

УДК 550.423

DOI 10.17513/use.38178

ОСОБЕННОСТИ АККУМУЛЯЦИИ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПОЧВАМИ ЗАПАДНОГО СКЛОНА СУРА-СВИЯЖСКОГО МЕЖДУРЕЧЬЯ ПРИВОЛЖСКОЙ ВОЗВЫШЕННОСТИ

¹Кузнецова О.Г., ²Рукавицын В.В., ³Хоменко В.П., ³Евграфова И.М.

¹ГБОУ «Школа № 1212», Москва;

²ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», Москва, e-mail: o-g-k@list.ru;

³ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский московский государственный строительный университет», Москва, e-mail: irina-sen811.yandex.ru

Статья посвящена анализу причин и динамике загрязнения тяжелыми металлами (ТМ) территории Сура-Свияжского междуречья Приволжской возвышенности. Приведены данные исследований ключевых площадок территории в виде почвенных профилей с отбором проб с 2008 по 2019 г. Цель исследования – сопоставление данных и получение прогноза развития экологической ситуации территории с помощью метода цифрового моделирования. Для определения корреляции между аккумуляцией металлов почвами и особенностями биоты в базу данных включены данные динамики онкологических заболеваний населения. Пробы анализировались методами пламенной абсорбции и атомно-эмиссионным с индуктивно-связанной плазмой (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn). Установлено, что на всей исследуемой территории происходят процессы аккумуляции, в основном железа и меди, а на автономных ландшафтах – и других ТМ. Максимальные концентрации железа и меди зарегистрированы в иллювиальном горизонте Государственного природного заповедника «Присурский». Выявлено, что ареалы загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами и часто фиксируемые случаи онкологических заболеваний коррелируют в пространстве. Сделано предположение зависимости уровня от загрязнения почв тяжелыми металлами. Полученные результаты позволяют осуществлять экологически безопасное районирование территории для хозяйственного использования.

Ключевые слова: экология, тяжелые металлы, загрязнение окружающей среды, Сура-Свияжское междуречье Приволжской возвышенности

HEAVY METAL CONTAMINATION OF SOILS ON THE WESTERN SLOPE OF THE SURA-SVIYAZHISKY INTERFLUVE OF THE VOLGA UPLAND

¹Kuznetsova O.G., ²Rukavitsyn V.V., ³Khomenko V.P., ³Evgrafova I.M.

¹School 1212, Moscow;

²Russian State Geological Exploration University named after Sergo Ordzhonikidze, Moscow, e-mail: o-g-k@list.ru;

³National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, e-mail: irina-sen811.yandex.ru

The article is devoted to the analysis of the causes and dynamics of heavy metals (HM) contamination of the territory of the Sura-Sviyazhsky interfluve of the Volga Upland. The data of studies of key sites of the territory in the form of soil profiles with sampling from 2008 to 2019 are presented. The purpose of the study is to compare data and obtain a forecast of the development of the ecological situation of the territory using the digital modeling method. To determine the correlation between the accumulation of metals by soils and biota features, data on the dynamics of oncological diseases of the population are included in the database. The samples were analyzed by flame absorption and atomic emission methods with inductively coupled plasma (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Pb, Zn). It has been established that accumulation processes, mainly of iron and copper, occur throughout the studied territory, and other HM occur on autonomous landscapes. The maximum concentrations of iron and copper were recorded in the illuvial horizon of the Prisursky State Nature Reserve. It was revealed that the areas of environmental pollution by heavy metals and frequently recorded cases of cancer correlate in space. The assumption of the dependence of the level on soil contamination with heavy metals is made. The results obtained will make it possible to carry out environmentally safe zoning of the territory for economic use.

Keywords: geocology, heavy metals, environmental pollution, Sura-Sviyazhsky interfluve of the Volga upland

Исследования проводились на территории западного склона Сура-Свияжского междуречья Приволжской возвышенности. Район исследования условно разделен на две зоны: трансформированную техногенезом (зона 1) и относительно устойчивую (зона 2) – территория государственного

природного заповедника (ГПЗ) «Присурский» [1, 2]. В северной части района исследования (зона 1) расположены сельскохозяйственные территории и населенные пункты: города Шумерля и Вурнары. В южной находится ГПЗ «Присурский», занимая большую часть исследуемой территории.

