

ГЕАХІМІЯ
GEOCHEMISTRY

УДК: 504.53.054; 504.056:574; 502.58:574

Поступила в редакцию 31.01.2017
Received 31.01.2017

**Г. А. Соколик, С. В. Овсянникова, Е. В. Войникова,
М. В. Попеня, Т. Г. Иванова**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОДЕРЖАНИЕ В ПОЧВЕ КАДМИЯ,
СВИНЦА И УРАНА В ПОДВИЖНЫХ ФОРМАХ**

Аннотация. Установлен запас в почвах Cd, Pb и U в подвижных формах ($Me_{\text{подв}}$) после выдерживания почвенных образцов при определенной температуре в интервале от -18 до $+30$ °C. Показано, что в воздушно-сухих условиях запас $Cd_{\text{подв}}$ и $Pb_{\text{подв}}$ в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве увеличивался с ростом температуры до $+30$ °C, а в торфянистой почве – до $+15$ °C и незначительно сокращался при повышении температуры до $+30$ °C. При этом до $+15$ °C запас $U_{\text{подв}}$ в дерново-подзолистой почве не менялся, а в торфянистой возрастал, сокращаясь в обеих почвах при дальнейшем подъеме температуры до $+30$ °C.

Ключевые слова: тяжелые металлы, кадмий, свинец, уран, запас в почве тяжелых металлов в подвижных формах, температурный фактор

Для цитирования. Влияние температуры на содержание в почве кадмия, свинца и урана в подвижных формах / Г. А. Соколик [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2018. – Т. 54, № 1. – С. 87–95.

G. A. Sokolik, S. V. Ovsiannikova, K. V. Voinikava, M. V. Papenia, T. G. Ivanova

Belarusian State University, Minsk, Belarus

**INFLUENCE OF TEMPERATURE ON CADMIUM, LEAD AND URANIUM MOBILE
SPECIES CONTENT IN THE SOIL MEDIUM**

Abstract. The reserves of Cd, Pb and U in mobile forms (Me_{mob}) in the soils after keeping the soil samples at the fixed temperature in the range from -18 to $+30$ °C have been determined. It was established that in the air-dry conditions the reserves of Cd_{mob} and Pb_{mob} in the light loamy sod-podzol soil increased with increase of temperature up to $+30$ °C, and in peaty soil it was up to $+15$ °C with further insignificant decrease during subsequent temperature increase to $+30$ °C. At the same time, the reserve of U_{mob} did not change in the sod-podzol soil and increased in the peaty soil up to $+15$ °C and decreased in both soils during further increase of temperature up to $+30$ °C.

Keywords: heavy metals, cadmium, lead, uranium, stock of heavy metals in mobile forms in soil, temperature factor

For citation. Sokolik G. A., Ovsiannikova S. V., Voinikava K. V., Papenia M. V., Ivanova T. G. Influence of temperature on cadmium, lead and uranium mobile species content in the soil medium. *Vesti Natsyional'noi akademii nauk Belarusi. Seriya khimichnykh navuk=Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2018, vol. 54, no. 1, pp. 87–95 (In Russian).

Введение. Конец XX и начало XXI века характеризуются значительным увеличением числа природных и техногенных дестабилизирующих факторов, влияющих на состояние наземных экосистем. Среди антропогенных факторов особую роль играет загрязнение почв высокотоксичными тяжелыми металлами (ТМ), в том числе и такими, как кадмий (Cd) и свинец (Pb). Повышенные концентрации этих металлов в объектах окружающей среды могут приводить к подавлению деятельности различных биологических систем, снижению их устойчивости и продуктивности [1, 2]. К числу важнейших природных факторов, влияющих на состояние наземных экосистем и производство растительной продукции, относятся аномальные изменения метеорологических условий [3].

На территории Республики Беларусь аномальные изменения метеорологических условий наиболее сильно проявились в последние десятилетия. Весной, когда температура воздуха превышает $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ и начинается вегетация растений, нередко наблюдается резкое снижение температуры. Возвраты холодов и заморозков возможны до середины мая, иногда они бывают и в июне. В летний же период отмечено существенное повышение температуры воздуха, причем в последние годы наметилась тенденция к повышению температуры во второй половине лета. Важной особенностью изменения метеорологических условий является также изменение количества атмосферных осадков. В целом по сравнению с довоенным периодом на территории Беларуси наблюдается уменьшение количества атмосферных осадков примерно на 50–60 мм в год. При этом в отдельных регионах страны выделяются как зоны увеличения, так и зоны сокращения количества атмосферных осадков [3].

Изменения температуры и условий увлажнения существенно влияют на свойства почвы (теплопроводность, влагоемкость, водопроницаемость, кислотность, состояние гумуса и другие характеристики), определяющие условия произрастания сельскохозяйственных культур [4]. Следует ожидать, что изменения свойств почвенной среды повлияют и на формы нахождения присутствующих в почве природных и техногенных ТМ, в том числе и радиоактивных. Их содержание в области корневого питания растений в мобильных и усвояемых растениями формах может измениться, что неизбежно повлияет на интенсивность накопления ТМ сельскохозяйственными культурами, а значит, и на экологическое качество растительной продукции [5]. Оценка подобных изменений – важная научная и практическая задача, поскольку наряду с другими факторами конкурентоспособность на мировом рынке производимой растительной продукции определяется и ее экологическим качеством, которое существенно зависит от накопления ТМ в хозяйственно полезных частях растений.

