

ГЕАХІМІЯ
GEOCHEMISTRYУДК 504.53.054; 504.056:574; 502.58:574
<https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-3-352-364>Поступила в редакцию 28.01.2020
Received 28.01.2020**Г. А. Соколик, С. В. Овсянникова, М. В. Попеня, С. В. Середенко***Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь***ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОДЕРЖАНИЕ КАДМИЯ, СВИНЦА И УРАНА
В ПОРОВОЙ ВЛАГЕ ПЕРЕУВЛАЖНЕННОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ
СРЕДНЕСУГЛИНИСТОЙ ПОЧВЫ**

Аннотация. Установлено содержание Cd, Pb и U в поровых водах дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы повышенной влажности при различных температурных условиях. В температурном диапазоне 15–40 °С доли тяжелых металлов (ТМ) в почвенном растворе от общего содержания соответствующего элемента в почве соотносятся следующим образом: $\alpha_{Cd} (0,2–0,3 \%) \gg \alpha_{Pb} (0,08–0,10 \%) \geq \alpha_U (0,03–0,08 \%)$. Повышение температуры приводит к изменению физико-химического состояния ТМ в почве, и, как следствие, – изменению их содержания в почвенной поровой влаге, где сосредоточены элементы в наиболее подвижных и биологически доступных миграционно-активных формах. Характер и степень изменения содержания каждого из ТМ в почвенной влаге в зависимости от температуры определяются химической природой элемента и особенностями почвы. В среднесуглинистой почве с нейтральной или слабощелочной реакцией среды при повышении температуры на 5 °С в диапазоне от 15 до 40 °С содержание Pb в почвенной влаге возрастает в среднем на 4,5 %, а Cd и U сокращается соответственно на 4,4 и 13 %. Повышение температуры способствует переходу железа из твердой фазы почвы в почвенную влагу и приводит к снижению сорбционной способности гидроксидов железа, существенно влияющих на закрепление Pb в почве. В соответствии с величинами коэффициентов межфазного распределения K_d в системе «твердая фаза почвы–почвенный раствор» закрепление ТМ в переувлажненной почве изменяется в следующей последовательности: Cd (180–230) \ll Pb (480–590) \leq U (570–1 620). В условиях переувлажнения степень закрепления свинца в почве уменьшается при повышении температуры, а кадмия и урана – при снижении температуры почвенной среды, причем урана в большей степени, чем кадмия. Уменьшение степени закрепления ТМ в почве способствует увеличению их подвижности и биологической доступности и ухудшает экологическое состояние наземных экосистем.

Ключевые слова: тяжелые металлы, кадмий, свинец, уран, переувлажненная почва, почвенный поровый раствор, коэффициент распределения ТМ в системе твердая фаза–поровый раствор почвы, температурный фактор

Для цитирования. Влияние температуры на содержание кадмия, свинца и урана в поровой влаге переувлажненной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы / Г. А. Соколик [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2020. – Т. 56, № 3. – С. 352–364. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-3-352-364>

G. A. Sokolik, S. V. Ovsyannikova, M. V. Papenia, S. V. Seradzenka*Belarusian State University, Minsk, Belarus***INFLUENCE OF TEMPERATURE ON CADMIUM, LEAD AND URANIUM CONTENT
IN THE PORE WATER OF OVERWETTING SOD-PODZOLIC LOAMY SOIL**

Abstract. Effect of soil temperature on concentration and total reserve of cadmium, lead and uranium in the interstitial (pore) water of waterlogged sod-podzolic medium loamy soil after their keeping at the definite temperature in the range of 15–40 °С was established. It was found that in the water-saturated soil samples, portions of the cadmium, lead and uranium in the soil pore solution were correlated as follows: $\alpha_{Cd} (0.2–0.3\%) \gg \alpha_{Pb} (0.08–0.10 \%) \geq \alpha_U (0.03–0.08\%)$. An increase in temperature leads to a change in the physicochemical state of HM in the soil and, consequently, to a change in their content in soil pore moisture, where elements are concentrated in the most mobile and biologically accessible migration-active forms. The character and extent, to which temperature affects the concentration and total reserve of heavy metal (HM) in the soil water, depended on the chemical nature of HM and peculiarities of soil. The 5 °С temperature increase in the range of 15–40 °С caused the content of Pb in the soil pore water to increase an average of 4.5 %, and Cd and U to decrease by 4.4 and 13 %, respectively. The iron content in the soil water increased with increasing temperature, which indicated a decrease in the sorp-

tion capacity of iron hydroxides of soil, which probably significantly affected the fixation of Pb in the soil. In accordance with the values of the distribution coefficients of HM in the “solid phase–soil pore solution” system, the fixation of HM in the soil increased in the following way: Cd (180–230) \ll Pb (480–590) \leq U (570–1620). The degree of Pb fixation in the soil increased with increase in the temperature of the soil, and Cd and U – with its decrease. Weakening of the HM fixation in the soil leads to an increase in their mobility and bioavailability and worsens the ecological state of terrestrial ecosystems.

Keywords: heavy metals, cadmium, lead, uranium, waterlogged soil, interstitial (pore) solution of soil, distribution coefficient of heavy metal in the “solid phase – pore solution of soil” system, temperature effect

For citation. Sokolik G. A., Ovsiannikova S. V., Papenia M. V., Seradzenka S. V. Influence of temperature on cadmium, lead and uranium content in the pore water of overwetting sod-podzolic loamy soil. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical Series*, 2020, vol. 56, no. 3, pp. 352–364 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-3-352-364>

Введение. К числу природных дестабилизирующих факторов, влияющих на состояние наземных экосистем, относятся аномальные изменения метеорологических условий. На территории Республики Беларусь аномальные изменения метеорологических условий наиболее сильно проявились в последние десятилетия. В летний период отмечено существенное повышение температуры воздуха с тенденцией к повышению температуры во второй половине лета. По сравнению с довоенным периодом (до 1941 г.) на территории Беларуси в целом наблюдается уменьшение количества атмосферных осадков примерно на 50–60 мм в год. При этом в отдельных регионах страны выделяются как зоны сокращения, так и зоны увеличения их количества [1].

Изменения температуры и условий увлажнения существенно влияют на свойства почвы, определяющие условия произрастания растений и накопление токсичных продуктов, присутствующих в области корневого питания растений [2, 3]. Избыточное содержание в почве высокотоксичных тяжелых металлов (ТМ), к числу которых относятся кадмий, свинец и уран, представляет опасность для человека и среды его обитания [4].

Свинец и кадмий попадают в окружающую среду в результате деятельности предприятий по добыче и переработке цветных металлов, при сжигании твердого органического топлива, использовании удобрений и пестицидов. Они также поступают в экосистемы с галогенидами и оксидами металлов, содержащимися в выхлопных газах автомобилей, в составе отходов, образующихся при изготовлении и переработке аккумуляторных батарей, а также из сточных вод бытовых отходов.

Повышенное содержание свинца характерно для почв не только районов добычи и переработки руд цветных металлов, но и для городских территорий. До недавнего времени существенный вклад в загрязнение окружающей среды свинцом вносило использование в качестве автомобильного топлива бензина, содержащего тетраэтилсвинец. В настоящее время в Беларуси, как и во многих других странах мира, использование этилированного бензина запрещено, однако уже поступивший в почву свинец этилированного бензина по-прежнему остается в ней и до сих пор, является основной техногенной составляющей в общем составе почвенного свинца.

В меньшей степени современное загрязнение свинцом связано с выбросами предприятий, сжигающих твердое топливо, в первую очередь – ТЭЦ. В зимний период, когда выбросы ТЭЦ максимальны, они являются основным источником поступления свинца в окружающую среду на территории городов. Использование твердого органического топлива для отопления домов в сельской местности также приводит к загрязнению свинцом окружающей среды [5, 6].