На территории заповедника введен охранный режим, так что данный участок можно считать ненарушенным техногенезом или фоновым.

Основоположниками геохимии ландшафта в нашей стране являются Б.Б. Полюнов, М.А. Глазовская, А.И. Перельман, Н.С. Касимов [3–6]. Большинство современных исследований, посвященных миграции металлов, опираются на сравнение полученных данных с предельно допустимыми концентрациями (ПДК) и ориентировочно допустимыми концентрациями (ОДК). Однако наблюдается и использование комплексного подхода [7–9].

Цель исследования – изучение миграции тяжелых металлов (ТМ) и их влияния на здоровье местного населения. Актуальность темы исследования выражается в том, что тяжелые металлы являются одними из распространенных поллютантов. Они способны к миграции из почвы в растительность, а затем, концентрируясь в организме животных и человека, вызывать хронические заболевания и онкозаболевания. Таким образом, изучение особенностей аккумуляции металлов в почвах позволяет наметить меры для принятия управленческих решений по сохранению устойчивости экосистем [10].

Материалы и методы исследования

В основу работы положены материалы полевых исследований, в процессе которых изучалось состояние экосистем территории западного склона Сура-Свияжского междуречья Приволжской возвышенности. Они проводились в 2008 и 2019 гг. с целью сопоставления данных и получения прогноза развития экологической ситуации.

Пробы почв отбирались из горизонтов А, В, С, донных отложений и растений (мха). Затем определялись концентрации ТМ в почвах в 2008 и 2019 гг. (табл. 1, 2). Подвижные формы ТМ в пробах почв 2008 г. (табл. 1) определялись в вытяжке по методу Баскомба [11], позволяющему экстрагировать связанные с органическим веществом формы методом пламенной абсорбции [12]. В 2019 г. определялись также подвижные формы металлов в почве и донных отложениях, но вытяжкой 1 н HCl [13].

Для прогноза дальнейшей ситуации на изучаемой территории был применен метод цифрового моделирования [14]. Для определения корреляции загрязнения почв ТМ, донных отложений, поверхностных вод в базу данных были включены сведения о злокачественных заболеваниях населения [10].

Таблица 1

Концентрации тяжелых металлов в некоторых точках на исследуемой территории Сура-Свияжского междуречья Приволжской возвышенности

Место отбора образца	Cu	Zn	Mn
	мг/кг		
Точка Ж. Верховое болото, сфагнум, зола	10,71	4,65	8,96
Точка Е. Супесчаная дерново-подзолистая иллювиально-железистая на древнеаллювиальных песках, A ₁ A ₂	21,58	16,21	9,50
B _{Fe} C	20,93	11,96	20,87
D	23,36	10,27	0,49
Точка Д. Дерновая почва центральной поймы, A ₁	36,79	21,39	36,75
B	28,39	16,81	19,64
B _{Fe} C	28,08	30,59	37,99
О. Кулюкары, донные отложения, h = 1,0 м	29,70	17,21	95,97
h = 2,0 м	30,78	21,53	253,07
h = 3,2 м	40,28	26,12	333,92
О. Щучье, донные отложения			
h = 5,0 м	30,04	18,92	223,48
h = 8,7 м	27,17	17,82	344,54

Примечание: 2008 г., подвижные формы, связанные с органическим веществом (мг/кг).

Таблица 2

Концентрации тяжелых металлов в некоторых точках на исследуемой территории Сура-Свияжского междуречья Приволжской возвышенности

