

ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

ENVIRONMENTAL MONITORING

DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-3-359-367

EDN: UZMUSO

УДК 504.064.3

Научная статья / Research article

Анализ пространственно-временной картины полей химического загрязнения почв как базового компонента городских экосистем

И.З. Каманина^{1,2}, С.П. Каплина^{1,2}, А.В. Любимова^{1,3}

¹ Университет «Дубна», Московская область,
г. Дубна, Российская Федерация

² Международная межправительственная организация Объединенный институт
ядерных исследований, Московская область, г. Дубна, Российская Федерация

³ Всероссийский научно-исследовательский геологический нефтяной институт,
г. Москва, Российская Федерация

kamanima@uni-dubna.ru

Аннотация. Почва является депонирующей средой и индикатором геохимической нагрузки. Выполнение важных экосистемных функций городскими почвами обеспечивает экологическую безопасность урбоэкосистем в целом. Цель работы – прогноз загрязнения почв как базового компонента урбоэкосистемы с высоким уровнем техногенной нагрузки. Расчет пространственно-временных полей химического загрязнения почв г. Кольчугино Владимирской обл. выполнен с помощью балансовой модели на основе эколого-аналитических данных по результатам площадных съемок почв и снежного покрова. Содержание тяжелых металлов 1 и 2 классов опасности в пробах почв и снега (твердая и жидкая фазы) определяли атомно-абсорбционным методом по стандартным методикам. Анализ пространственно-временных полей загрязнения почв для каждого тяжелого металла выполнен на основе карт-схем, построенных при помощи

© Каманина И.З., Каплина С.П., Любимова А.В., 2023



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

программно-технологического комплекса ГИС INTEGR0. Дана оценка степени накопления тяжелых металлов в почвах и времени достижения критического уровня с учетом аэротехногенного поступления. В почвах г. Кольчугино выявлено превышение санитарно-гигиенических нормативов (валовых форм) для всех исследованных металлов. Анализ данных пространственно-временных полей загрязнения почв тяжелыми металлами г. Кольчугино показал, что установленный уровень загрязнения почв, превышающий ПДК, связан в первую очередь с прошлой хозяйственной деятельностью предприятий цветной металлургии и в ближайшей перспективе останется на том же уровне.

Ключевые слова: тяжелые металлы, окружающая среда, загрязнение, почва, город, экосистема, балансовый подход

Информация о финансировании. Работа выполнена в рамках НИР приоритетного уровня поддержки университета «Дубна» (Приказ № 21 от 22.01.2021).

Благодарности: С.Л. Байбаковой за помощь в сборе и анализе образцов почв и снежного покрова.

Вклад авторов: И.З. Каманина – концепция исследования, анализ данных, интерпретация результатов, формулирование выводов, написание текста статьи; С.П. Каплина – проведение расчетов, формулирование выводов, написание текста статьи; А.В. Любимова – проведение расчетов, обработка данных, формирование ГИС, построение картографических схем исследуемой территории.

История статьи: поступила в редакцию 25.01.2023; доработана после рецензирования 25.03.2023; принята к публикации 25.05.2023.

Для цитирования: Каманина И.З., Каплина С.П., Любимова А.В. Анализ пространственно-временной картины полей химического загрязнения почв как базового компонента городских экосистем // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2023. Т. 31. № 3. С. 359–367. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-3-359-367>

Analysis of the spatiotemporal fields of chemical soil pollution as a basic component of urban ecosystems

Inna Z. Kamanina^{1,2}  , Svetlana P. Kaplina^{1,2} , Anna V. Lyubimova^{1,3} 

¹ Dubna State University, Moscow region, Dubna, Russian Federation

² Joint Institute for Nuclear Research, Moscow region, Dubna, Russian Federation

³ All-Russian Research Geological Petroleum Institute, Moscow, Russian Federation

 kamanima@uni-dubna.ru

Abstract. The soil is a depositing medium and an indicator of geochemical load. The fulfillment of important ecosystem functions by urban soils ensures the ecological safety of urban ecosystems as a whole. The purpose of the work is to forecast soil pollution as a basic component of the urban ecosystem with a high level of technogenic load. The calculation of the spatio-temporal fields of chemical pollution of soils in the city of Kolchugino, Vladimir region, was carried out using a balance model based on ecological and analytical data utilizing the results of area surveys of soils and snow cover. The content of heavy metals of hazard classes 1 and 2 in soil and snow samples (solid and liquid phases) was determined by atomic absorption method according to standard methods. The analysis of spatio-temporal fields of soil