Кадмий, представляющий собой токсикант кумулятивного действия с выраженными канцерогенными свойствами, поступает в биогеоценозы и при разрушении автомобильных покрышек (вместе с цинком его добавляют к резине для ускорения процессов вулканизации). Валовое содержание кадмия в почвах придорожных полос Беларуси варьирует от 0,4 до 1,15 мг/кг, что значительно выше его кларка, равного 0,1 мг/кг. Значительное превышение ориентировочно допустимой концентрации (ОДК) валовых форм кадмия (0,5 мг/кг для песчаных и супесчаных почв) наблюдается, в частности, по профилю автодороги Брест–Минск–граница Российской Федерации (М1), достигающее 1,22 мг/кг в 5–10 м от дорожного полотна. В 50-метровой зоне трассы Минск–Гродно максимальное загрязнение валовыми формами кадмия достигает 0,73 мг/кг. Воздействию кадмия, содержащегося в пыли от изнашивания автомобильных шин, подвергаются расположенные в непосредственной близости от дорог сельскохозяйственные угодья, жилые зоны населенных пунктов, водоохранные зоны и водные объекты [7].

Уран относится к числу радиоактивных ТМ, все его соединения отличаются высокой токсичностью, при этом наибольшую опасность представляет химическая токсичность урана, а не его радиотоксичность. Уран присутствует во всех природных экосистемах и его содержание в почве подвержено изменениям в результате деятельности человека. На современном этапе на территории, где отсутствуют месторождения урана и предприятия по переработке содержащих уран природных ископаемых, техногенными источниками урана являются теплоэлектростанции, работающие на органическом топливе (особенно угольном), и минеральные удобрения [8].

Высокая токсичность при относительно низких концентрациях и способность к биоаккумуляции превращают ТМ в объект пристального внимания при оценке экологического состояния экосистем. Присутствующие в верхней корнеобитаемой части почвенного профиля ТМ усваиваются растениями, включаясь в процессы биологической миграции, и, в конечном счете, поступают по трофическим цепям в организм человека. Загрязнение почв ТМ отражается и на состоянии биологических систем в целом, понижая их устойчивость и биопродуктивность. В целом загрязнение компонентов окружающей среды ТМ отражается на здоровье населения и приводит к экономическим потерям [4, 9–12].

Наибольшее экологическое значение имеют подвижные соединения ТМ, сосредоточенные в почвенной влаге и обратимо связанные с компонентами твердой фазы почвы.

В формах, в которых ТМ присутствуют в почвенной влаге, осуществляется их миграция в почвенно-растительном покрове и накопление в компонентах экосистем. В основном из почвенных поровых растворов растения через свои корневые системы усваивают питательные элементы и вместе с ними присутствующие в почве ТМ [13, 14]. Поэтому при оценке подвижности и биологической доступности ТМ информация об их содержании в почвенных поровых водах представляет особый интерес.

При изменении метеорологических условий постепенно меняются физико-химические характеристики почвы (содержание и структура минеральных и органических компонентов, кислотность среды, окислительно-восстановительный потенциал, микробиологическая активность и другие показатели) [15–17], что может приводить к трансформации форм нахождения ТМ, определяющих их подвижность и биологическую доступность [10, 18, 19].

Температура окружающей среды и количество атмосферных осадков относятся к числу важнейших метеорологических параметров, от которых зависит состояние почвы и протекающие в ней процессы, влияющие на формы нахождения ТМ, их миграционные свойства, накопление в отдельных компонентах экосистем и, как следствие, – экологическое состояние окружающей среды [2, 3, 15, 18].

Цели и задачи. Цель настоящей работы – установить запас кадмия, свинца и урана в почвенной поровой влаге и степень его изменения в зависимости от температуры в условиях повышенной влажности почвы. Задачи исследования: выделить поровую влагу из переувлажненных образцов почвы, выдержанных при заданных температурах; определить концентрации Cd, Pb и U в полученных почвенных растворах и оценить доли этих ТМ в миграционно-активных формах от общего содержания соответствующего элемента в почве; установить коэффициенты распределения Cd, Pb и U между твердой фазой и поровой влагой почвы в различных температурных условиях; оценить влияние температуры на содержание Cd, Pb и U в почвенной влаге и их закрепление в твердой фазе почвы в условиях повышенной влажности.

Объекты и методы исследования. Объектами изучения являлись образцы (0-20)-см слоя дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы, содержащие кадмий, свинец и уран естественного и антропогенного происхождения, и миграционно-активные формы этих элементов, сосредоточенные в почвенной поровой влаге. Почвы подобного типа широко распространены на территории Беларуси.

Образцы почвы были отобраны в августе 2018 г. в районе населенного пункта Анусино Минского р-на Минской обл. Почвенные образцы были тщательно перемешаны, высушены до воздушно-сухого состояния при температуре (18 ± 2) °С и просеяны через сито с диаметром отверстий 2 мм.

После изучения по стандартным методикам почвенных характеристик гомогенизированные образцы почвы помещали в светонепроницаемые контейнеры из химически инертного полимер-

ного материала. Почву увлажняли дистиллированной водой до полного водонасыщения (100 % полной влагоемкости), при котором содержание поровой влаги в почве достигает максимального уровня. Контейнеры герметично закрывали и помещали в ротатор RRMini, вращающийся в различных плоскостях со скоростью 50 оборотов в минуту для равномерного распределения воды по всему объему почвы. В течение 3 недель почвенные образцы выдерживали в термостате при заданных температурах (15, 25 и 40 °С), после чего из них извлекали поровые воды. Поровые воды выделяли методом высокоскоростного центрифугирования образцов почвы на установке SIGMA-4-10, после чего их дополнительно пропускали через мембранные фильтры с диаметром пор 450 нм. Полученные почвенные растворы практически соответствовали жидкой фазе почвы [13]. Все эксперименты с образцами почвы проводили в двукратной повторности.

Содержание кадмия и свинца в анализируемых пробах устанавливали методом атомно-абсорбционной спектрометрии с использованием прибора ZEE nit 700 и пламени смеси газов ацетилен–воздух для перевода исследуемого вещества в атомно-дисперсное состояние. Содержание урана определяли посредством радиохимического анализа с идентификацией радионуклидов альфа-спектрометром SOLOIST U0450 фирмы EG&G ORTEC, оснащенный детекторами 576 A-600 RV [20, 21].

Запас в почвенном образце каждого из ТМ (Cd, Pb, U) в миграционно-активной форме оценивали по концентрации соответствующего элемента в полученной пробе почвенного раствора и общему количеству поровой влаги в почвенном образце. Полученные данные выражали в миллиграммах или Беккерелях (для урана) на 1 кг почвенного раствора, на 1 кг твердой фазы почвы и в процентах от общего содержания соответствующего элемента в почвенном образце.

Характеристики почвенных образцов. Массовая доля гранулометрической фракции с размером частиц менее 1×10^{-5} м (физическая глина) во взятой для исследования дерново-подзолистой почве составляла 37 %, что позволило отнести ее к среднесуглинистым почвам [22]. Остальные характеристики почвы приведены в таблице. Из полученных данных следует, что взятая для исследования дерново-подзолистая почва по реакции среды относится к щелочным почвам ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} - 7,9$) с общим содержанием органических компонентов ($\text{OK}_{\text{П}}$) – $(4,0 \pm 0,1)$ %, подвижного кальция – (490 ± 72) мг/кг, подвижного калия – $(71,0 \pm 4,6)$ мг/кг и полной влагоемкостью – $(48,0 \pm 1,6)$ % от массы абсолютно сухой почвы.