Место взятия образца	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Точка 1. Горизонт A ₁ Ельник-зеленомошник	0,046	0,001	1,0	51,5	10,7	0,25	0,82
Горизонт A ₂	0,0023	0,001	0,46	45,0	9,45	0,20	0,39
Горизонт В	0,0001	0,001	0,65	13,9	2,68	0,13	0,82
Горизонт С	0,010	0,102	0,59	96,5	4,30	0,087	0,39
Точка 2. Горизонт A ₁ Смешанный лес	0,039	0,153	0,90	479	22,8	0,42	1,69
Горизонт A ₂	0,035	0,001	1,00	120	2,82	0,25	0,61
Горизонт ВС	0,0001	0,001	1,05	175	3,45	0,30	2,59
Точка 3. Горизонт В. Пахотное поле. Люцерна.	0,014	0,272	1,69	159	6,15	0,35	1,16
Горизонт С. Дерново-слабоподзолистая	0,017	0,166	1,11	121	2,11	0,18	1,15
Точка 4. Горизонт A ₁ -A ₂ . Поле. Разнотравье.	0,0001	0,172	0,56	457	10,1	0,34	0,33
Горизонт В	0,031	0,001	1,41	150	7,53	0,35	1,63
Горизонт ВС	0,016	0,147	1,08	118	4,45	0,31	1,63
Точка 5. Горизонт A ₁ , с. Чертоганы. Широколиственный лес. ЛЭП. Вырубка	0,0001	0,001	1,03	80,9	27,2	0,94	1,00
Горизонт В	0,0073	0,001	1,37	184	7,53	0,26	0,93
Горизонт ВС	0,017	0,001	1,42	166	3,44	0,30	0,79
Точка 6. Горизонт A ₁ . Чернозем. Пойма реки Сура	0,057	0,086	2,12	450	21,2	0,76	3,07
Горизонт ВС	0,038	<0,001	0,93	175	6,19	0,20	0,88
Точка 7. Горизонт A ₁	0,013	<0,001	0,80	39,0	12,7	0,26	1,15
Горизонт A ₂	0,034	<0,001	0,85	37,3	4,95	0,085	0,28
Горизонт С	0,026	<0,001	0,76	57,4	2,88	0,055	0,26
Точка 8. Горизонт A ₁	0,014	<0,001	0,78	49,5	13,1	0,32	7,9
Горизонт A ₂	0,045	<0,001	0,80	67,2	7,95	0,16	1,69
Горизонт ВС	0,014	<0,001	0,87	98,7	3,07	0,074	0,56
Точка 9 (пойма р. Сура) A ₁	0,024	<0,001	1,29	167	6,73	0,28	0,86
Горизонт В	<0,0001	0,034	1,22	117	7,87	0,18	0,75
Точка 10. Горизонт A ₁	0,033	<0,001	1,23	66,7	5,90	0,17	0,42
Горизонт В	0,001	<0,001	0,92	44,1	1,14	0,046	2,52
Точка 11. Красный октябрь. Подзоли- стая супесчаная почва. Горизонт A ₁ /A ₂	0,008	<0,001	1,10	61,1	13,3	0,24	1,18
Точка 12. Горизонт A ₂	0,032	<0,001	1,12	22,8	2,52	0,105	0,47
Горизонт В	<0,0001	<0,001	1,11	50,6	2,25	0,051	0,70
Горизонт ВС	0,025	<0,001	0,92	72,5	1,46	0,044	0,20
Горизонт С	<0,0001	<0,001	0,88	24,0	0,76	0,026	0,26
Точка 13. Горизонт В	<0,0001	<0,001	0,91	74,4	7,76	0,099	0,46
Горизонт ВС	<0,0001	<0,001	0,87	87,3	5,81	0,088	0,43
Точка 14. Горизонт В	0,010	<0,001	0,72	884	3,58	0,35	0,16
Горизонт ВС	0,001	<0,001	0,95	162	0,24	0,068	0,27
Точка 15. Горизонт A ₂ /В	0,005	0,212	0,82	584	14,8	0,424	1,45
Горизонт С	0,001	0,328	0,67	275	5,44	0,19	0,72