contamination for each heavy metal is performed on the basis of map diagrams constructed using the INTEGRIO GIS software-technological complex. Taking into account aerotechnogenic intake, an assessment of the degree of accumulation of heavy metals in soils and their time to reach the critical level is given. In the soils of Kolchugino, an excess of sanitary and hygienic standards (gross forms) is revealed for all the metals studied. Analysis of the data of spatio-temporal fields of soil pollution with heavy metals in the city of Kolchugino showed that the established level of soil pollution exceeding the MPC is primarily associated with the past economic activity of non-ferrous metallurgy enterprises and will remain at the same level in the near future.

Keywords: heavy metals, environment, pollution, soil, city, ecosystem, balance approach

Information on financing. The work was carried out as part of the research work of the priority level of support for the University “Dubna” (Order No. 21 of 01/22/2021).

Acknowledgments: S.L. Baybakova for assistance in the collection and analysis of soil and sample of snow cover.

Authors' contributions: I.Z. Kamanina – the concept of the study, data analysis, interpretation of the results, formulation of conclusions, writing the text of the article; S.P. Kaplina – carrying out calculations, formulating conclusions, writing the text article; A.V. Lyubimova – carrying out calculations, data processing, the formation of GIS, the construction of cartographic schemes of the study area.

Article history: received 25.01.2023; revised 25.03.2023; accepted 25.05.2023.

For citation: Kamanina IZ, Kaplina SP, Lyubimova AV. Analysis of the spatiotemporal fields of chemical soil pollution as a basic component of urban ecosystems. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2023;31(3):359–367. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2023-31-3-359-367>

Процесс урбанизации – одна из ключевых проблем современности, сопровождается неизменным увеличением нагрузки на компоненты природной среды [1–3]. В системе городов особая роль принадлежит малым и средним городам, именно они составляют 85 % современных российских городов. Такие города отличаются индивидуальностью и степенью изученности уровня антропогенной нагрузки и ее влияния на различные компоненты окружающей среды. Среди них есть моногорода, в которых сосредоточены промышленные объекты черной и цветной металлургии, химической отрасли с высоким уровнем локализации загрязнения [4]. В настоящее время все больше выходит на первый план задача устойчивого развития городов с учетом обеспечения экологической безопасности. В связи с этим необходимость изучения современных процессов, происходящих на урбанизированных территориях, неуклонно возрастает. Прогноз экологического состояния городских экосистем позволит более эффективно решать экологические проблемы малых и средних городов.

Городские почвы выполняют важные экосистемные функции, которые часто остаются недооцененными. При этом почва является депонирующей

средой и индикатором геохимической нагрузки. Основным источником поступления загрязняющих веществ в городские почвы – это атмосферные выпадения как от «местных» стационарных источников промышленных предприятий и автотранспорта, вторичного загрязнения в результате денудационных процессов на урбанизированных ландшафтах, так и за счет переноса на значительные расстояния с «внешних» объектов техногенного воздействия. Анализ пространственно-временной картины полей химического загрязнения почв позволяет оценить степень накопления тяжелых металлов в городских почвах и время достижения критического уровня.

Цель исследования – прогноз загрязнения почв как базового компонента городской экосистемы г. Кольчугино Владимирской области с использованием балансового подхода.

Объект и методы исследования

Город Кольчугино расположен в северо-западной части Владимирской области (56°17'; 39°22' на правом берегу р. Пекша, являющейся притоком р. Клязьма. Город находится в 74 км от Владимира и в 131 км от Москвы. Площадь города составляет 31 км², численность населения – 41 953 (малый город). Город относится к моногородам. В городе функционируют 19 крупных, средних и малых промышленных предприятий. Основными градообразующими предприятиями являются предприятия по обработке цветных металлов: АО «Электрокабель кольчугинский завод», ООО «Кольчугинский мельхиор», АО «Интерсильверлайн», ООО «МТК «ЗиО-Мет», «Кольчугинский завод цветных металлов» (в 2017 г. вошел в состав АО «Электрокабель кольчугинский завод»). На Кольчугинском заводе цветных металлов выпускалось около 30 % общего объема проката цветных металлов в России. Часть селитебной застройки находится в пределах санитарно-защитной зоны предприятий и испытывает высокий уровень загрязнения.