Характеристики почвы

Soil characteristics

Почва	pH_{KCl}	$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	ПВ, %	$\text{OK}_{\text{П}}$, %	$[\text{Ca}_{\text{подв}}]$, мг/кг	$[\text{K}_{\text{подв}}]$, мг/кг	[Cd], мг/кг	[Pb], мг/кг	[U], Бк/кг
Дерново-подзолистая среднесуглинистая	$6,9 \pm 0,1$	$7,9 \pm 0,1$	$48,0 \pm 1,6$	$4,0 \pm 0,1$	490 ± 72	$71,0 \pm 4,6$	$0,84 \pm 0,06$	$9,5 \pm 0,6$	$31,0 \pm 1,5$

Примечание. $\text{OK}_{\text{П}}$ – общее содержание в почве органических компонентов, % от массы абсолютно сухого почвенного образца; ПВ – полная почвенная влагоемкость, % от массы абсолютно сухого образца почвы; pH_{KCl} и $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ – pH почвенной суспензии в растворе 1 моль/дм³ KCl и дистиллированной воде; [Me] и $[\text{Me}_{\text{подв}}]$ – общее содержание в почве соответствующего металла и содержание металла в подвижной форме в расчете на абсолютно сухой почвенный образец.

Согласно действующим в Республике Беларусь гигиеническим нормативам [23], предельно допустимая концентрация (ПДК) свинца в почвах сельскохозяйственного назначения составляет 32 мг/кг абсолютно сухого вещества. Ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) кадмия в подобных суглинистых почвах сельскохозяйственного назначения не должна превышать 2 мг/кг. На территории Республики Беларусь содержание природного урана в почвах не нормируется. Как видно из таблицы, общее содержание кадмия и свинца в рассматриваемой почве ниже установленных в Республике Беларусь гигиенических нормативов.

Изменение содержание ТМ в поровой влаге переувлажненной почвы в зависимости от температурных условий. За время выдерживания искусственно увлажненных почвенных образцов практически достигалось квазиравновесное распределение ТМ между твердой и жидкой

фазами почвы. Массы почвенных растворов, выделенные из переувлажненных образцов почвы после их выдерживания при заданных температурах, составляли 61–65 % от общего количества почвенной поровой влаги. По концентрации кадмия, свинца и урана в полученных пробах почвенных растворов и полному количеству поровой влаги в почвенных образцах установлено общее содержание каждого из ТМ в поровой влаге почвенных образцов, которое соответствовало запасу в почве кадмия, свинца и урана в наиболее подвижной и биологически доступной растением миграционно-активной форме.

Содержание кадмия в почвенной поровой влаге. Результаты определения концентрации кадмия в поровом растворе, выделенном из дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы с уровнем влажности 100 % от ПВ ($Cd_{\text{ПР}}$, мкг/кг ПР) после ее выдерживания при различных температурных условиях, приведены на рис. 1.

Концентрация кадмия в почвенном растворе при температуре от 15 до 40 °С варьировала в пределах 3,6–4,6 мкг/кг почвенного раствора или 1,7–2,2 мкг/кг твердой фазы почвенного комплекса. Как видно из данных, приведенных на рис. 1, содержание кадмия в почвенном поровом растворе, где элементы находятся в наиболее подвижной и биологически доступной форме, снижалось по мере повышения температуры, что свидетельствовало о соответствующем увеличении сорбции металла компонентами твердой фазы почвенного комплекса. В целом при повышении температуры от 15 до 40 °С содержание кадмия в почвенном растворе сократилось в 1,3 раза (на 22 %), т. е. при повышении температуры на каждые 5 °С оно уменьшалось в среднем примерно на 4,4 %.

Рассмотрим возможные причины подобного поведения кадмия. Известно, что в почвенных растворах кадмий может находиться в виде катионов Cd^{2+} , комплексных ионов: $CdCl^+$, $CdOH^+$, $CdHCO_3^+$, $CdCl_3^-$, $CdCl_4^{2-}$, $Cd(OH)_3^-$, $Cd(OH)_4^{2-}$ и др., а также способен образовывать и органические хелаты [24].

По мнению ряда исследователей, закрепление кадмия в почве осуществляется преимущественно в результате конкурирующей адсорбции на минеральных компонентах почвы [14, 25, 26]. Растворимые органические соединения образуют неустойчивые комплексы с кадмием и могут оказывать заметное влияние на его сорбцию лишь при pH 8 и выше. Одним из способов

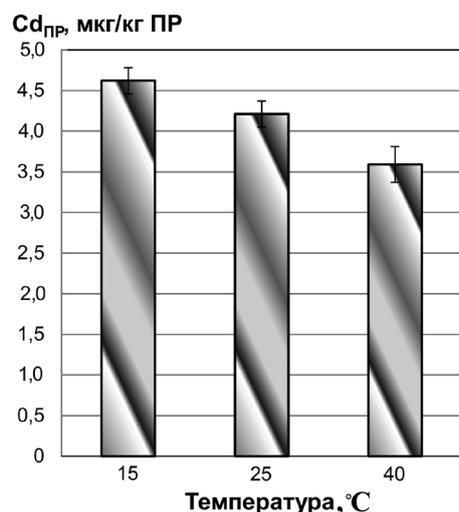


Рис. 1. Концентрация кадмия в почвенном растворе дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы с уровнем влажности 100 % от ПВ в зависимости от температуры ($Cd_{\text{ПР}}$, мкг/кг ПР)

Fig. 1. The concentration of cadmium in the pore solution (PS) of sod-podzolic loamy soil with moisture level of 100 % of WC (Cd_{PS} , $\mu\text{g/kg PS}$), depending on temperature

закрепления кадмия почвой является его осаждение на компонентах твердой почвенной фазы в виде карбоната $CdCO_3$ или фосфата $Cd_3(PO_4)_2$ при pH, превышающем 7,5 [18]. В анализируемой среднесуглинистой почве показатель pH_{H_2O} составлял 7,9 (таблица), и подобное осаждение кадмия из почвенного раствора вполне могло реализоваться.

При постоянной влажности почвы с повышением температуры количество поглощенного почвой углекислого газа сокращалось. В результате концентрация анионов CO_3^{2-} в почвенном растворе снижалась, что не могло приводить к сокращению содержания в нем кадмия за счет осаждения $CdCO_3$.

С другой стороны, снижение с ростом температуры поглощения углекислого газа почвой при одинаковом уровне ее влажности может приводить к увеличению pH почвенного раствора, что способствует гидролизу соединений кадмия. Наблюдавшееся с ростом температуры сокращение содержания кадмия в почвенном растворе могло быть результатом увеличения степени гидролиза соединений кадмия, протекавшего с образованием большего количества малорастворимых гидролизных продуктов, которые адсорбировались на компонентах твердой фазы почвенного комплекса.

Содержание свинца в почвенной поровой влаге. Экспериментальные данные по содержанию свинца в поровом растворе, выделенном из водонасыщенных (100 % от ПВ) образцов дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы в расчете на 1 кг почвенного порового раствора ($Pb_{ПР}$, мкг/кг ПР) при различных температурных условиях приведены на рис. 2.

Содержание свинца в почвенном поровом растворе анализируемой среднесуглинистой почвы с уровнем влажности 100 % от ПВ в температурном интервале от 15 до 40 °С находилось в пределах 16–20 мкг/кг почвенного раствора или 7,7–9,5 мкг/кг твердой фазы почвенного комплекса. При всех изученных температурах концентрация свинца в соответствующих почвенных растворах заметно превышала концентрацию кадмия, что, вероятнее всего, было обусловлено более высоким валовым содержанием свинца в почве (таблица).

