ГЕАХІМІЯ

УДК 574::539.1.04 + 539.16/.17

Г. А. СОКОЛИК, С. В. ОВСЯННИКОВА, М. В. ПОПЕНЯ, Е. В. ВОЙНИКОВА, Т. Г. ИВАНОВА

ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМ НАХОЖДЕНИЯ И ПОДВИЖНОСТИ КАДМИЯ, СВИНЦА И УРАНА В ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТЫХ ПОЧВАХ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВНЕСЕНИЯ БИОУГЛЯ

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь, e-mail: sokolikga@mail.ru

Методом химического фракционирования изучено изменение запаса Cd, Pb и U в обменной (обратимо сорбированной) и подвижной (условно биологически доступной) формах в песчаной и супесчаной разновидностях почв дерново-подзолистого типа после добавления 1–5 мас.% биоугля. Установлено, что к заметному снижению запаса Cd, Pb и U в формах, определяющих их подвижность и биологическую доступность растениям, при сохранении благоприятных условий для выращивания сельскохозяйственных культур может приводить внесение в супесчаные почвы биоугля в дозе 3 мас.%, а в песчаные – 3–5 мас.%.

Ключевые слова: обменная и подвижная формы кадмия, свинца и урана в почве, влияние биоугля на формы нахождения химических элементов в почвенной среде.

G. A. SOKOLIK, S. V. OVSIANNIKOVA, M. V. POPENIA, K. V. VOINIKAVA, T. G. IVANOVA

CHANGES IN SPECIES AND MOBILITY OF CADMIUM, LEAD AND URANIUM IN SOD PODZOL SOILS AFTER BIOCHAR APPLICATION

Belarusian State University, Minsk, Belarus, e-mail: sokolikga@mail.ru

By the chemical fractionation method, the effect of 1–5 w. % of biochar addition to sandy and sandy-loam sod podzol soils on the Cd, Pb and U reserves in exchangeable (sorbed reversibly) and mobile (conditionally bioavailable) forms has been investigated. It has been found that, under conditions favorable for growing of agricultural plants, an essential decrease of Cd, Pb and U reserves in forms determining their mobility and availability in sandy soils could be caused by 3–5 w. % of biochar, but in sandy-loam soils it can be obtained with 3 w. % of biochar.

Keywords: exchangeable and mobile forms of cadmium, lead and uranium in soil, influence of biochar on the chemical element species in the soil medium.

Введение. Постоянное увеличение объемов органических отходов заставляет многие страны инициировать и финансировать проекты, связанные с разработкой экологически безопасных процессов переработки биомассы для получения полезных продуктов. К числу таких продуктов относится и биоуголь (biochar), который представляет собой обогащенный углеродом материал, получаемый путем относительно низкотемпературного (180–500 °С) пиролиза биомассы естественного и искусственного происхождения при ограниченном доступе кислорода. В процессе обработки из биомассы извлекается влага и летучие вещества, образующиеся при частичном разложении целлюлозы и лигнина. В результате масса исходного органического материала уменьшается, углерод переходит в состав устойчивых ароматических соединений, а его относительное содержание в конечном продукте увеличивается [1, 2].

В последние десятилетия биоуголь привлекает все более пристальное внимание исследователей как один из перспективных видов веществ, способных улучшать сельскохозяйственные угодья. Благодаря высокой пористости биоуголь улучшает структуру почв, изменяя ее объемную плотность, распределение пор и размер почвенных агрегатов. Кроме того, он задерживает в почве влагу и предотвращает вымывание удобрений, накапливая элементы питания в формах, доступных для корневых систем растений. Биохимические и микробиологические процессы, протекающие в присутствии биоугля, обеспечивают формирование в почве условий, способствующих усвоению растениями питательных веществ и повышению урожайности сельскохозяйственных культур. Внесение биоугля в почву сокращает выбросы в окружающую среду закиси азота и метана и обеспечивает долговременное изъятие значительной части углерода из обменного резервуара [2–5]. Мировой потенциал подобного секвестирования углерода оценивают в 1 Гт углерода в год [5], что приблизительно соответствует 1/8 глобальной эмиссии CO_2 в результате сжигания ископаемых видов топлива в 2006 г. [6].

Несмотря на многие положительные эффекты до сих пор не ясно, как внесение биоугля в почву влияет на физико-химическое состояние, миграционную способность и биологическую доступность присутствующих в почве тяжелых металлов (ТМ) и радионуклидов естественного и техногенного происхождения.

Настоящая работа посвящена изучению влияния биоугля на формы нахождения в почве ТМ (Cd, Pb, U), определяющие их подвижность и биологическую доступность сельскохозяйственным растениям.