Расчет пространственно-временных полей химического загрязнения городских почв был выполнен с использованием балансовой модели Т.Н. Лубковой [5] на основе эколого-аналитических данных, полученных авторами в результате многолетнего изучения различных компонентов окружающей среды малых и средних городов Центральной России. Были использованы данные площадных съемок почв и снежного покрова города Кольчугино с учетом его функционального зонирования. Пробы почв и снежного покрова отбирали в соответствии с общепринятыми требованиями¹ по случайно упорядоченной сетке с учетом функционального зонирования из расчета 1 проба на 1 кв. км². Всего было отобрано 20 проб почвы и 20 проб снега. В пробах

¹ МУ 2.1.7.730-99. Методические указания «Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест». М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. 38 с.

² ГОСТ 17.4.4.02-84. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического бактериологического, гельминтологического анализа. М.: Изд-во стандартов, 1985. 12 с.

почв и снега (раздельно твердая и жидкая фазы) по стандартным методикам определено содержание тяжелых металлов 1 и 2 классов опасности с использованием атомно-абсорбционного спектрофотометра «КВАНТ-2А» фирмы НПО «Кортек». Данные, полученные в результате количественного химического анализа исследованных проб, были обработаны методами математической статистики с использованием программных пакетов *Statistica 6.0* и *Microsoft Excel*. Далее на основе полученных расчетных данных были построены карты-схемы пространственно-временных полей загрязнения почв для каждого тяжелого металла с использованием программно-технологического комплекса ГИС INTEGRО (включен в Единый реестр российского программного обеспечения Минкомсвязи под номером 4302), разработанного в лаборатории геоинформатики научно-исследовательского института ВНИИ геоинформатики (1998–2015). В качестве алгоритма интерполяции использована функция «Многоуровневый базисный сплайн».

Результаты и их обсуждение

На основе данных о содержании тяжелых металлов в почвах города Кольчугино проведено ранжирование территории по уровню загрязнения почв химическими веществами³, где первый уровень загрязнения относится к «допустимому», а содержание ТМ не превышает предельно допустимые значения. Превышение санитарно-гигиенических нормативов (валовых форм) отмечаются для всех исследованных металлов. Среднее содержание свинца, кадмия, цинка и меди превышает ОДК от 1,5 до 2,8 раза. На территории города выявлены районы со «средним» уровнем загрязнения, площадь таких территорий составила по свинцу 13 % территории города (3,9 кв. км), по меди – 17 % (5,2 кв. км). Такой уровень загрязнения фиксируется сразу по двум металлам (свинцу и меди), ареолы загрязнения находятся на территории селитебной части города. «Низкий» уровень загрязнения выявлен по содержанию всех изученных металлов. Площадь таких территорий составила: по кадмию на 75 % территории города (23,4 кв. км), по цинку – 71 % (22,1 кв. км), по меди – 69 % (13 кв. км), по свинцу – 34 % (6,5 кв. км).

В оценке и прогнозировании загрязнения локальных экосистем химическими элементами возможно применение балансовой модели, позволяющей описать динамику отдельных геохимических показателей в некотором объеме природной среды, определяя связь между скоростями изменения миграционных потоков в пространстве и скоростями изменения состояния системы во времени [6].

Для расчета нагрузки тяжелых металлов с атмосферными выпадениями были использованы результаты по содержанию взвешенных и растворенных

³ Методические рекомендации по оценке степени загрязнения атмосферного воздуха населенных пунктов металлами по их содержанию в снежном покрове и почве. М.: ИМГРЭ, 1990. 16 с.; Порядок определения размеров ущерба от загрязнения земель химическими веществами. М.: Роскомзем, Минприроды России, 1993. 29 с.

форм тяжелых металлов в пробах снега. Поступление тяжелых металлов в почвы с пылевыми выпадениями за расчетный период характеризует аккумуляцию загрязнителей в верхнем горизонте почв, непосредственно контактирующем с приземным слоем атмосферы в этот период. Расчеты проводились в соответствии с МУ 2.1.7.730-99⁴ по следующей формуле:

$$\Delta Q_{\text{ТМ}} = \left[(1 - f^{\text{ВЗВ}}) \left(1 - \frac{\tau^{\text{П}} P C_{\Phi}}{\tau^{\text{ТМ}} P_3^{\text{ТМВЗВ}}} \right) + (1 - f^{\text{Р}}) \frac{1}{K_{\text{Р}}} \right] \times \tau^{\text{ТМ}} P_3^{\text{ТМВЗВ}} S T. \quad (1)$$

Статистические характеристики нагрузки тяжелых металлов с атмосферными выпадениями по данным снеговой съемки представлены в таблице.

