми металлами / В.М. Боев, Л.В. Зеленина, Л.Х. Кудусова и др. // Анализ риска здоровью. 2022. №1. С. 17–26. DOI:10.21668/health.risk/2022.1.02
2. Василевич М.И. Мониторинг аэротехногенного воздействия Сыктывкарского лесопромышленного комплекса / М.И. Василевич, Б.М. Кондратёнок, Д.П. Очеретенко и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332. № 10. 33–44
3. Горбов, С.Н. Генотоксичность и загрязнение тяжелыми металлами естественных и антропогенно-преобразованных почв Ростова-на-Дону / С.Н. Горбов, О.С. Безуглова, Т.В. Вардуни, А.В. Горовцов, С.С. Тагиведиев, Ю.А. Гильдебрант // Почвоведение. – 2015. – № 12. – С.1519–1529.
4. Итоги социально-экономического развития МО горд Кольчугино за 2020 год. URL: <http://gorod.kolchadm.ru/downloads/economic/180320215.pdf>
5. Каманина И.З., Каплина С.П., Любимова А.В. Анализ пространственно-временной картины полей химического загрязнения почв, как базового компонента городских // Актуальные проблемы экологии и природопользования: сборник научных трудов XXIII Международной научно-практической конференции: в 3 т., Москва, 21–23 апреля 2022 года / Российский университет дружбы народов. – Москва: Российский университет дружбы народов (РУДН). – 2022. – С. 338–342.
6. Каманина И.З., Каплина С.П., Макаров О.А. Оценка канцерогенного риска, связанного с загрязнением почв, для здоровья населения городов // Гигиена и санитария. – 2023. – Т.102. № 3. –С. 273–278. DOI: 10.47470/0016-9900-2023-102-3-299-304
7. Кошелева Н.Е. Пространственно-временное варьирование содержаний тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах / Н.Е. Кошелева, Н.С. Касимов, О.А. Самонова // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2000. – № 2. – С. 20-26
8. Кошелева Н.Е., Цыхман А.Г. Пространственно-временные тренды и факторы загрязнения почвенного покрова Москвы. //Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. –2018. – Т. 26.– № 2. – С. 207-236.

9. Лубкова Т.Н. Оценка техногенного загрязнения локальных экосистем химическими элементами на основе балансовых расчетов: дис. кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.09 / Москва: Московский государственный ун-т им. М.В. Ломоносова, 2007. –172 с.
10. Лукьянов А.И., Дахова Е.В., Майорова Л.П. Оценка загрязнения снежного покрова тяжелыми металлами как один из методов мониторинга атмосферного воздуха на примере населенных пунктов Дальнего Востока // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2022. – Т. 30. – № 3. – С. 407—416. DOI: 10.22363/2313-2310-2022-30-3-407-416
11. Май И.В., Клейн С.В., Максимова Е.В., Балашов С.Ю., Цинкер М.Ю. Гигиеническая оценка ситуации и анализ риска для здоровья населения как информационная основа организации мониторинга и формирования комплексных планов воздухоохраных мероприятий федерального проекта «Чистый воздух» / И.В. Май, С.В. Клейн, Е.В. Максимова, С.Ю. Балашов, М.Ю. Цинкер // Гигиена и санитария.– 2021. – Т.10. – №10. – С.1043–1051. DOI: 10.47470/0016-9900-2021-100-10-1043-1051
12. Макаров О.А., Макаров А.А. Прогнозирование химического загрязнения почв тяжелыми металлами при помощи балансового метода (на примере локальных участков города Москвы и города Подольска) // Экология урбанизированных территорий. – 2016. – №1. – С. 50–58.
13. Нарбут Н.А., Росликова В.И. Устойчивое развитие территории: Роль городских почв // Региональные проблемы. – 2019. – Т. 22. – № 3. – С. 45–49. DOI: 10.31433/2618-9593-2019-22-3-45-49
14. Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/10/10804/>
15. Р 2.1.10.1920–04. Руководство по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду. М. 2004. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037399>
16. Ракитский В.Н. Анализ риска здоровью при воздействии атмосферных загрязнений как составная часть стратегии уменьшения глобальной эпидемии неинфекционных заболеваний / В.Н. Ракитский, С.Л. Авалиани, С.М. Новиков и др. // Анализ риска здоровью. – 2019. – №4. – С. 30–6. DOI:10.21668/health.risk/2019.4.03
17. Указ Президента РФ № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года». М.; 2018. URL: <http://government.ru/docs/all/116490/>
18. Указ Президента РФ № 642 «Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации до 2035 года». М.; 2016. URL: <http://government.ru/docs/all/109256/>
19. Яковлев Е.Ю. Пространственное распределение тяжелых металлов в пробах снега вокруг северодвинского промышленного района / Е.Ю. Яковлев, Е.Н. Зыкова, С.Б. Зыков, А.А. Очеретенко // Успехи современного естествознания. – 2019. – № 11. – С. 179–184.

20. Kamanina I. Z., Badawy W. M., Kaplina S.P., Makarov O. A., Mamikhin S.V. Assessment of Soil Potentially Toxic Metal Pollution in Kolchugino Town, Russia: Characteristics and Pollution // Land 2023, 12 (2), p.1-16
[DOI:10.3390/land12020439](https://doi.org/10.3390/land12020439)