Окончание табл. 2

Место взятия образца	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Pb	Zn
Точка 16. Горизонт А ₁ . Сура. Затон. Разнотравье	0,017	0,237	1,99	535	15,0	0,59	2,46
Горизонт ВС	0,029	0,279	2,33	573	16,1	0,54	2,26
Горизонт С	0,014	0,099	1,71	545	10,2	0,53	2,79
Точка 17. Горизонт А ₁ /А ₂ . Сосны. Ягель	0,011	0,133	0,16	32,3	0,93	0,12	0,14
Горизонт ВС	0,035	0,203	0,24	21,4	0,64	0,031	0,10
Точка 18. Горизонт А ₁ . «Август». Затон	0,035	0,372	2,00	235	34,7	0,90	1,80
Горизонт В	-0,003	0,305	1,37	300	18,3	0,48	1,41
Горизонт ВС. Ил.	0,014	0,292	1,20	316	19,3	0,65	3,09
Вода. Сура – Порецкое	0,003	0,300	0,069	0,57	0,10	0,009	0,029
Вода. Сура – Алатырь	<0,0001	0,224	<0,001	0,22	0,03	<0,001	0,029
Вода. Вурнары – Август. Пруд	0,018	0,196	<0,001	0,53	0,10	0,002	0,072

Примечание: 2019 г., подвижные формы (мг/кг).

Показатели состояния окружающей среды (ОС) территории заповедника ГПЗ «Присурский» можно считать фоновыми, так как благодаря охранному режиму техногенное влияние в его пределах минимально и возможно только с перемещением воздушных масс.

Результаты исследования и их обсуждение

Как следует из полученных данных (табл. 2), во всех пунктах наблюдения значительны концентрации подвижных форм меди (до 2,33 мг/кг). Однако данный показатель не превышал ПДК (3 мг/кг). 1,69 мг/кг меди зарегистрировано в точке 3, пахотное поле, засеянное люцерной. Медь здесь концентрировалась в результате внесения удобрений. Концентрация меди, равная 2,12 мг/кг, зафиксирована в точке 6, находящейся в непосредственной близости города Шумерля. Также значительны концентрации меди вблизи города Алатырь – 1,99 мг/кг. Это связано, по-видимому, с техногенным влиянием города и широко развитой в нем химической промышленностью. Концентрация подвижных форм меди в точке 18, находящейся рядом с химическим заводом «Август», равнялась 2 мг/кг.

Почвенные пробы, взятые в 2008 г., были проанализированы на содержание форм металлов, связанных с органическим веществом. Концентрации меди более чем в 12 раз превышали ПДК для подвижных форм (36,79 мг/кг в пойменной почве зоны 2). Концентрации подвижных форм меди

в пахотных почвах зоны 1 также превышали ПДК в 6,7 раз (20 мг/кг). Высокие концентрации меди и других металлов в пахотных почвах связаны с внесением удобрений, которые, как известно, содержат повышенные концентрации тяжелых металлов [13].

По данным Х. Чулджиян и др. предельно допустимая концентрация подвижных форм кадмия равна 1,0 мг/кг. В пробах 2019 г. концентрация подвижных форм кадмия максимально равнялась 0,057 мг/кг в точке 6, рядом с г. Шумерля. В пахотных почвах концентрации подвижной формы кадмия в полтора раза превышала ПДК, что связано с поступлением кадмия в составе удобрений, а также в результате сжигания нефти и угля [2].

ПДК подвижных форм хрома равна 6,0 мг/кг. Все пробы почв 2019 г. не превышали ПДК по подвижным формам хрома. Максимальные концентрации зарегистрированы у химического завода «Август» и равны 0,372 мг/кг. Источниками поступления хрома в почвы является сжигание каменного угля, а также в процессе использования комплексных удобрений [13].

Концентрации железа значительны вблизи г. Вурнары (до 479 мг/кг) в т. 2, находящейся у сельскохозяйственных ландшафтов, до 235 мг/кг в т. 18. В самых северных, исследованных нами районах (точки 3 и 4) – содержания ТМ не превышали ПДК. По мере приближения к городу концентрации железа увеличиваются с 39 (т. 7) до 80 мг/кг (т. 5). В т. 9 (пойма р. Сура) концентрации железа в верхнем горизонте до-

ходили до 167 мг/кг. Это связано со смывом с вышележащих ландшафтов: транзитных и автономных, а также накоплением железа в органогенном горизонте супераквального ландшафта. Как известно, подвижные формы металлов легко образуют неподвижные (металлорганические) комплексы с гуминовыми кислотами верхних органогенных горизонтов почв. В т. 13–15, находящихся на территории ГПЗ «Присурский», концентрации ТМ не превышали ПДК. Концентрации железа доходили до 884 мг/кг в иллювиальном горизонте почв. Для подзолистых почв характерна аккумуляция ТМ в иллювиальном горизонте, поскольку из горизонта А активно вымываются коллоиды и, попадая в горизонт В, адсорбируют многие ТМ, в том числе железо. Кроме того, влияние оказывают почвообразующие породы. В т. 16 (территория ГПЗ) также отмечается аккумуляция меди и железа в иллювиальном горизонте: меди – до 2,39 мг/кг, а железа – 573 мг/кг.