В отличие от кадмия содержание свинца в почвенном поровом растворе увеличивалось с ростом температуры, что свидетельствовало о снижении с температурой сорбции металла компонентами твердой фазы почвенного комплекса. В целом при подъеме температуры от 15 до 40 °С содержание свинца в почвенном растворе выросло в 1,2 раза (на 22 %), т. е. при повышении температуры на каждые 5 °С содержание свинца в почвенной поровой влаге увеличивалось в среднем примерно на 4,5 %.

Рассмотрим возможные причины подобного поведения свинца. В анализируемой дерново-подзолистой среднесуглинистой почве, отличающейся щелочной реакцией среды, возможно осаждение карбоната $PbCO_3$, являющегося одним из наименее растворимых соединений свинца. Однако, как уже отмечалось, повышение температуры при постоянной влажности почвы приводит к сокращению поглощения углекислого газа почвой и уменьшению концентрации анионов CO_3^{2-} в почвенном растворе, что ограничивает осаждение $PbCO_3$. При этом снижение поглощения CO_2 может приводить к повышению pH почвенного раствора [18, 25].

С одной стороны, увеличение pH способствует протеканию процессов гидролиза соединений свинца с образованием малорастворимых продуктов. С другой стороны, поведение свинца контролируют процессы комплексообразования с органическими компонентами почвенного комплекса, причем в значительно большей степени, чем поведение кадмия [25–28].

Различные фракции органического вещества почвы оказывают противоположное влияние на подвижность свинца в почве. Нерастворимые в почвенных водах фракции высокомолекулярных гуминовых кислот прочно связывают часть свинца, закрепляя его в твердой фазе почвы. Относительно низкомолекулярные органические фракции, присутствующие в почвенных водах, образуют мобильные комплексы с катионами Pb^{2+} и $PbOH^+$. Связь катионов свинца с гумусовыми кислотами может осуществляться через карбоксильные или гидроксильные группы и в меньшей степени через недиссоциированные слабокислые гидроксильные группы сахаров и фенолов [26].

Повышение температуры почвы способствовало увеличению содержания гумусовых компонентов в почвенном растворе почвы в результате повышения pH почвенной среды. Увеличение содержания свинца в почвенном поровом растворе при повышении температуры почвы можно объяснить влиянием процесса комплексообразования свинца с органическими компонентами почвенного раствора, дополнительно поступающими в раствор из твердой фазы почвы. В условиях переувлажнения почвы влияние процессов комплексообразования свинца с органическими компонентами почвенного раствора, способствующих переходу свинца из твердой фазы почвы в почвенную влагу, вероятно, превалировало над влиянием процессов осаждения карбоната

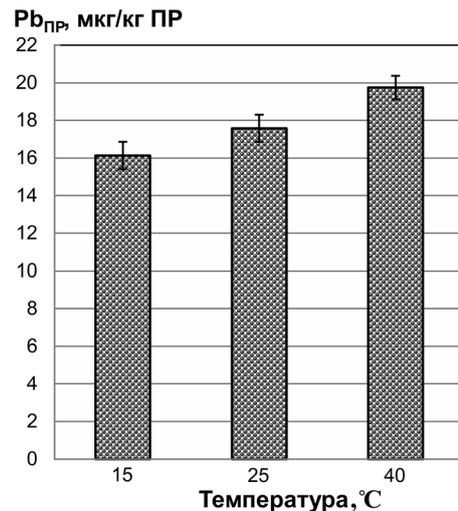


Рис. 2. Концентрация свинца в почвенном растворе дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы с уровнем влажности 100 % от ПВ в зависимости от температуры ($Pb_{ПР}$, мкг/кг ПР)

Fig. 2. The concentration of lead in the pore solution (PS) of sod-podzolic loamy soil with moisture level of 100 % of WC (Pb_{PS} , $\mu\text{g/kg PS}$), depending on temperature

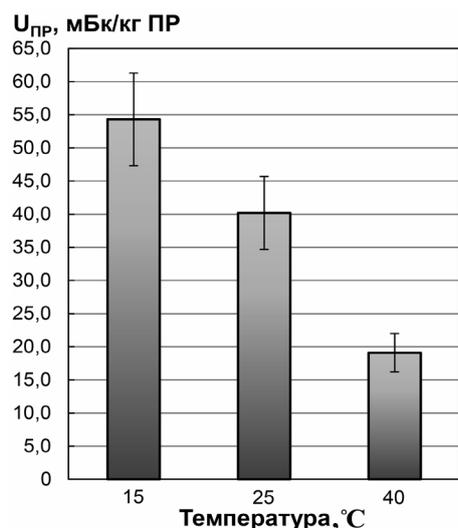


Рис. 3. Концентрация урана в поровом растворе дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы с уровнем влажности 100 % от ПВ в зависимости от температуры (U_{PP}, мБк/кг ПР)

Fig. 3. The concentration of uranium in the pore solution (PS) of sod-podzolic loamy soil with moisture level of 100 % of WC (U_{PS}, mBq/kg PS), depending on temperature

свинца и продуктов гидролиза соединений свинца на компонентах твердой фазы почвы, ограничивающих переход свинца в почвенный раствор.

Образованием комплексов свинца с органическими компонентами почвенного раствора можно объяснить противоположный по сравнению с кадмием эффект влияния температуры на содержание свинца в почвенной влаге.

Содержание урана в почвенной поровой влаге. Экспериментальные данные по концентрации урана в поровой влаге дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы с уровнем влажности 100 % от ПВ в расчете на 1 кг почвенного порового раствора (U_{PP}, мБк/кг ПР) при различных температурных условиях приведены на рис. 3.

Концентрация урана в почвенной поровой влаге в температурном интервале от 15 до 40 °С составляла 19,0–54,3 мБк/кг почвенного раствора или 9,2–26,1 мБк/кг твердой фазы почвенного комплекса.

Как видно из данных, представленных на рис. 3, с повышением температуры содержание урана в почвенной поровой влаге сокращалось. В изученном температурном диапазоне максимальное содержание урана в почвенной влаге, как и в случае кадмия, наблюдалось при температуре 15 °С. При повышении температуры от 15 до 40 °С концентрация урана в почвенной влаге сократилась в 2,8 раза. Это означало, что в рассмотренном температурном диапазоне

содержание урана в почве в миграционно-активной форме уменьшалось в среднем на 13 % при повышении температуры на каждые 5 °С.

Сокращение с ростом температуры содержания урана в почвенной поровой влаге могло быть связано с увеличением степени гидролиза соединений урана, протекающего с образованием малорастворимых продуктов, и с восстановлением U (VI) до U (IV) в результате изменения окислительно-восстановительных условий в почве, вызванного снижением содержания кислорода в почвенном растворе. Соединения четырехвалентного урана характеризуются меньшей растворимостью в природных водах, чем соединения шестивалентного урана [29], что могло привести к сокращению его содержания в почвенной влаге при повышении температуры. На состояние урана в почвенном растворе могло повлиять и уменьшение с ростом температуры доли урана в составе растворимых карбонатных комплексов в результате снижения поглощения углекислого газа в почве и его растворимости в водной фазе.

Изменением состояния окисления урана и уменьшением его доли в составе растворимых карбонатных комплексов можно объяснить и более существенное по сравнению с кадмием влияние температурного фактора на содержание урана в почвенном растворе.