Статистические характеристики нагрузки тяжелых металлов с атмосферными выпадениями по данным снеговой съемки

Характеристика	$\Delta Q_{\text{ТМ}}$, г/кв. км в год			
	1 класс опасности			2 класс опасности
	Свинец	Цинк	Кадмий	Медь
Минимальное	525	3 089	41	178
Максимальное	4 099	30 421	440	2 833
Среднее	1 227	12 011	182	1 302
Медиана	751	11 374	175	1 252
Стандартное отклонение	984	7 264	126	785
Ошибка среднего	220	1 624	28	176
Дисперсия	968 173	52 761 825	15 924	616 092

Анализ полученных данных показал, что поступление тяжелых металлов с атмосферными выпадениями в г. Кольчугино неравномерно и характеризуется крайне выраженной пространственной неоднородностью. Более высокая нагрузка поступления тяжелых металлов характерна для восточной и юго-восточной части города. 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.

На основе данных о содержании тяжелых металлов в почве и рассчитанной нагрузке с атмосферными выпадениями был выполнен расчет пространственно-временных полей загрязнения городских почв на среднесрочный и долгосрочный период. Расчет прогнозируемых (на конец расчетного периода n) концентраций тяжелых металлов в почвах осуществлялся по формуле

$$C(n) = C(0) + \frac{1}{hd} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta Q_{\text{ТМ}}}{S}, \quad (2)$$

где $C(n)$ и $C(0)$ – прогнозируемые и текущие концентрации тяжелых металлов в почвах ($C(0) = C_{\Phi}$); d – плотность почв; h – высота почвенного слоя.

⁴ МУ 2.1.7.730-99. Методические указания «Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест». М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 1999. 38 с.

По результатам прогнозных расчетов построена серия карт-схем пространственного распределения тяжелых металлов по территории г. Кольчугино.

Анализ данных пространственно-временных полей загрязнения почв тяжелыми металлами г. Кольчугино показал, что содержание свинца в почвах в течение 100 лет остается в пределах уже существующего загрязнения, а именно 66 % территории города имеет «допустимый» уровень, 21 % – «низкий» и 13 % – «средний» уровни загрязнения. Через 1000 лет при существующих темпах поступления свинца с атмосферными выпадениями площадь с «допустимым» уровнем загрязнения уменьшится на 2,6 кв. км и составит 57 % территории города. При этом увеличится площадь с «низким» уровнем загрязнения до 22 % территории. Содержание цинка в соответствии с расчетами в течение 50 лет достигнет «низкого» уровня загрязнения на 75 % территории города. Через 100 лет «низкий» уровень загрязнения цинком будет отмечаться в почвах на площади 83 % территории города. Через 1000 лет вся территория города перейдет в категорию с «низким» уровнем загрязнения почв цинком. По содержанию кадмия почвы г. Кольчугино через 50 лет остаются на том же уровне загрязнения. Через 100 лет при существующей нагрузке территории города в 2,6 кв. км с «низким» уровнем загрязнения произойдет ухудшение и будет достигнут второй «допустимый» уровень загрязнения. Через 1000 лет загрязнение кадмием в 9 % городских почв достигнет третьего «среднего» уровня загрязнения. В течение 100 лет уровни загрязнения почв по содержанию валовых форм меди не изменятся и составят: «высокий» уровень загрязнения на 4 % территории города, «средний» уровень – 17 %, «низкий» уровень – 42 % и «допустимый» уровень – 37 %. Через 1000 лет почвы на площади 3,9 кв. км перейдут из первого «допустимого» уровня во второй «низкий» уровень загрязнения.

Кроме того, на основе данных о содержании тяжелых металлов в почвах, полученных при помощи балансовой модели, был проведен прогнозный расчет достижения различных уровней загрязнения почв г. Кольчугино (нижние границы диапазонов значений, характеризующих каждый уровень загрязнения в соответствии с [6]).