Исследования по влиянию температуры на формы нахождения в почве и биологическую доступность ТМ естественного и антропогенного происхождения в Республике Беларусь практически не проводились, хотя результаты подобных исследований, несомненно, представляют интерес в научном и практическом отношении.

Большинство исследований было посвящено изучению влияния погодных условий на урожайность сельскохозяйственных культур [3, 6]. В последние годы в зарубежных странах начаты исследования по изучению влияния резких изменений погодных условий на характеристики почв, состояние и поведение ТМ в почве [7, 8]. Настоящая работа посвящена изучению влияния температуры почвенной среды на запас ТМ (Cd, Pb и U) в формах, определяющих доступность этих элементов растениям.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являлись образцы (0–20)-см слоев почв различного генезиса (легкосуглинистой разновидности дерново-подзолистого типа и торфянистой разновидности низинного торфяно-болотного типа), содержащие Cd, Pb и U естественного и антропогенного происхождения. Образцы почв были отобраны летом 2016 г. в Дрогичинском районе Брестской области и Минском районе Минской области. Образцы были тщательно перемешаны, высушены до воздушно-сухого состояния и просеяны через сито с диаметром отверстий 2 мм. Общее содержание в почвах органических компонентов ($\text{OK}_{\text{Г}}$), полную влагоемкость (ПВ), актуальную ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) и потенциальную (pH_{KCl}) ионообменную кислотность определяли по стандартным методикам [9, 10].

В лабораторных условиях были выполнены две серии экспериментов: с воздушно-сухими и предельно водонасыщенными почвенными образцами, которые выдерживали в течение трех недель при температурах, имитирующих условия (в том числе и экстремальные) в период вегетации растений, с последующим извлечением из почв Cd, Pb и U в подвижных формах ($\text{Me}_{\text{подв}}$). Эксперименты проводили в двукратной повторности с образцами почв без искусственного обогащения ТМ. Влажность почвенных образцов контролировали по их массе, в случае необходимости их дополнительно увлажняли.

Запас в почвах $\text{Me}_{\text{подв}}$ устанавливали методом химического фракционирования с использованием ацетатно-аммонийного буферного раствора (pH 4,8) при соотношении компонентов почва : раствор – 1:10. Почвенные образцы обрабатывали экстрагирующим раствором в течение

24 ч после доведения температуры почв до (20 ± 2) °С. Полученные экстракты пропускали через фильтр «синяя лента».

Содержание Cd, Pb, Ca и K в анализируемых пробах устанавливали методом атомно-абсорбционной спектрофотометрии на установке ZEEnit 700 с применением пламени смеси газов ацетилен–воздух для перевода исследуемого вещества в атомно-дисперсное состояние. Содержание в почвах урана определяли посредством радиохимического анализа с идентификацией радионуклидов альфа-спектрометром SOLOIST U0450 фирмы EG&G ORTEC, оснащенный детекторами 576 A-600 RV [11, 12].

Присутствующий в почвах уран был представлен в основном изотопами ^{238}U , ^{235}U и ^{234}U . Общее содержание урана в пробах оценивали по активностям ^{238}U и ^{234}U , поскольку вклад ^{235}U в суммарную активность был незначительным. При определении содержания урана в почвах анализировали не менее 4 параллельных проб.

Запас кадмия, свинца и урана в подвижных формах в воздушно-сухих образцах почв. Под элементами в подвижных формах подразумеваются элементы, способные поступать в почвенные растворы на границе с корневой системой растений. В процессе усвоения из почвы растениями элементов минерального питания корни растений выделяют в окружающую среду компоненты, увеличивающие кислотность почвенной среды и способствующие переводу присутствующих в почве элементов в растворимые и более доступные для растений химические формы [13, 14]. При этом в почвенном растворе на границе с корневой системой растений может увеличиваться концентрация не только питательных элементов, но и ТМ. Чем больше доля ТМ в подвижной форме от его общего содержания в почве, тем больше вероятность накопления ТМ в растительной продукции.

Подвижные формы Cd, Pb и U могут быть представлены простыми катионами, катионными, анионными, молекулярными комплексами с органическими и неорганическими составляющими почв и растворимыми продуктами гидролиза соединений этих элементов. Их состав зависит от окислительно-восстановительных условий, кислотности среды и присутствия комплексообразующих лигандов.

При хорошей аэрации в верхних слоях почв обычно формируется окислительная среда, и в таких условиях Cd и Pb находятся в степени окисления +2, а U – +6. Подвижная форма урана может быть представлена катионами уранила UO_2^{2+} и его комплексами с органическими кислотами неспецифического типа (янтарной, лимонной, яблочной и др.), относительно низкомолекулярными гумусовыми кислотами и анионами минеральных кислот, например: $[\text{UO}_2\text{Cl}]^+$, UO_2Cl_2 , UO_2SO_4 , UO_2CO_3 , $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_2]^{2-}$, $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ и др. Подвижный уран может быть представлен также простейшими гидролизными формами уранила ($[\text{UO}_2\text{OH}]^+$, $[\text{UO}_2(\text{OH})_2]^0$, $[\text{UO}_2(\text{OH})_3]^-$) и их растворимыми комплексами с компонентами почв. В кислой среде доминирующей формой урана (VI) является UO_2^{2+} , комплексы гидроксидов и фосфатов обнаруживают преимущественно в нейтральной среде, а карбонатные комплексы – при pH 7,5 и более [15].