Запас кадмия, свинца и урана в миграционно-активной форме в переувлажненной почве. В температурном диапазоне 15–40 °С доли рассмотренных ТМ в составе поровой влаги водонасыщенной почвы в процентах от общего содержания соответствующего элемента в почве соотносились следующим образом: $\alpha_{Cd} (0,20–0,26 \%) \gg \alpha_{Pb} (0,08–0,10 \%) \geq \alpha_U (0,03–0,08 \%)$. Это означает, что в условиях переувлажнения при температуре от 15 до 40 °С доля миграционно-активного кадмия от его общего содержания в почве значительно превышает соответствующие доли свинца и урана, указывая на более высокую способность к миграции кадмия в почвенно-растительном покрове.

Об изменении с температурой доли каждого из ТМ в составе почвенной поровой влаги от общего содержания соответствующего элемента в почве можно судить по данным, представленным на рис. 4.

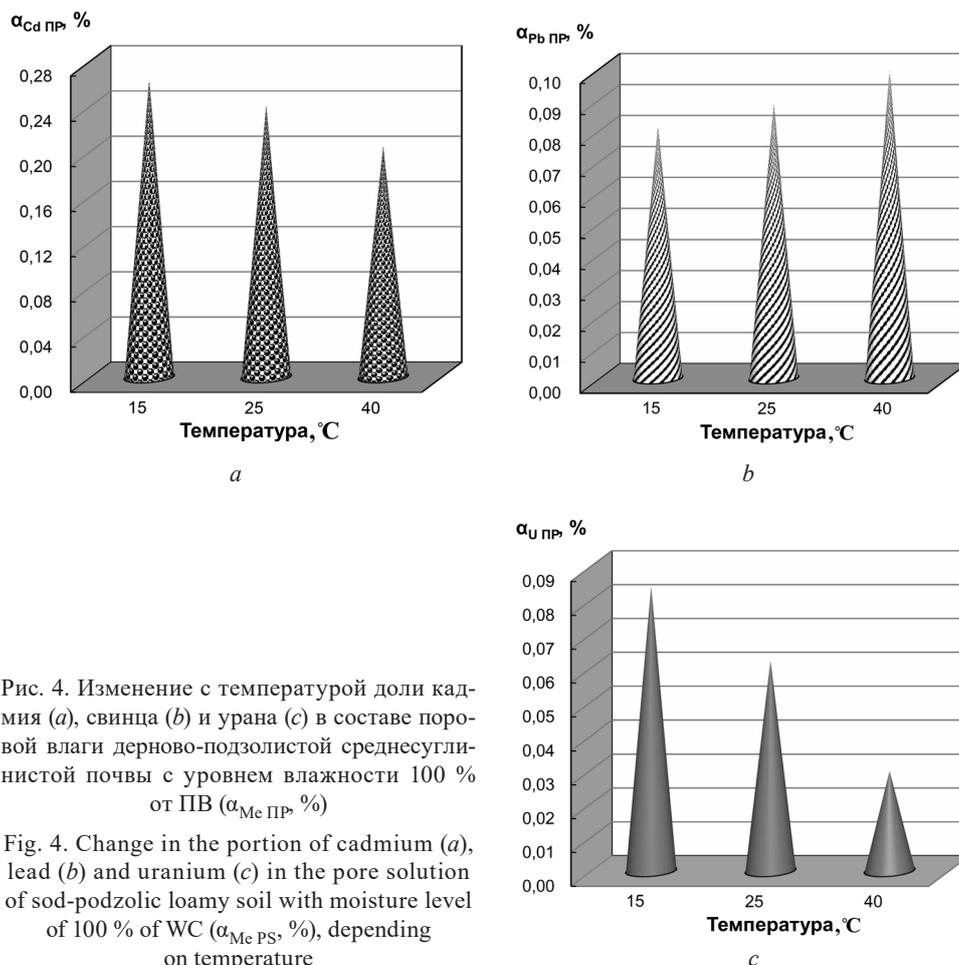


Рис. 4. Изменение с температурой доли кадмия (а), свинца (b) и урана (c) в составе поровой влаги дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы с уровнем влажности 100 % от ПВ ($\alpha_{Me пр}$, %)

Fig. 4. Change in the portion of cadmium (a), lead (b) and uranium (c) in the pore solution of sod-podzolic loamy soil with moisture level of 100 % of WC ($\alpha_{Me PS}$, %), depending on temperature

Показано, что при аналогичных температурных условиях доля миграционно-активного кадмия, сосредоточенного в почвенной поровой влаге, примерно в 2–3 раза превышала долю свинца и в 3–7 раз долю урана от общего содержания соответствующего элемента в почве. При температуре 15 °C доли свинца и урана в миграционно-активной форме были практически одинаковыми, при температуре 25 °C доля миграционно-активного свинца превышала соответствующую долю урана примерно в 1,4 раза, а при 40 °C – в 3,4 раза.

В целом изучение влияния температуры на запас кадмия, свинца и урана в почвенной поровой влаге, где сосредоточены элементы в наиболее подвижной миграционно-активной форме, позволяет выявить условия, способствующие изменению подвижности и биологической доступности этих ТМ в ту или иную сторону в условиях переувлажнения почвенной среды.

Сорбционная способность гидроксидов железа в условиях переувлажнения почвы. В почвенном растворе ТМ могут присутствовать в виде простейших гидратированных ионов и комплексных соединений с минеральными, относительно низкомолекулярными органическими и элементоорганическими компонентами почвы. В твердой фазе почвы ТМ находятся в обратимо и необратимо связанном состоянии. Они могут входить в состав малорастворимых минеральных и гумусовых веществ, а также сорбироваться аморфными и окристаллизованными формами гидроксидов железа, алюминия и марганца [14, 18, 27, 28].

Содержание ТМ в почвенном растворе зависит от сорбционной способности почвы по отношению к рассматриваемым металлам. Одна из причин изменения сорбционной способности почвы – это, возможно, изменение состояния гидроксидов железа, о котором можно судить по содержанию железа в почвенной влаге. Экспериментальные данные по изменению содержания железа в почвенном поровом растворе ($Fe_{ПР}$) при тех же условиях, что и рассмотренные выше ТМ, приведены на рис. 5.

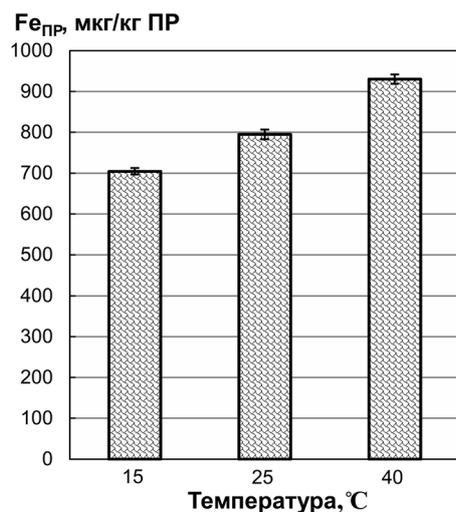


Рис. 5. Изменение концентрации железа в поровой влаге почвы с уровнем влажности 100 % от ПВ ($Fe_{ПР}$, мкг/кг ПР) в зависимости от температуры

Fig. 5. Change in the concentration of iron in the pore water of soil with moisture level of 100 % of WC ($Fe_{ПР}$, $\mu\text{g}/\text{kg}$ of PS), depending on temperature

Как видно из данных, приведенных на рис. 5, повышение температуры способствовало увеличению содержания железа в почвенном поровом растворе. Это могло быть вызвано изменением окислительно-восстановительных условий в результате уменьшения с ростом температуры содержания кислорода в почвенном растворе и восстановлением Fe (III) до Fe (II). Соединения двухвалентного железа отличаются более высокой растворимостью в воде по сравнению с соединениями трехвалентного железа [24], что и могло послужить причиной увеличения содержания железа в почвенном растворе при повышении температуры. Увеличение концентрации железа в почвенном растворе свидетельствовало о сокращении содержания гидроксидов железа в твердой фазе почвы и соответственно о снижении их сорбционной способности.