Объекты и методы исследования. Объектами исследования являлись образцы (0–20)-см слоев песчаных и супесчаных разновидностей почв дерново-подзолистого типа и биоуголь в порошкообразном состоянии из отходов древесины дуба, ясеня, граба и березы. Именно (0–20)-см слой почвы рекомендуется условно рассматривать в качестве корнеобитаемого при оценке коэффициентов накопления и перехода ТМ и радионуклидов из почвы в сельскохозяйственные культуры [7].

Образцы почв были отобраны методом конверта в 2012 г. в Браславском районе Витебской области с помощью металлического бура. После стандартной подготовки почв к исследованию были определены их характеристики: общее содержание органических компонентов, полная влагоемкость, ионообменная кислотность, содержание Ca и K в обменной форме, общее содержание Cd, Pb и U. Были изучены также и основные характеристики биоугля [8].

Запас в почвенных образцах Cd, Pb, U, Ca и K в обменной (обратимо сорбированной) форме определяли посредством экстрагирования элементов раствором ацетата аммония (1 моль/дм^3) при pH, соответствующем pH_{KCl} почвенной среды, а в подвижной (условно биологически доступной) форме – раствором ацетатного буфера при pH 4,6. Образцы почв обрабатывали экстрагирующим раствором при соотношении масс почва–раствор 1 : 10 в течение 24 ч с периодическим перемешиванием почвенных суспензий. Жидкие фазы отделяли от почвенных остатков фильтрованием через бумажные фильтры «синяя лента».

Эксперименты проводили в лабораторных условиях с образцами почв, содержащими природный уран, которые были искусственно обогащены Cd и Pb до уровней ~4,8 и 120 мг/кг соответственно. После добавления водных растворов азотнокислых солей Cd и Pb почвенные образцы тщательно перемешивали и выдерживали в течение месяца при температуре (18 ± 2) °С и влажности (70 ± 5) %. Через месяц в исследуемые почвы вносили различные дозы биоугля. Образцы почв с добавками биоугля и контрольные образцы без биоугля выдерживали в одинаковых условиях в течение заданного времени (от 1 до 6 месяцев). Влажность почвенных образцов контролировали по их массе, в случае необходимости почвы дополнительно увлажняли.

Следует отметить, что в процессе выдерживания почвенных образцов во влажном состоянии для создания условий, благоприятных для роста и развития растений, характеристики почв могут меняться не только под влиянием биоугля, но и в результате протекания микробиологических процессов. Поэтому изучаемые показатели в почвах с добавками биоугля сравнивались с соответствующими показателями контрольных почвенных образцов без биоугля, которые выдерживались в таких же условиях. Все экстракционные эксперименты проводили с двумя пробами каждой почвы с биоуглем и с двумя контрольными почвенными пробами без биоугля.

Концентрации Cd, Pb, Ca и K в почвах и почвенных экстрактах устанавливали методом атомно-адсорбционной спектрометрии на установке ZEEnit 700 с использованием пламени смеси газов ацетилен – воздух для перевода исследуемого вещества в атомно-дисперсное состояние. Содержание урана в почвах и почвенных растворах определяли посредством радиохимического анализа с идентификацией радионуклидов альфа-спектрометром SOLOIST U0450 фирмы EG&G ORTEC, оснащенным детекторами 576 A-600 RV [9, 10]. Запас в почве каждого из ТМ (Cd, Pb, U) в обменной или подвижной форме оценивали по среднему количеству элемента, перешедшего из почвы в раствор соответствующего экстрагента, и выражали в процентах от его общего содержания в почвенном образце.

Присутствующие в анализируемых почвах альфа-излучающие изотопы урана были представлены ^{238}U, ^{235}U и ^{234}U. Из-за незначительного вклада ^{235}U в суммарную активность содержащихся в почвах изотопов общее содержание урана в образцах почв оценивали по средним активностям $^{234+238}U$ (A_U), установленным по результатам радиохимического анализа не менее 4 параллельных проб каждой почвы.

Формы нахождения ТМ в дерново-подзолистых почвах в зависимости от содержания биоугля. ***Обменные и подвижные формы Cd, Pb и U в почвах без добавления биоугля.*** Под элементами в обменной форме подразумеваются элементы, обратимо связанные с компонентами твердой фазы почвенного комплекса и способные поступать в почвенные воды. Обменная форма ТМ может быть представлена простыми катионами, их комплексами (катионными, анионными, молекулярными) с органическими и неорганическими компонентами почв, а также растворимыми продуктами гидролиза соединений ТМ, состав которых зависит от окислительно-восстановительных условий, pH среды и присутствия комплексообразующих лигандов.