Основные характеристики почвенных образцов приведены в таблице. Как видно из таблицы, изученные образцы органогенной торфянистой и минеральной легкосуглинистой почв по реакции среды близки к нейтральным ($\text{pH}_{\text{KCl}} > 5,5$). По влагоемкости (ПВ), содержанию органических компонентов (OK_{II}), кальция ($[\text{Ca}]$) и калия ($[\text{K}]$) образцы почв существенно отличались. Соответствующие показатели торфянистой почвы были выше, чем легкосуглинистой: ПВ – более чем в 2 раза, OK_{II} – в 6, $[\text{Ca}]$ – в 36 и $[\text{K}]$ – в 2 раза. В торфянистой почве содержалось больше Cd и Pb, чем в легкосуглинистой.

По действующим в Республике Беларусь гигиеническим нормативам [16] для почв сельскохозяйственного назначения предельно допустимая концентрация (ПДК) свинца составляет 32 мг/кг, а его подвижной формы ($\text{Pb}_{\text{подв}}$) – 6 мг/кг в расчете на абсолютно сухое вещество [17]. При этом ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) Cd не должна превышать 0,5 мг/кг для песчаных и супесчаных почв, 1 мг/кг для суглинистых и глинистых почв с pH_{KCl} менее 5 и 2 мг/кг для нейтральных и близких к ним суглинистых и глинистых почв с pH_{KCl} более 5,5. Величина ОДК для торфянистых почв не регламентируется. Для всех почв сельскохозяйственного назначения ПДК $\text{Cd}_{\text{подв}}$ составляет 0,5 мг/кг [17]. Содержание природного урана в почвах не нормируется.

Характеристики почвенных образцов

Characteristics of the soil samples

Почва	ОК _П , %	ПВ, %	pH _{KCl}	pH _{H₂O}	[Ca], мг/кг	[K], мг/кг	[Cd], мг/кг	[Pb], мг/кг	[U], Бк/кг
Дерново-подзолистая легкосуглинистая	4,25 ±	46,8 ±	6,80 ±	7,70 ±	183 ±	136,1 ±	0,307 ±	15,2 ±	34,4 ±
	0,06	1,2	0,05	0,05	10	1,1	0,006	0,3	2,1
Торфянистая	25,8 ±	105,4 ±	5,72 ±	5,99 ±	664 ±	219,0 ±	0,610 ±	19,8 ±	11,6 ±
	0,8	1,5	0,05	0,05	44	9,2	0,012	0,4	0,7

Примечание. ОК_П – общее содержание органических компонентов в почвенных образцах, % от массы абсолютно сухого вещества. ПВ – полная почвенная влагоемкость, % от массы абсолютно сухого вещества. pH_{KCl} и pH_{H₂O} – pH суспензии почвенного образца в растворе 1 моль/дм³ KCl и в дистиллированной воде. [Me] – общее содержание соответствующего металла в анализируемых образцах в расчете на абсолютно сухое вещество. [U] – удельная активность почвенных образцов по U в расчете на абсолютно сухое вещество.

Из полученных экспериментальных данных следует, что общее содержание Pb (15,2–19,8 мг/кг) и Cd (0,31–0,61 мг/кг) в изученных почвенных образцах было ниже установленных в Республике Беларусь гигиенических нормативов. По содержанию U образцы легкосуглинистой почвы втрое превосходили образцы торфянистой почвы.

В температурном интервале от –18 до +30 °C содержание Cd_{подв} в воздушно-сухих условиях в легкосуглинистой почве находилось в диапазоне от (0,088 ± 0,004) до (0,169 ± 0,005) мг/кг, а в торфянистой – от (0,212 ± 0,005) до (0,240 ± 0,008) мг/кг. Таким образом, в изученном температурном интервале содержание Cd_{подв} в почвах во всех случаях было ниже ПДК (0,5 мг/кг). При этом содержание Pb_{подв} в легкосуглинистой почве варьировало в пределах от (3,81 ± 0,07) до (6,11 ± 0,11) мг/кг, а в торфянистой почве – от (4,32 ± 0,12) до (5,73 ± 0,13) мг/кг.

Результаты определения относительного содержания Cd_{подв}, Pb_{подв} и U_{подв} в почвенных образцах после их выдерживания при различных температурах в воздушно-сухом состоянии приведены на рис. 1.

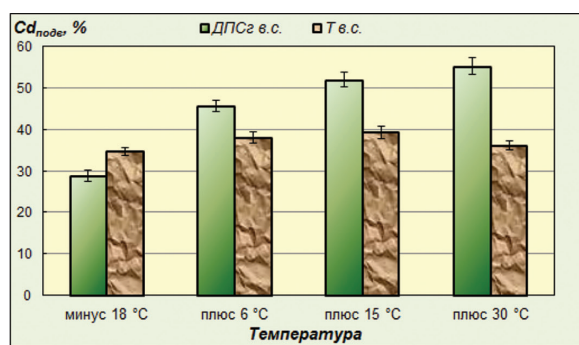
Относительное содержание Cd_{подв} и Pb_{подв} в легкосуглинистой почве увеличивалось при повышении температуры в диапазоне от –18 до +30 °C и достигало 55 и 40 % от общего содержания соответствующего ТМ в почве. При температуре +30 °C была отмечена максимальная концентрация Pb_{подв} в почве – (6,1 ± 1) мг/кг при общем содержании Pb – 15,2 мг/кг. Как уже отмечалось, согласно действующим в стране нормативам, ПДК для общего содержания Pb в почвах сельскохозяйственного назначения составляет 32 мг/кг, а для его подвижной формы – 6 мг/кг [17]. Следовательно, в воздушно-сухих условиях при температуре почвы +30 °C для Pb_{подв} было достигнуто ПДК при значительно более низком общем содержании Pb в почве, чем это регламентировано.