Среди рассмотренных тяжелых металлов лишь содержание свинца в почвенном поровом растворе увеличивалось по мере роста температуры (рис. 2). Это позволяет заключить, что в условиях повышенной влажности почвы гидроксиды железа играют более существенную роль в закреплении свинца по сравнению с закреплением кадмия и урана.

Коэффициенты распределения кадмия, свинца и урана между твердой фазой и поровой влагой переувлажненной почвы. Коэффициент распределения ТМ между твердой фазой и поровой влагой почвы – это отношение между концентрациями ТМ в соответствующих почвенных фазах в состоянии межфазного равновесия или близком к нему:

$$K_d = \frac{C_{ТФ}}{C_{ПР}}, \quad (1)$$

где K_d – коэффициент распределения ТМ между твердой фазой и поровым раствором почвы; $C_{ТФ}$ – концентрация ТМ в твердой фазе почвенного комплекса, мкг/кг ТФ; $C_{ПР}$ – концентрация ТМ в почвенном поровом растворе, мкг/кг ПР.

Коэффициенты распределения K_d характеризуют способность почвы закреплять ТМ и препятствовать их распределению в почвенно-растительном покрове [13]. Более высокие коэффициенты K_d соответствуют более высокой степени закрепления и соответственно более низкой подвижности ТМ в почве.

За три недели выдерживания при заданных температурах в диапазоне от 15 до 40 °С устанавливалось квазиравновесное распределение ТМ между твердой фазой и поровой влагой почвы, о чем свидетельствовало практически одинаковое содержание кадмия, свинца и урана в отдельных выделенных порциях поровых растворов.

По результатам определения общего содержания каждого из ТМ (Cd, Pb, U) в образцах почвы и почвенных поровых растворов, выделенных из образцов переувлажненной почвы, оценены условные коэффициенты межфазного распределения ТМ.

В температурном диапазоне 15–40 °С коэффициенты K_d для рассматриваемой почвы с уровнем влажности 100 % от ПВ находились в пределах 180–230 для кадмия, 480–590 для свинца и 570–1 620 для урана. При этом коэффициент распределения свинца уменьшался с повышением температуры, а коэффициенты распределения кадмия и урана, наоборот, увеличивались (рис. 6).

Из полученных данных следует, что в условиях повышенной влажности с ростом температуры сорбционная способность почвы по отношению к свинцу уменьшалась, а по отношению к кадмию и урану увеличивалась. Закрепление кадмия в твердой фазе почвенного комплекса

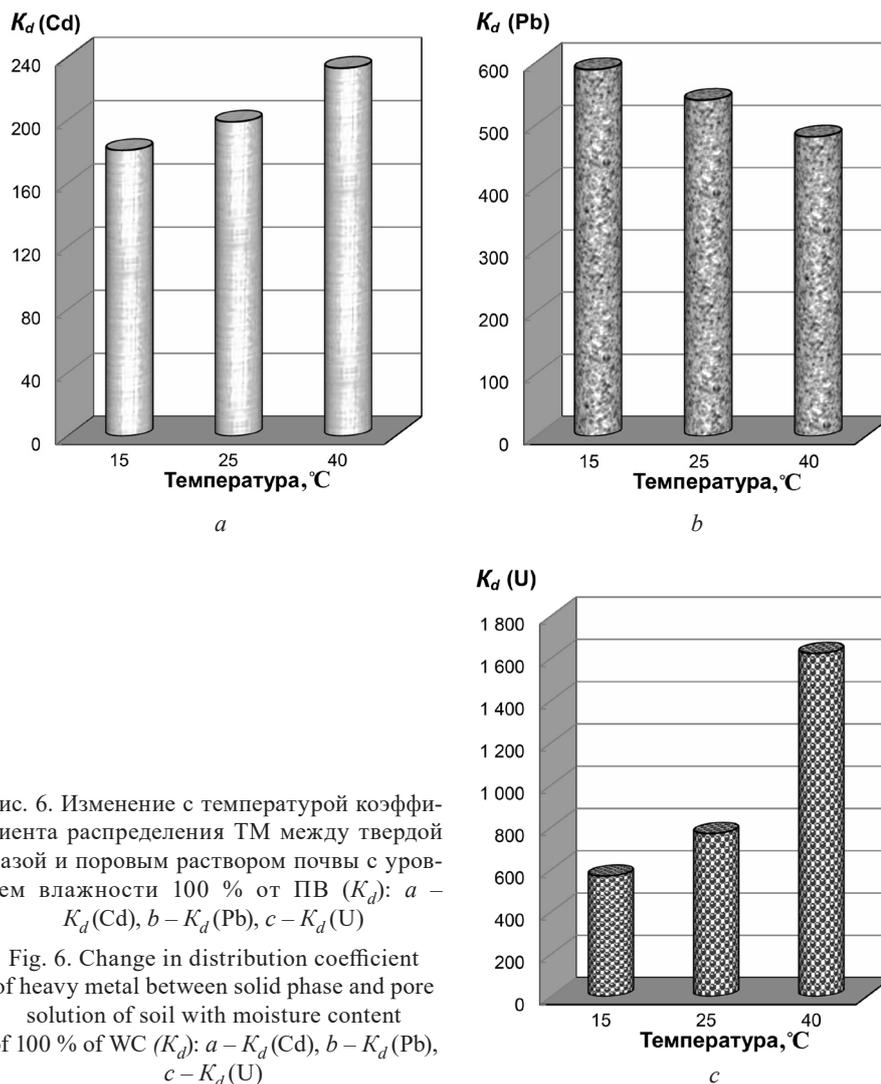


Рис. 6. Изменение с температурой коэффициента распределения ТМ между твердой фазой и поровым раствором почвы с уровнем влажности 100 % от ПВ (K_d): $a - K_d(\text{Cd})$, $b - K_d(\text{Pb})$, $c - K_d(\text{U})$

Fig. 6. Change in distribution coefficient of heavy metal between solid phase and pore solution of soil with moisture content of 100 % of WC (K_d): $a - K_d(\text{Cd})$, $b - K_d(\text{Pb})$, $c - K_d(\text{U})$

в условиях повышенной влажности почвенной среды во всем изученном температурном диапазоне было менее значительным, чем свинца и урана. При этом степень закрепления свинца в почве при температуре 15 °C была соизмеримой со степенью закрепления урана, а при более высоких температурах значительно уступала урану. В целом в условиях повышенной влажности закрепление ТМ почвой возрастало в ряду: Cd – Pb – U.