Таким образом, на территории Сура-Свияжского междуречья зарегистрированы максимальные концентрации железа в иллювиальном горизонте ГПЗ «Присурский» – 884 мг/кг, что связано с влиянием почвообразующих пород.

На основе изученных данных составлен прогноз накопления ТМ в почве до 2040 г. при условии сохранения тенденции загрязнения. Прогноз проводился с помощью математического метода временного ряда или ряда динамики – последовательность статистических данных об аккумуляции металлов исследуемого района. Для анализа временных рядов использовалась линейная регрессия. Основой модели выступает гипотеза о существовании дискретного внешнего фактора $X(t)$, имеющего влияющую на рассматриваемый процесс $Z(t)$ связь между фактором и процессом, представленной в виде линейной функции. Модель прогнозирования временного ряда на основании линейной регрессии описывается уравнением [1]:

$$Z(t) = a_0 + a_1 \times X(t) \pm E_t, \quad (*)$$

где a_0 и a_1 – коэффициенты регрессии; E_t – ошибка модели.

За $X(t)$, дискретный внешний фактор, принималась доля ПДК каждого металла, которая и изменялась со временем.

Кадмий является токсичным элементом 1-го класса опасности, легко мигрирующим из почвы в растительность, и, попадая в организм человека, аккумулируется преимущественно в печени и почках. Кадмий

обладает канцерогенными и мутагенными свойствами. А также снижает активность витамина Д, вызывая размягчение костей скелета, множественные нарушения метаболизма [10]. Основными источниками поступления кадмия в почву являются промышленные выбросы предприятий, автотранспорт, а также сточные воды и удобрения. С 2008 до 2040 г. прогнозируется увеличение концентрации кадмия в почвах. На автономном ландшафте рядом с г. Вурнары с химическим производством кадмий будет аккумулироваться наиболее интенсивно в верхнем органогенном горизонте (А) супераквального ландшафта. Наименьшими концентрациями металла характеризовались почвы транзитного ландшафта, благодаря хорошему промывному режиму. Такая тенденция сохранится и согласно прогнозу.

Хром поступает в почву вследствие сжигания каменного угля на предприятиях и является канцерогенным элементом. Как известно, пойменные почвы имеют устойчивую тенденцию к аккумуляции хрома почвами, а также в иллювиальном горизонте дерново-подзолистых почв [8].

В 2008 г. для экстрагирования металлов (меди, марганца, цинка) была выбрана вытяжка по методу Баскомба, позволяющая экстрагировать формы металлов, связанные с органическим веществом. Также в 2008 г. был выбран для исследования супераквальный ландшафт, аккумулирующий металлы (у оз. Щучье), находящийся гипсометрически ниже участков автономных и транзитных ландшафтов. Почвы тут характеризовались активным процессом глееобразования, который связан со смещением реакции среды в кислую сторону, что способствует аккумуляции меди, марганца и цинка [11].

Анализ данных о повышении уровня онкологической заболеваемости жителей района исследования [10] показал тенденцию увеличения заболеваний в Шумерлинском и Вурнарском районах во времени. Это связано с тем, что канцерогенные металлы аккумулируются почвами ландшафтов, расположенных гипсометрически ниже автономных. Металлы накапливаются в верхних горизонтах почв в виде металлоорганических соединений, которые по цепи питания переходят в растительность и далее аккумулируются в организме человека. Таким образом, расположенный на автономном ландшафте завод химических препаратов может способствовать увеличению количества онкозаболеваний населения, проживающего гипсометрически ниже, в пойме реки Суры.