В воздушно-сухой торфянистой почве относительное содержание Cd_{подв} и Pb_{подв} увеличивалось с ростом температуры до +15 °C, достигнув уровней 36 и 25 % от общего содержания соответствующего элемента в почве. При дальнейшем повышении температуры до +30 °C содержание Cd_{подв} и Pb_{подв} сократилось на 8 и 14 % по сравнению с уровнями, достигнутыми при +15 °C.

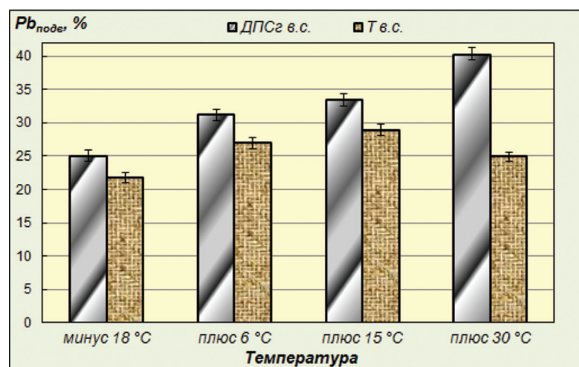
В температурном диапазоне от –18 до +30 °C содержание U_{подв} в воздушно-сухих условиях в легкосуглинистой почве находилось в пределах от (1,6 ± 0,2) до (2,7 ± 0,2) Бк/кг, а в торфянистой почве – от (0,87 ± 0,10) до (3,0 ± 0,02) Бк/кг.

Относительное содержание U_{подв} в почвах увеличивалось с ростом температуры от –18 до +15 °C и в целом в легкосуглинистой почве увеличилось примерно на 20 %, а в торфянистой – более чем вдвое. При дальнейшем повышении температуры до +30 °C относительное содержание U_{подв} сократилось по сравнению с уровнями, достигнутыми при +15 °C: в легкосуглинистой почве в 1,7 раза и в торфянистой – более чем в 3 раза.

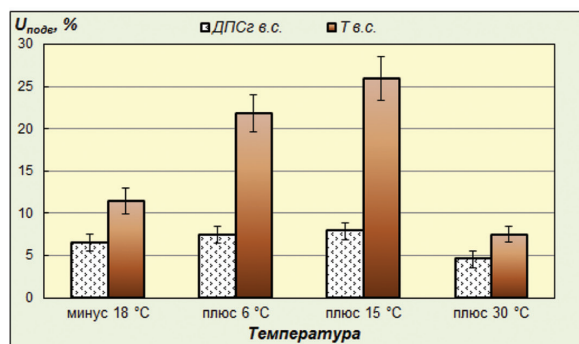
Увеличение с ростом температуры содержания Cd_{подв}, Pb_{подв} и U_{подв} в воздушно-сухих образцах почв можно объяснить повышением растворимости присутствующих в почвах соединений этих ТМ и увеличением интенсивности ионообменных процессов на границе твердая фаза почвы–почвенный поровый раствор. Сокращение их содержания в почвах при повышении температуры от +15 до +30 °C могло быть вызвано изменением структуры поверхности почвенных



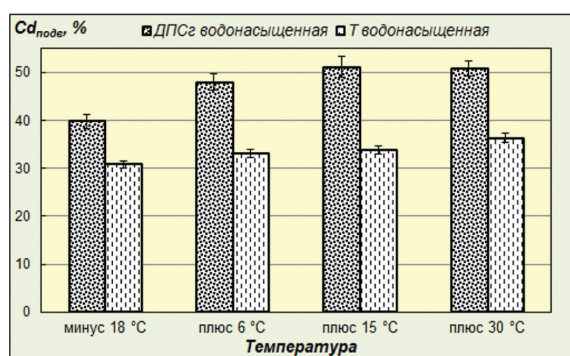
а



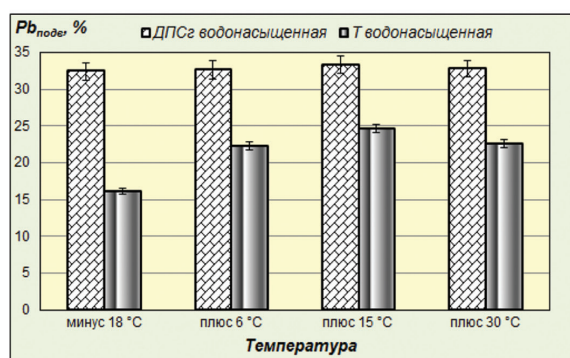
б



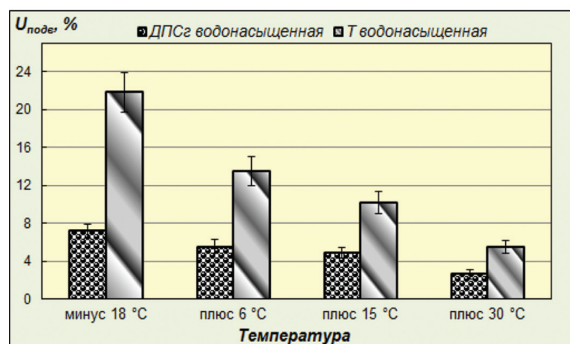
в



а



б



в

Рис. 1. Изменение относительного содержания Cd, Pb, и U в подвижной форме ($Me_{\text{подв}}$, %) в воздушно-сухих образцах дерново-подзолистой легкосуглинистой (ДПСг) и торфянистой (Т) почв в зависимости от температуры: а – $Cd_{\text{подв}}$; б – $Pb_{\text{подв}}$; в – $U_{\text{подв}}$