Анализ данных показал, что среднее время достижения второго «низкого» уровня загрязнения почвами г. Кольчугино (в том случае, если этот уровень не достигнут) составит для свинца 3074 года, минимальное – 286 лет. Похожая картина наблюдается для меди, среднее время составит 2686 лет, минимальное на порядок меньше – 262 года. Среднее время достижения 2-го уровня загрязнения кадмием составит 228 лет, минимальное – 77. Самый неблагоприятный прогноз отмечается для цинка – минимальное время достижения 2-го уровня загрязнения 2 года, среднее время достижения – 126 лет.

Третий «средний» уровень загрязнения почв будет достигнут в среднем: для свинца через 17 131 год, для цинка – 6 392, для кадмия – 2 687,

для меди – 42 584. Время достижения четвертого «высокого» уровня загрязнения составит: для свинца – 35 001 год, для цинка – 21 621, для кадмия – 5 441, для меди – 42 799. Среднее время достижения пятого «чрезвычайно высокого» уровня загрязнения почв г. Кольчугино составит десятки тысяч лет: для свинца – 93 286, для цинка – 44 465, для кадмия – 26 095, для меди – 77 177.

Вероятно, установленный уровень загрязнения почв тяжелыми металлами, на большей части территории города превышающий ПДК, связан в первую очередь с прошлой хозяйственной деятельностью предприятий цветной металлургии, существующей в городе с 1871 г. В настоящее время предприятия прошли существенную модернизацию, в том числе систем очистки атмосферных выбросов, что привело к значительному сокращению выбросов. Тем не менее, как уже отмечалось, интенсивность выпадения меди и цинка зависит от расстояния до промплощадки, где сосредоточены предприятия цветной металлургии, и убывает при удалении от территории промплощадки. 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.

Заключение

Малые города – важная составляющая в структуре Российской Федерации, в них в значительной степени сосредоточены не только отечественная история и культура, но и наука и промышленность. В последнее время со стороны государства уделяется большое внимание к экономическому и социальному развитию малых городов. Вместе с тем дальнейшее развитие таких городов неизбежно приведет к возрастанию антропогенной нагрузки. Для сохранения экологической безопасности и устойчивого развития городов необходимо усиление внимания к состоянию окружающей среды. Использование балансового подхода для прогноза пространственно-временной картины загрязнения городских почв позволяет оценить тренды загрязнения урбоэкосистем. Полученные результаты представляют интерес для принятия своевременных управленческих решений, направленных на создание безопасной, комфортной среды для проживания и хозяйственной деятельности на территории г. Кольчугино.

Список литературы

- [1] Битюкова В.Р. Интегральная оценка экологической ситуации городов России // Региональные исследования. 2014. № 4 (46). С. 49–57.
- [2] Майснер Т.В. Экологическая безопасность современного города как предмет междисциплинарных исследований // Гуманитарий Юга России. 2020. Т. 9. № 1. С. 131–140.

- [3] *Рогожина Н.Г.* Экологические риски урбанизации в странах Юго-Восточной Азии // *Контуры глобальных трансформаций: политика, экономика, право*. 2020. Т. 13. № 1. С. 102–118. <http://doi.org/10.23932/2542-0240-2020-13-1-6>
- [4] *Битюкова В.Р.* Экологические проблемы малых городов России // *Вестник Московского университета. Серия 5: География*. 2007. № 1. С. 13–21.
- [5] *Лубкова Т.Н.* Оценка и прогноз техногенного загрязнения локальных экосистем химическими элементами на основе балансовых расчетов: автореферат дис. ... канд. геол.-минер. наук. 25.00.09. Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова. М., 2007. 29 с.
- [6] *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.

Сведения об авторах:

Каманина Инна Эдиславовна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры экологии и наук о Земле, факультет естественных и инженерных наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Университет «Дубна», 141982, Российская Федерация, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, д. 19. ORCID: 0000-0001-9186-8689. E-mail: kamanina@uni-dubna.ru

Каплина Светлана Петровна, кандидат биологических наук, доцент кафедры экологии и наук о Земле, факультет естественных и инженерных наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Университет «Дубна», 141982, Российская Федерация, Московская область, г. Дубна, ул. Университетская, д. 19. ORCID: 0000-0003-1323-6349. E-mail: sv_kap@mail.ru

Любимова Анна Владимировна, кандидат технических наук, заведующая отделом ГИС и цифровой картографии ФГБУ отделения геоинформатики «ВНИГНИ», 117105, Российская Федерация, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 8. ORCID: 0000-0002-8075-937X. E-mail: anna_lioubimova@mail.ru