В верхних хорошо аэрируемых горизонтах почв, где обычно формируется окислительная среда, Cd и Pb находятся в степени окисления +2, а U – преимущественно в степени окисления +6. В таких условиях обменная форма урана может быть представлена катионами уранила UO_2^{2+} и его комплексами с органическими кислотами типа янтарной, лимонной, яблочной и др., относительно низкомолекулярными гумусовыми кислотами и анионами минеральных кислот ($[UO_2Cl]^+$, UO_2Cl_2, UO_2SO_4, UO_2CO_3, $[UO_2(CO_3)_2]^{2-}$, $[UO_2(CO_3)_3]^{4-}$ и др.). Обменный уран может быть также представлен простейшими гидролизными формами уранила ($[UO_2OH]^+$, $[UO_2(OH)_2]^0$, $[UO_2(OH)_3]^+$) и их растворимыми комплексами с компонентами почв [11, 12]. В кислой среде доминирующей формой урана является UO_2^{2+}, комплексы гидроксидов и фосфатов обнаруживают преимущественно в нейтральной среде, а карбонатные комплексы преобладают в щелочных условиях при pH 7,5 и более [13].

Согласно современным представлениям элементы в подвижной форме находятся в почве на границе с корневой системой растений, где кислотность почвенной среды повышена благодаря специфике физиологии растений. Через свои корневые системы растения выделяют в окружающую среду компоненты, способствующие переводу присутствующих в почве элементов питания в растворимые и более доступные для растений химические формы [14, 15]. При этом в почвенном растворе вблизи корневой системы растений может увеличиваться концентрация не только биогенно значимых макро- и микроэлементов, но и ТМ, хотя далеко не все из этих дополнительно поступающих в почвенный раствор ТМ могут усваиваться растениями.

Наиболее мобильны и потенциально наиболее доступны растениям ТМ, присутствующие в почве в водорастворимой форме и слабоадсорбированные компонентами почвенного комплекса, которые вместе и составляют обменную форму элементов. В свою очередь обменная форма элемента является частью его подвижной формы. В целом от содержания в почве ТМ в обменной форме зависит интенсивность его перераспределения в почвенной среде и в значительной мере биологическая доступность растениям. Чем больше в почве доля элемента в обменной форме при одинаковом содержании в подвижной форме, тем больше вероятность его поступления в растения. Литературные источники свидетельствуют, что содержание урана в почве в обменной форме тесно коррелирует с корневым поступлением в растения, поэтому его запас в почве в обменной форме может использоваться для прогнозирования накопления растительностью [16]. Поступление других элементов в растительность может тесно коррелировать с их содержанием в почве в подвижной форме [14]. Отмеченные особенности поведения ТМ могут быть связаны с различием между механизмами миграции элементов разной химической природы через границу почвенный раствор–корневая система растения. Исходя из вышеизложенного, целесообразно рассматривать запас в почве ТМ и в обменной, и в подвижной формах, что позволяет более корректно оценивать их миграционные возможности.

Основные характеристики изученных образцов почв дерново-подзолистого типа приведены в таблице. Отношение активностей ^{238}U и ^{234}U в почвах равно 1,0.

Характеристики образцов почв и биоугля

ОК, %	$ПВ_П$, %	pH_{KCl}	$[Ca_{обм}]$, мг/кг	$[K_{обм}]$, мг/кг	[Cd], мг/кг	[Pb], мг/кг	A_U, Бк/кг
Образец супесчаной почвы (ДПСп)							
3,47 ± 0,24	40,2 ± 1,1	5,79 ± 0,10	1 406 ± 27	215,9 ± 7,3	0,37 ± 0,04	5,94 ± 0,30	11,50 ± 0,40
Образец песчаной почвы (ДПП)							
2,00 ± 0,18	36,6 ± 1,5	4,63 ± 0,02	352 ± 11	43,4 ± 1,9	0,32 ± 0,04	2,94 ± 0,22	8,86 ± 0,16
Образец биоугля							
97,4 ± 0,6	305 ± 7	8,50 ± 0,05	2 830 ± 90*	2 851 ± 34*	0,095 ± 0,001	0,286 ± 0,003	0,17 ± 0,03

Примечание. ОК – общее содержание органических компонентов в анализируемых образцах, % от массы абсолютно сухого вещества. ПВ – полная влагоемкость образца, % от массы абсолютно сухого вещества. pH_{KCl} – pH суспензии анализируемого образца в растворе 1 моль/дм^3 KCl. [Me] – общее содержание соответствующего металла в анализируемых образцах в расчете на абсолютно сухое вещество. $[Me_{обм}]$ – содержание Ca и K в обменной форме в расчете на абсолютно сухое вещество для почвенных образцов; * – общее содержание Ca и K в расчете на абсолютно сухое вещество для биоугля.