Fig. 1. Change in the relative content of Cd, Pb, and U in mobile form (Me_{mob} , %) in the air-dry samples of sod-podzol light loam (ДПСг) and peaty (Т) soils, depending on temperature: а – Cd_{mob} ; б – Pb_{mob} ; в – U_{mob}

Рис. 2. Изменение относительного содержания Cd, Pb, и U в подвижной форме ($Me_{\text{подв}}$, %) в водонасыщенных образцах дерново-подзолистой легкосуглинистой (ДПСг) и торфянистой (Т) почв в зависимости от температуры: а – $Cd_{\text{подв}}$; б – $Pb_{\text{подв}}$; в – $U_{\text{подв}}$

Fig. 2. Change in the relative content of Cd, Pb, and U in mobile form (Me_{mob} , %) in water-saturated samples of sod-podzol light loam (ДПСг) and peaty (Т) soils, depending on temperature: а – Cd_{mob} ; б – Pb_{mob} ; в – U_{mob}

агрегатов, и в большей степени было свойственно торфянистой почве. Подобные изменения влияют на процессы перехода элементов из твердой фазы почвы в почвенные растворы, причем в различной степени для ТМ разной химической природы.

Запас кадмия, свинца и урана в подвижных формах в водонасыщенных образцах почв.

В температурном интервале от -18 до $+30$ °C содержание $Cd_{\text{подв}}$ в водонасыщенных образцах легкосуглинистой почвы варьировало в пределах от $(0,122 \pm 0,003)$ до $(0,157 \pm 0,006)$ мг/кг, а в торфянистой – от $(0,188 \pm 0,003)$ до $(0,222 \pm 0,003)$ мг/кг. При этом содержание $Pb_{\text{подв}}$ в легкосуглинистой почве составляло от $(4,93 \pm 0,14)$ до $(5,06 \pm 0,14)$ мг/кг, а в торфянистой почве – от $(3,19 \pm 0,05)$ до $(4,88 \pm 0,06)$ мг/кг. Содержание $U_{\text{подв}}$ в водонасыщенных образцах легкосугли-

нистой почвы находилось в диапазоне от $(0,9 \pm 0,2)$ до $(2,5 \pm 0,2)$ Бк/кг, а в торфянистой почве – от $(0,64 \pm 0,07)$ до $(2,5 \pm 0,2)$ Бк/кг.

Результаты определения относительного содержания $Cd_{\text{подв}}$, $Pb_{\text{подв}}$ и $U_{\text{подв}}$ в почвенных образцах после их выдерживания при различных температурах в состоянии полного водонасыщения приведены на рис. 2.

Относительное содержание $Cd_{\text{подв}}$ в водонасыщенной легкосуглинистой почве увеличивалось с ростом температуры в диапазоне от -18 до $+15$ °С, а при последующем повышении температуры до $+30$ °С сохранялось на уровне, достигнутом при 15 °С (51 % от общего содержания Cd в почве). При этом относительное содержание $Pb_{\text{подв}}$ в почве в изученном температурном диапазоне с ростом температуры практически не менялось, сохраняясь на уровне 32 – 33 % от общего содержания Pb в почве, а относительное содержание $U_{\text{подв}}$ сокращалось, уменьшившись в целом от 7,2 % при -18 °С до 0,9 % при 30 °С.

В водонасыщенной торфянистой почве содержание $Cd_{\text{подв}}$ в почве с ростом температуры повышалось и при $+30$ °С достигло уровня 36 % от общего содержания Cd в почве. Относительное содержание $Pb_{\text{подв}}$ в почве также увеличивалось с ростом температуры, но лишь до $+15$ °С. При повышении температуры от -18 до $+15$ °С содержание $Pb_{\text{подв}}$ в почве выросло более существенно (на 53 %) по сравнению с $Cd_{\text{подв}}$ (на 10 %). При дальнейшем повышении температуры до $+30$ °С содержание $Pb_{\text{подв}}$ в почве снизилось на 8 %. Относительное содержание $U_{\text{подв}}$ в водонасыщенной торфянистой почве сокращалось по мере увеличения температуры во всем изученном температурном интервале и в целом уменьшилось на 75 % по сравнению с содержанием при -18 °С.

Сокращение с ростом температуры относительного содержания $U_{\text{подв}}$ в водонасыщенных почвах может быть связано с изменением окислительно-восстановительных условий в результате снижения содержания кислорода в заполненном водой почвенном поровом пространстве. Вследствие таких изменений возможно восстановление U (VI) до U (IV), причем степень восстановления возрастает по мере увеличения температуры. Соединения U (IV) отличаются более низкой растворимостью в воде по сравнению с соединениями U (VI), что может служить причиной сокращения содержания $U_{\text{подв}}$ при повышении температуры почв в условиях водонасыщения [20]. В отличие от U в природных условиях Cd и Pb могут находиться лишь в двухвалентном состоянии. Изменение окислительно-восстановительных условий в почвенной среде влияет на сорбцию Cd и Pb в почве лишь посредством изменения состояния соединений железа и марганца, сорбирующих эти ТМ [20].