Заключение. В результате проведенных исследований изучено влияние температуры почвенной среды на концентрацию и общий запас кадмия, свинца и урана в поровой влаге почвы, где элементы находятся в наиболее подвижных и биологически доступных формах. На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1) в условиях переувлажнения концентрация и запас кадмия, свинца и урана в почвенной поровой влаге зависят от температуры почвы. Характер и степень их изменения в зависимости от температуры определяются химической природой элемента и особенностями почвы;

2) в температурном диапазоне от 15 до 40 °C в поровой влаге переувлажненной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы доли рассмотренных ТМ от общего содержания элемента в почве соотносятся следующим образом: $\alpha_{\text{Cd}} \gg \alpha_{\text{Pb}} \geq \alpha_{\text{U}}$;

3) в условиях переувлажнения с изменением температуры меняется физико-химическое состояние ТМ в почве и их содержание в наиболее подвижной и биологически доступной (миграционно-активной) форме;

4) при повышении температуры переувлажненной дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы с нейтральной или слабощелочной реакцией среды на 5 °C в диапазоне от 15 до 40 °C

содержание свинца в почвенной поровой влаге возрастает в среднем на 4,5 %, а содержание кадмия и урана сокращается соответственно на 4,4 и 13 %;

5) повышение температуры переувлажненной почвы способствует переходу железа из твердой фазы в почвенную влагу и приводит к снижению сорбционной способности гидроксидов железа по отношению к свинцу и другим тяжелым металлам, поведение которых существенно зависит от состояния гидроксидов железа в почве;

6) в соответствии с величинами коэффициентов распределения ТМ между твердой фазой и поровым раствором почвы (K_d) их закрепление в почве возрастает в следующей последовательности: $Cd \ll Pb \leq U$;

7) в условиях переувлажнения степень закрепления свинца в почве уменьшается при повышении температуры, а кадмия и урана – при снижении температуры, причем урана в большей степени, чем кадмия. Уменьшение степени закрепления ТМ в почве способствует увеличению их подвижности и биологической доступности и ухудшает экологическое состояние наземных экосистем.

Данные, полученные в результате исследования, показывают, что при анализе поведения ТМ в наземных экосистемах следует учитывать влияние условий увлажнения и температуры окружающей среды на формы нахождения в почве, определяющие их подвижность и биологическую доступность.

Список использованных источников

1. Логинов, В. Ф. Опасные гидрометеорологические явления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока. – Минск: Белорус. наука, 2010. – 170 с.
2. Овчаренко, М. М. Подвижность тяжелых металлов в почве и доступность их растениям / М. М. Овчаренко // *Аграрная наука*. – 1996. – № 3. – С. 39–40.
3. Мансуров, В. В. Влияние погоды на урожай / В. В. Мансуров, А. А. Мелешин // *Картофель и овощи*. – 2000. – № 5. – С. 21–24.
4. Васильцова, А. В. Тяжелые металлы в компонентах экосистем / А. В. Васильцова [и др.] // *Вузовская наука – региону: материалы IV Всерос. науч.-техн. конф., Вологда, 21 февр. 2006 г.: в 2 т. / Вологод. гос. техн. ун-т; редкол.: В. А. Шорин (отв. ред.) [и др.]*. – Вологда, ВГТУ, 2006. – Т. 1. – С. 395–397.
5. Водяницкий, Ю. Н. Загрязнение почв тяжелыми металлами / Ю. Н. Водяницкий, А. Т. Ладонин. – М.: Почвенный ин-т им. В. В. Докучаева РАСХН, 2012. – 304 с.
6. Cadmium in the Human Environment: Toxicity and Carcinogenicity. Lyon: IARC, 1992. – 469 p.
7. Рудь, А. В. Загрязнение тяжелыми металлами почв и растительности придорожных полос автодорог Минской области / А. В. Рудь // *Вестн. БГУ. Сер. 2. Химия. Биология. География*. – 2007. – № 1. – С. 111–115.
8. Бекман, И. Н. Уран / И. Н. Бекман. – М.: МГУ, 2009. – 305 с.
9. Черных, Н. А. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере / Н. А. Черных, С. Н. Сидоренко. – М.: Изд-во РУДН, 2003. – 430 с. – (Серия «Библиотека эколога»).
10. Сидоров, Н. Ф. Проблемы тяжелых металлов в сельском хозяйстве (биологические аспекты): учебное пособие / Н. Ф. Сидоров. – Иваново, 1995. – 48 с.
11. Тяжелые металлы в системе элемент–почва–зерновые культуры / О. Я. Соколова [и др.] // *Вестник ОГУ*. – 2006. – № 4. С. 106–110.
12. Головатый, С. Е. Тяжелые металлы в агроэкосистемах / С. Е. Головатый. – Минск: Ин-т почвовед. и агрохимии, 2002. – 240 с.
13. Почвенные растворы в процессах миграции ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{241}Am // С. В. Овсянникова [и др.] // *Геохимия*. – 2000. – № 2. – С. 222–234.
14. Минкина, Т. М. Состав соединений тяжелых металлов в почвах / Т. М. Минкина, Г. М. Мотузова, О. Г. Назаренко. – Ростов-на-Дону: Эверест, 2009. – 208 с.
15. Тезисы докладов II съезда Общества почвоведов (27-30 июня 1996 г., Санкт-Петербург): в 2 т. / Рос. акад. наук, О-во почвоведов. – СПб.: изд-во СПбГУ, 1996. – Т. 1. – 453 с.
16. Логинов, В. Ф. Изменения климата и их влияние на различные отрасли экономики: Аналитический доклад НАН Беларуси / В. Ф. Логинов, В. С. Микутский. – Минск: Ин-т природопользования, 2013. – 46 с.
17. Ермолаев, С. В. Влияние почвенных и погодных условий на формирование урожая и качество клубней картофеля разных сроков созревания в Чувашской Республике: автореф. дис. ... канд. сельскохозяйств. наук: 06.01.09 / С. В. Ермолаев. – Чебоксары, 2009. – 21 с.
18. Черных, Н. А. Трансформация соединений свинца и кадмия в разных типах почв / Н. А. Черных, Прасанна Джагат // *Вестн. РУДН. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности*. – 2000. – № 4. – С. 82–88.
19. Изменение подвижности тяжелых металлов в дерново-подзолистых почвах в зависимости от степени гумусированности и применения высоких доз органических удобрений / В. А. Седых [и др.] // *Изв. ТСХА*. – 2011. – Вып. 3. – С. 17–25.

20. МВИ. МН1497-2001. Методики определения урана в почвах и аэрозольных фильтрах. – Минск: БелГИМ, 2001.
21. Measurement of radionuclides in food and the environment [Electronic Resource]: Technical reports series no 295 / International Atomic Energy Agency. – Vienna, 1989. – Mode of access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/trs295_web.pdf.
22. Практикум по агрохимии: учеб. пособие / В. В. Кидин [и др.] / под ред. В. В. Кидина / М.: Колос-с, 2008. – 599 с.
23. ГН 2.1.7.12-1-2004. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве: Утв. Постановление глав. гос. сан. врача Респ. Беларусь № 28 от 25.02.2004. – Минск, 2004. – 20 с.
24. Greenwood, N. N. Chemistry of the Elements / N. N. Greenwood, A. Earnshaw. – Oxford: Butterworth, 1997. – 1600 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-30414-6>
25. Информационная оценка состояния тяжелых металлов в почвах / В. Н. Гукалов [и др.] // Вестн. Алтай. гос. аграр. ун-та. – 2015. – № 5 (127). – С. 58-64.
26. Mench, M. Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne district, Burgundy, France / M. Mench, D. Baize, V. Mosquout // Environ. Pollut. – 1997. – Vol. 95. – P. 93–103. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(96\)00078-4](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(96)00078-4)
27. Ильин, В. Б. Тяжелые металлы в системе почва–растение / В. Б. Ильин / Новосибирск: Наука, 1991. – 151 с.
28. Головатый, С. Е. Содержание миграционно-активных форм свинца в дерново-подзолистых и торфяных почвах / С. Е. Головатый, Н. К. Лукашенко, З. С. Ковалевич // Экологический вестник. – 2010. – № 3 (13). – С. 15–22.
29. Химия актиноидов: в 3 т.: пер. с англ. / под ред. Дж. Каца [и др.]. – М.: Мир, 1991. – Т. 3. – 525 с.