Заключение

Результатами исследования является установленная закономерность аккумуляции тяжелых металлов в компонентах ОС в пределах зон ненарушенных и нарушенных техногенезом ландшафтов и прогноз развития состояния экосистемы, при условии сохранения тенденции загрязнения к 2040 г. Кроме того, выявлена зависимость онкозаболеваний от загрязнения почв ТМ.

Сделан прогноз с 2019 по 2040 г. тенденции увеличения концентрации кадмия и хрома в почвах с течением времени. Это связано с ростом промышленности и увеличением количества автотранспорта в районе исследования. Рост случаев онкопатологий у населения коррелирует с увеличением концентрации подвижных форм некоторых тяжелых металлов в почвах. Это связано с большой площадью агроландшафтов (влиянием внешних удобрений) и промышленных предприятий в зоне одного района исследования. Концентрация хрома в почвах транзитного ландшафта западного склона Сура-Свияжского междуречья к 2040 г. превысит ПДК. Увеличению концентрации хрома в почвах способствует сжигание минерального топлива, особенно каменного угля, и выбросы промышленных предприятий.

Список литературы

1. Расулов О.У., Каримов Б.Ю., Зоиров Ф.Б., Халифев Ф.А. Анализ загрязнения почвы тяжелыми металлами в условиях сильного загрязнения промышленных зон // Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования. 2021. № 3 (55). С. 53–57.
2. Кузнецова О.Г. Вопрос идентификации маркеров экологической безопасности // Актуальные вопросы рационального использования природных ресурсов. Т. 2: материалы XV Междунар. форума-конкурса студентов и молодых ученых под эгидой ЮНЕСКО. СПб.: Санкт-Петербургский горный университет, 2019. С. 724.
3. Сарапулова Г.И. Эколого-геохимическая оценка почв в зоне техногенных объектов // Записки горного института. 2018. Т. 234. С. 258–262.
4. Мамонтов В.Г. Химический анализ почв и использование аналитических данных: лабораторный практикум. М.: Лань, 2021. 328 с.
5. Ковалева Е.В. Агроландшафтоведение и геохимия ландшафтов. М.: Лань, 2022. 144 с.
6. Перельман А.И., Касимов Н.С. Геохимия ландшафта: учеб. пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Астрель-2000, 1999. 798 с.
7. Мартынюк А.А., Рыкова Т.В. Закономерности загрязнения компонентов лесных экосистем и нормирование техногенного воздействия на леса // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2013. № 37. С. 54–57.
8. Фокина А.И., Дабах Е.В., Домрачева Л.И., Скугирева С.Г., Лялина Е.И., Ашихмина Т.Я., Зыкова Ю.Н., Леонова К.А. Методические подходы к химико-биологической диагностике состояния почв техногенно-преобразованных территорий // Почвоведение. 2018. № 5. С. 589–600.
9. Плеханова И.О., Куликов В.О., Шабаев В.П. Влияние ризосферных бактерий на фракционный состав соединений тяжелых металлов в системе почва – растение // Почвоведение. 2022. № 9. С. 1179–1186.
10. Ашурбекова Т.Н., Мусинова Э.М. Изучение загрязнения почвы тяжелыми металлами и оценка связи этого загрязнения с онкологическими заболеваниями // Самарский научный вестник. 2018. Т. 7. № 4 (25). С. 10–14.
11. РД 52.18.191-89. Методика выполнения измерений массовой доли кислоторастворимых форм металлов (меди, свинца, цинка, никеля, кадмия) в пробах почвы атомно-абсорбционным анализом. М.: Государственный комитет СССР по гидрометеорологии, 1990. [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200048597> (дата обращения: 12.10.2023).
12. ГОСТ ISO 22036-2014. Качество почвы. Определение микроэлементов в экстрактах почвы с использованием атомно-эмиссионной спектроскопии индуктивно связанной плазмы (ИСП-АЭС). М.: Стандартинформ, 2015. 26 с.
13. Жуйков Д.В. Мониторинг содержания марганца в агроценозах // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 3. С. 19–22.
14. Аникин А.С., Говзеев Г.Д. Применение регрессионного анализа для исследования временных рядов // Актуальные исследования. 2022. № 6 (85). С. 18–22.