Влияние температуры на запас в почвах кадмия, свинца и урана в подвижной форме.

Из анализа полученных экспериментальных данных следует, что изменение температурного режима почвы различным образом влияет на запас в почвенной среде $Cd_{\text{подв}}$, $Pb_{\text{подв}}$ и $U_{\text{подв}}$. Генетический тип почвы и химическая природа ТМ существенно влияют на их запас в почве в подвижной (условно биологически доступной) форме, а также на характер и степень его изменения в зависимости от температуры. При одинаковых условиях в изученном температурном интервале (от -18 до $+30$ °С) относительное содержание в рассмотренных почвах $Cd_{\text{подв}}$ (29 – 55 %) было выше, чем $Pb_{\text{подв}}$ (16 – 40 %). При этом в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве при положительных температурах относительное содержание $Cd_{\text{подв}}$ (46 – 55 %) и $Pb_{\text{подв}}$ (31 – 40 %) было выше, чем в торфянистой почве (31 – 38 и 22 – 29 %), что свидетельствует о меньшем закреплении Cd и Pb в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве.

Более высокая степень закрепления Cd и Pb в торфянистой почве, скорее всего, обусловлена высокой емкостью поглощения этой почвы по сравнению с емкостью поглощения дерново-подзолистой почвы. Определенную роль мог сыграть состав органического вещества почв разного генетического типа. В органическом материале органогенных почв, к которым принадлежит торфянистая почва, определяющую роль в закреплении ТМ играют гуминокислотные компоненты, способные образовывать с Cd и Pb малорастворимые и малоподвижные соединения. В составе же органического вещества дерново-подзолистых почв, наоборот, преобладают хорошо растворимые компоненты, в большей степени способствующие образованию подвижных элементоорганических соединений Cd и Pb по сравнению с торфянистой почвой [21].

Высокое относительное содержание $Cd_{\text{подв}}$ по сравнению с $Pb_{\text{подв}}$ может быть связано с меньшим влиянием органических компонентов на формы нахождения Cd в почвенной среде, состо-

яние которого в большей мере определяется неорганическими компонентами почвенного комплекса [22].

В отличие от $Cd_{\text{подв}}$ и $Pb_{\text{подв}}$ относительное содержание $U_{\text{подв}}$ в торфянистой почве во всех случаях было выше, чем в дерново-подзолистой легкосуглинистой. Скорее всего, это связано с особенностями химических свойств урана. Наряду с образованием комплексных соединений состояние и подвижность U в почвенной среде в большей степени по сравнению с Cd и Pb определяются окислительно-восстановительными условиями, процессом гидролиза и растворимостью образующихся продуктов. Причиной повышенного относительного содержания $U_{\text{подв}}$ в торфянистой почве могла быть более высокая кислотность этой почвы, что обусловило меньшую по сравнению с дерново-подзолистой почвой степень гидролиза соединений урана, сопровождающегося образованием малорастворимых продуктов.

Заключение. В результате проведенных исследований изучено влияние температуры на запас Cd , Pb и U в подвижных (условно биологически доступных) формах в образцах дерново-подзолистой легкосуглинистой и торфянистой почв в воздушно-сухих условиях и в состоянии водонасыщения. На основании полученных данных выявлены следующие закономерности:

- в воздушно-сухих условиях запас $Cd_{\text{подв}}$ и $Pb_{\text{подв}}$ в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве возрастает при повышении температуры от -18 до $+30$ °С, а в торфянистой почве – до $+15$ °С; при последующем увеличении температуры до $+30$ °С содержание $Cd_{\text{подв}}$ и $Pb_{\text{подв}}$ в торфянистой почве незначительно (на 3–4 %) сокращается;

- в воздушно-сухих условиях повышение температуры дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы способствует увеличению запаса $Cd_{\text{подв}}$ в большей степени, чем $Pb_{\text{подв}}$;

- с увеличением температуры в диапазоне от -18 до $+15$ °С содержание $U_{\text{подв}}$ в воздушно-сухих условиях возрастает и в суглинистой, и в торфянистой почве, а при последующем увеличении температуры почв до $+30$ °С снижается;

- при идентичных условиях относительное содержание в изученных почвах ТМ в подвижной форме уменьшается в ряду: $Cd > Pb > U$;

- в температурном диапазоне от -18 до $+30$ °С относительное содержание $Cd_{\text{подв}}$ и $Pb_{\text{подв}}$ в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве выше, чем в торфянистой. Это означает, что в легкосуглинистой почве в области корневого питания растений формируются условия, в большей степени способствующие накоплению Cd и Pb растительными культурами, чем в торфянистой почве;

- в воздушно-сухих условиях экстремальное повышение температуры до $+30$ °С приводит к увеличению запаса $Cd_{\text{подв}}$ и $Pb_{\text{подв}}$ в дерново-подзолистой легкосуглинистой почве, увеличивая опасность накопления этих ТМ в растительной продукции. При этом запас $Cd_{\text{подв}}$ в легкосуглинистой почве и $U_{\text{подв}}$ в обеих почвах сокращается, снижая опасность его накопления в растительных культурах, произрастающих на этих почвах.