Reference

1. Loginov V. F., Volchek A. A., Shpoka I. N. *Hazardous hydrometeorological phenomena in Belarus*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 170 p. (in Russian).
2. Ovcharenko M. M. Mobility of the heavy metals in soil and their availability for plants. *Agrarnaya nauka = Agricultural science*, 1996, no. 3, pp. 39–40 (in Russian).
3. Mansurov V. V., Meleshin A. A. Influence of the weather on the harvest. *Kartofel i ovoshchi = Potato and vegetables*, 2000, no. 5, pp. 21–24 (in Russian).
4. Vasil'tsova A. V., Shvedova L. V., Kupriyanovskaya A. P., Nevskiy A. V. Heavy metals in components of ecosystems. *Vuzovskaya nauka – regionu: materialy IV Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [University Science to the region: materials of the IV All-Russian Scientific and Technical Conference]. Vologda, Vologda State University, 2006, vol. 1, pp. 395–397 (in Russian).
5. Vodyanitskii Yu. N., Ladonin A. T. *Contamination of soils by heavy metals*. Moscow, Dokuchaev Soil Science Institute the Russian academy of agricultural sciences (RAAS), 2012. 304 p. (in Russian).
6. *Cadmium in the Human Environment: Toxicity and Carcinogenicity*. Lyon: IARC, 1992. – 469 p.
7. Rud' A. V. Contamination of soil and vegetation of roadside lanes of the Minsk region. *Vestnik Belarusskaga dzyarzhaj'naga universiteta. Ser. 2, Khimiya. Biologiya. Geografiya = Bulletin of the Belarusian State University. Series 2. Chemistry. Biology. Geography*, 2007, no. 1, pp. 111–115 (in Russian).
8. Bechman I. N. *Uranium*. Moscow, Moscow State University, 2009. 305 p. (in Russian).
9. Chernykh N. A., Sidorenko S. N. *Ecological monitoring of toxins in biosphere*. Moscow, Publishing house of Peoples' Friendship University of Russia (RUDN), 2003. 430 p. (in Russian).
10. Sidorov N. F. *Problems of heavy metals in agriculture (biological aspects)*. Ivanovo, 1995. 48 p. (in Russian).
11. Sokolova O. Ya., Stryapkov A. V., Antimonov S. V., Solovykh S. Yu. Heavy metals in the “element-soil-cereal cultures” system. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta = Vestnik of the Orenburg State University*, 2006, no. 4, pp. 106–110 (in Russian).
12. Golovatyi S. E. *Heavy metals in agrosystems*. Minsk, Institute of Soil Science and agrochemistry, 2002. 239 p. (in Russian).
13. Ovsyannikova S. V., Sokolik G. A., Eismont E. A., Kilchitskaya S. L., Kimlenka I. V., Zhukovich N. V., Rubinchik S. Ya. Soil pore solutions in migration of ^{137}Cs , ^{90}Sr , $^{239,240}\text{Pu}$ and ^{241}Am . *Geokhimiya = Geochimica*, 2000, no. 2, pp. 222–234 (in Russian).
14. Minkina T. M., Motuzova G. M., Nazarenko O. G. *Composition of heavy metals compounds in soils*. Rostov-on-Don, Everest Publ., 2009. 208 p. (in Russian).
15. Russian Academy of Science, Soil Sci. Soc. *Tezisy dokladov II s'ezda Obshchestva pochvedov (27–30 iyunya 1996 g., Sankt-Peterburg). T. 1*. [Abstracts of II Conference of soil scientists society, St. Peterburg, 27–30 June 1996. Vol. 1.]. St. Petersburg, Saint Petersburg University, 1996. 453 p. (in Russian).
16. Loginov V. F., Mikutskiy V. S. *Climate change and its impact on various sectors of the economy: analytical report of the NAS of Belarus*. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus, Institute of Nature Management, 2013. 46 p. (in Russian).
17. Ermolaev S. V. *Influence of soil and weather conditions on forming of crop and potato nodule quality of different ripen time in Chuvash Republic*. Cheboksary, 2009. 21 p. (in Russian).
18. Chernykh N. A., Prasanna Djagat. Transformation of lead and cadmium compounds in different types of soil. *Vestnik Rosyiskogo universiteta druzhby narodov. Seriya Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2000, no. 4, pp. 82–88 (in Russian).
19. Sedykh V. A., Kashanskiy A. D., Himina E. G., Karaush P. Yu. The change in the mobility of heavy metals in sod-podzolic soils, depending on the degree of humus content and the application of high doses of organic fertilizers. *Izves-*

tiya Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii = *News of the Timiryazev Agricultural Academy*, 2011, vol. 3, pp. 17–25 (in Russian).

20. Measurement procedure MH 1497 2001. *Methods for determination of uranium in soils and aerosol filters*. Minsk, Belarusian State Institute of Metrology, 2001 (in Russian).

21. International Atomic Energy Agency. *Measurement of radionuclides in food and the environment*. Technical reports series no 295. Vienna, 1989. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/trs295_web.pdf.

22. Kidin V. V., Deryugin I. P., Kobzarenko V. I., Kulyukin A. N., Slipchik A. F., Valabuyeva V. F., Ladonin D. V. *Agricultural chemistry: practical course*. Moscow, Kolos-s Publ., 2008. 599 p. (in Russian).

23. Health standards 2.1.7.12-1-2004. *List of maximum permissible concentrations (MPC) and approximately permissible concentrations (APC) of chemical substances in soil*. Resolution of the Main state sanitary doctor of the Republic of Belarus no 28 from 25.02.2004. Minsk, 2004. 20 p. (in Russian).

24. Greenwood N. N., Earnshaw A. *Chemistry of the Elements*. Oxford, Butterworth, 1997. 1600 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-30414-6>

25. Gukalov V. N., Savich V. I., Belopukhov S. L., Shapkina O. A., Verkhoturov V. V. Information estimation of heavy metals status in soils. *Vestnik Altaiskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = *Bulletin of Altai State Agrarian University*, 2015, no. 5 (127), pp. 58-64 (in Russian).

26. Mench, M, Baize D, Mocquot B. Cadmium availability to wheat in five soil series from the Yonne district, Burgundy, France. *Environmental Pollution*, 1997, vol. 95, no. 1, pp. 93-103. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(96\)00078-4](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(96)00078-4)

27. Ilyin V. B. *Heavy metals in the "soil – plant" system*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1991. 151 p. (in Russian).

28. Golovaty S. E., Lukashenko N. K., Kovalevych Z. S. The content of migratory active forms of lead in sod-podzol and peat soils. *Ekologicheskii vestnik* = *Ecological Bulletin*, 2010, no. 3 (13), pp. 15–22 (in Russian).

29. Katz J. J., Seaborg G. T. Morss L. R. *The chemistry of the actinide elements*. Springer, Dordrecht, 1986. 525 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-4077-2>

Информация об авторах

Соколик Галина Андреевна – канд. хим. наук, зав. лаб. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sokolikga@mail.ru

Овсянникова Светлана Васильевна – канд. хим. наук, вед. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svetlanaosv@mail.ru

Попеня Марина Викторовна – науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: marine_p19@mail.ru

Середенко Светлана Владимировна – стажер мл. науч. сотрудника. Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: svetlana97sered@gmail.com

Information about the authors

Galina A. Sokolik – Ph. D. (Chemistry), Head of the Department. Belarusian State University (4, Nezavisimosti ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sokolikga@mail.ru

Svetlana V. Ovsiannikova – Ph. D. (Chemistry), Leading Researcher. Belarusian State University (4, Nezavisimosti ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svetlanaosv@mail.ru

Maryna V. Papenia – Researcher. Belarusian State University (4, Nezavisimosti ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: marine_p19@mail.ru

Sviatlana V. Seradzenka – Junior Researcher. Belarusian State University (4, Nezavisimosti ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: svetlana97sered@gmail.com