Запас ТМ в обменной форме ($Me_{обм}$) в образцах песчаной и супесчаной почв без добавления биоугля, установленный по результатам селективного экстрагирования элементов через два месяца после обогащения почв Cd и Pb, приведен на рис. 1, а в подвижной форме – на рис. 2. Из данных, приведенных на рис. 1, следует, что по относительному содержанию в почвах Cd, Pb и U в обменной форме изученная песчаная почва (73, 54, 2,9 %) превосходит супесчаную почву (29, 7,2, 0,7 %): по Cd – в 2,5 раза, Pb – в 7,5 и U – в 4 раза. Подобные различия могут быть связаны с более высокой ионообменной кислотностью песчаной почвы (pH_{KCl} – 4,6) по сравнению с супесчаной (pH_{KCl} – 5,8).

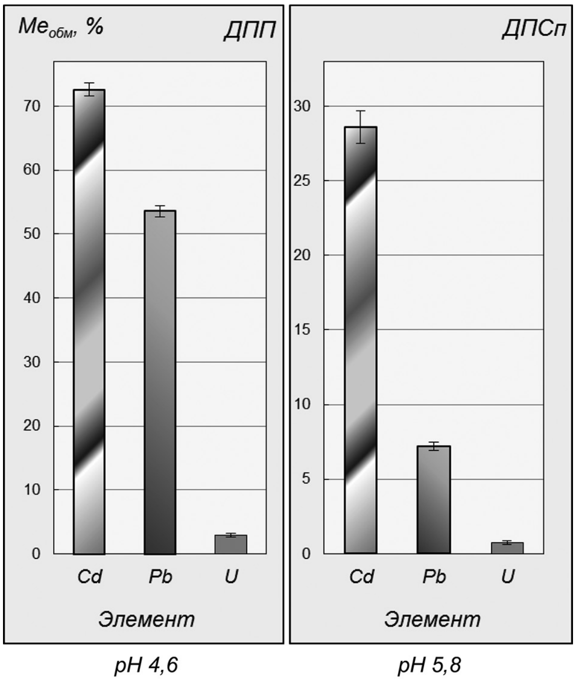


Рис. 1. Относительное содержание Cd, Pb и U в обменной форме ($Me_{обм}$, %) в образцах песчаной (ДПП) и супесчаной (ДПСп) почв без добавления биоугля через 2 месяца после внесения Cd и Pb

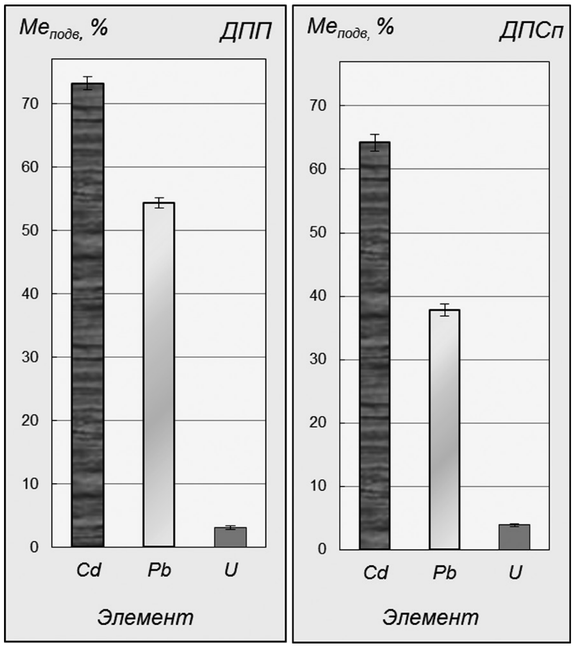


Рис. 2. Относительное содержание Cd, Pb и U в подвижной форме ($Me_{подв}$, %) в образцах песчаной (ДПП) и супесчаной (ДПСп) почв без биоугля через 2 месяца после внесения Cd и Pb