Таким образом, впервые экспериментально установлено влияния температуры на запас кадмия, свинца и урана в подвижных формах в почвенном покрове, что позволяет выявить условия, способствующие переходу этих ТМ из почвы в растения. Полученные данные предназначены для решения конкретных задач, связанных с ограничением влияния резких колебаний температурных условий на накопление кадмия, свинца и урана растительными культурами.

Список использованных источников

1. Черных, Н. А. Экологический мониторинг токсикантов в биосфере / Н. А. Черных, С. Н. Сидоренко. – М. : Изд-во РУДН, 2003. – 430 с.
2. 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. / Вологодский гос. техн. ун-т ; редкол.: В. А. Шорин (отв. ред.) [и др.]. – Вологда, 2006. – С. 395–397.
3. Логинов, В. Ф. Опасные гидрометеорологические явления на территории Беларуси / В. Ф. Логинов, А. А. Волчек, И. Н. Шпока. – Минск : Белорус. наука, 2010. – 170 с.
4. Тезисы докладов II съезда Общества почвоведов (27–30 июня 1996 г., Санкт-Петербург) : в 2 т. / Рос. акад. наук, О-во почвоведов. – Санкт-Петербург : изд-во СПбГУ, 1996. – Т. 1. – 453 с.
5. Овчаренко, М. М. Подвижность тяжелых металлов в почве и доступность их растениям / М. М. Овчаренко // Аграрная наука. – 1996. – № 3. – С. 39–40.

6. Мансуров, В. В. Влияние погоды на урожай / В. В. Мансуров, А. А. Мелешин // Картофель и овощи. – 2000. – № 5. – С. 21–24.
7. Kovacheva, P. Physicochemical fractionation of americium, thorium, and uranium in Chernozem soil after sharp temperature change and soil drought / P. Kovacheva, S. Mitsiev, R. Djingova // Chemical Papers. – 2014. – Vol. 68, N 3. – P. 336–341.
8. Assessment of major and trace element bioavailability in vineyard soil applying different single extraction procedures and pseudo-total digestion / T. Miličević [et al.] // Chemosphere. – 2017. – Vol. 171. – P. 284–293.
9. Почвы. Метод определения обменной кислотности: ГОСТ 26484–85. – Введ. 01.07.1986. – Минск : Госстандарт, 1985. – 3 с.
10. Теория и практика химического анализа почв / под ред. Л. А. Воробьевой. – М.: ГЕОС, 2006. – 400 с.
11. МВИ. Методики определения урана в почвах и аэрозольных фильтрах : МН 1497–2001. – Минск : БелГИМ.
12. Measurement of radionuclides in food and the environment: a guidebook / IAEA, Vienna, 1989. – Technical reports series, N 295. – 182 p.
13. Федоров, А. А. Оценка содержания в почве элементов минерального питания, доступных растениям / А. А. Федоров // Агрохимия. – 2002. – № 3. – С. 15–22.
14. Фрид, А. С. Миграционная концепция доступности веществ почвы корням растений / А. С. Фрид // Агрохимия. – 1996. – № 3. – С. 29–37.
15. Diemann, C. Uran in Boden und Wasser / C. Diemann, J. Utermann. – Dessau–Roßlau : Umweltbundesamt, 2012. – 24 p.
16. Нормативы предельно допустимых концентраций подвижных форм никеля, меди и валового содержания свинца в землях (включая почвы), расположенных в границах населенных пунктов, для различных видов территориальных зон по преимущественному функциональному использованию территорий населенных пунктов : Прилож. к постановлению М-ва здравоохранения Респ. Беларусь № 125 : утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 19.11.2009 : введ. 11.12.2009. – Минск : Минздрав, 2009.
17. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве : ГН 2.1.7.12–1–2004 : утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Респ. Беларусь 25.02.04 : введ. 6.10.04. – Минск : Минздрав, 2004.
18. Гигиенические нормативы. Предельно допустимые концентрации (ПДК) подвижных форм цинка, хрома, кадмия в почвах (землях) различных функциональных зон населенных пунктов, промышленности, транспорта, связи, энергетики, обороны и иного назначения : утв. М-вом здравоохранения Респ. Беларусь 06.11.2008. : введ. 06.11.2008. – Минск : Минздрав, 2008.
19. Химия актиноидов : в 3 т / под ред. Дж. Каца [и др.]; пер. с англ. – М. : Мир, 1991. – 525 с. – 3 т.
20. Андруз, Дж. Введение в химию окружающей среды / Дж. Андруз [и др.]; пер. с англ. – М. : Мир, 1999. – 271 с.
21. Орлов, Д. С. Гумусовые кислоты почвы. Общая теория гумификации / Д. С. Орлов. – М. : МГУ, 1990. – 325 с.
22. Головатый, С. Е. Тяжелые металлы в агро системах / С. Е. Головатый. – Минск : Ин-т почвоведения и агрохимии, 2002. – 239 с.

References

1. Chernykh N. A., Sidorenko S. N *Ecological monitoring of toxins in biosphere*. Moscow, Publ. Russian University of Peoples' Friendship, 2003. 430 p. (in Russian).
2. Vasil'tsova A. V. (et. al.) The heavy metals in components of ecosystems. *Vuzovskaya nauka – regionu : materialy IV Vseros. nauchno-tekhn. konf., Vologda, 21 fevr. 2006 g.* [University science – to the region: materials of IV Vseros. scientific and technical. Conf., Vologda, Feb. 21. 2006]. Vologda, Vologda State Technical University, 2006, pp. 395–397 (in Russian).
3. Loginov V. F., Volchek A. A., Shpoka I. N. *Dangerous hydrometeorological phenomena at the territory of Belarus*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 170 p. (in Russian).
4. Russian Academy of Science, Soil sci. soc *Tezisy dokladov II s'ezda Obshchestva pochvedovedov (27–30 iyunya 1996 g., Sankt-Peterburg)*. T. 1 [Abstracts of II Conference of soil scientists' society, St. Petersburg, 27–30 June 1996. Vol. 1]. St. Petersburg, Publ. Saint Petersburg University, 1996. 453 p. (in Russian).
5. 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).
6. 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).
7. Kovacheva P., Mitsiev S., Djingova R. Physicochemical fractionation of americium, thorium, and uranium in Chernozem soil after sharp temperature change and soil drought. *Chemical Papers*, 2014, vol. 68, no 3, pp. 336–341. Doi: 10.2478/s11696–013–0457–y
8. Miličević T., Relić D., Škrivanj S., Tešić Ž., Popović A. Assessment of major and trace element bioavailability in vineyard soil applying different single extraction procedures and pseudo-total digestion. *Chemosphere*, 2017, vol. 171, pp. 284–293. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2016.12.090
9. State Standard 26484–85. *Soils. Method for determination of exchangeable acidity*. Minsk, Statesdandard Publ., 1985. 3 p. (in Russian).
10. Vorobyova L. A. (ed.). *The theory and practice of chemical analysis of soils*. Moscow, GEOS Publ., 2006. 400 p. (in Russian).
11. MVI. *Procedures of uranium determination in soils and aerosol filters*. MN 1497–2001. Minsk, Belarusian State Institute of Metrology, 2001 (in Russian).

12. *Measurement of radionuclides in food and the environment: a guidebook*. Vienna, IAEA, 1989, Technical reports series, no. 295. 182 p.
13. Fedorov A. A. *Evaluation of content of the mineral supply elements available for plants*. *Agrokhimiya = Agricultural Chemistry*, 2002, no. 3, pp. 15–22 (in Russian).
14. Frid A. S. *Migration concept of substances availability for roots of plants*. *Agrokhimiya = Agricultural Chemistry*, 1996, no. 3, pp. 29–37 (in Russian).
15. Diemann C., Utermann J. *Uran in Boden und Wasser* [Uranium in soil and water]. Dessau–Roßlau, Umweltbundesamt, 2012. 24 p. (in German).
16. *Norms of maximum permissible concentrations of nickel and copper mobile forms and total content of lead in grounds (including soils) located within settlement's boundaries, for different types of the territory zones according to the prevalence functional use of the settlement's territories. Appendix to Resolution of Ministry of public health of the Republic of Belarus No 125 from 19.11.2009*. Minsk, Ministry of Health, 2009.
17. *The hygienic norms 2.1.7.12–1–2004 "List of maximum permissible concentrations (MPC) and approximate 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, Ministry of Health, 2004.
18. *The hygienic norms "The maximum permissible concentrations (MPC) of mobile forms of chromium, zinc and cadmium in soils (grounds) of different functional zones of settlements, industry, transport, communication, energetics, defense and another purpose"*. Resolution of Ministry of public health of the Republic of Belarus No 187 from 06.11.2008. Minsk, Ministry of Health, 2008.
19. Katz J. J., Seaborg G. T., Morss L. R. *Chemistry of the actinide elements*. Springer, Dordrecht, 1986. 1781. Doi: 10.1007/978-94-009-3155-8
20. Andrews J. E., Brimblecombe P., Jickells T. D., Liss P. S. *An Introduction to Environmental Chemistry*. Oxford (Blackwell), 1996. 209 p.
21. Orlov D. S. *The humus acids of soil. The general theory of humification*. Moscow, Lomonosov Moscow State University, 1990. 325 p. (in Russian).
22. Golovaty S. E. *Heavy metals in agrosystems*. Minsk, Rep. unitary. Institute of Soil Science and Agrochemistry, 2002. 239 p. (in Russian).

Інфармацыя аб аўтарах

Соколик Галина Андреевна – канд. хім. навук, зав. лаб. радыяхіміі, Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт (пр. Незавіскасці, 4, 220030, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: sokolikka@mail.ru

Овсянникова Светлана Васильевна – канд. хім. навук, вед. науч. супрацоўнік, Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт (пр. Незавіскасці, 4, 220030, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: svetlanaosv@mail.ru

Войникова Екатерина Викторовна – науч. супрацоўнік, Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт (пр. Незавіскасці, 4, 220030, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: grehem@mail.ru

Попеня Марина Викторовна – науч. супрацоўнік, Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт (пр. Незавіскасці, 4, 220030, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: marine_p19@mail.ru

Иванова Тамара Георгиевна – ст. науч. супрацоўнік, Беларускі дзяржаўны ўніверсітэт (пр. Незавіскасці, 4, 220030, Мінск, Рэспубліка Беларусь). E-mail: ronnie200824@yandex.ru

Information about the authors

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

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

Katsiaryna V. Voinikava – Researcher, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grehem@mail.ru

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

Tamara G. Ivanova – Senior researcher, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ronnie200824@yandex.ru