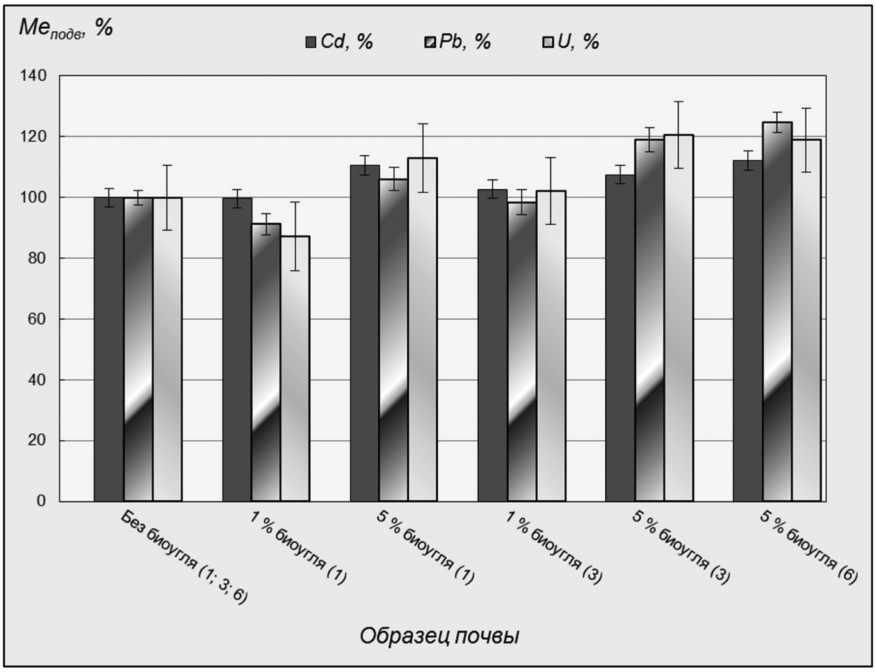


Рис. 3. Изменение запаса Cd, Pb и U в подвижной форме ($Me_{подв}$, %) в результате внесения биоугля в супесчаную почву относительно контрольных образцов без биоугля: через 1 (*1*); через 3 (*3*) и через 6 (*6*) месяцев после добавления биоугля

Анализируемые почвы отличались и по содержанию ТМ в подвижной форме ($Me_{подв}$), однако менее существенно по сравнению с их содержанием в обменной форме. Запас Cd, Pb и U в подвижной форме в песчаной почве составлял 74, 54 и 3,1 %, а в супесчаной – 64, 38 и 3,9 % от общего содержания соответствующего элемента в почве. Практически одинаковый запас в песчаной почве ТМ в обменной и подвижной формах, скорее всего, связан с ее высокой кислотностью (pH_{KCl} – 4,6), что обусловило близкие условия извлечения элементов в этих формах (сходный химический состав и совпадение pH экстрагирующих растворов).

Полученные данные по формам нахождения ТМ в почвах хорошо согласуются с результатами определения Cd и Pb в подвижной форме в регионах со значительными уровнями техногенного загрязнения почвенного покрова [17].

В соответствии с относительным содержанием ТМ в обменной и подвижной формах их способность к перераспределению и биологическая доступность растениям в изученных почвах уменьшается в ряду: Cd – Pb – U.

Изменение в почвах запаса Cd, Pb и U в подвижной форме после добавления биоугля. Основные химические характеристики биоугля приведены в таблице. Запас в почве Cd, Pb и U в подвижной форме установлен по среднему количеству каждого элемента, перешедшего из почвы в раствор ацетатного буфера при pH 4,6. Приняв содержание каждого из ТМ в подвижной форме в контрольных образцах почвы без добавления биоугля за 100 %, можно проследить, как изменяется относительный запас элементов в этой форме в результате внесения различных доз биоугля (рис. 3).

Из полученных данных следует, что после внесения в образцы супесчаной почвы 1 и 5 мас.% биоугля в течение всего периода наблюдения (до 6 месяцев) существенных изменений в содержании $Cd_{подв}$ не отмечалось. После внесения в почву 1 мас.% биоугля запас $Cd_{подв}$ оставался таким же, как в контрольных образцах, а после добавления 5 мас.% увеличился не более чем на 12 % по сравнению с контролем.

Запас $Pb_{подв}$ в почве через месяц после добавления 1 мас.% биоугля сократился на 9 %, а через 3 месяца сохранился на уровне контрольной почвы. При дозе 5 мас.% биоугля содержание $Pb_{подв}$ в почве варьировало в большей степени, чем $Cd_{подв}$. Через месяц после добавления биоугля запас $Pb_{подв}$ увеличился только на 6 %, через 3 месяца – на 19 %, а через 6 месяцев – почти на 25 % по сравнению с контролем.

Изменения в супесчаной почве запаса $U_{подв}$ и через 6 месяцев после внесения биоугля не выходили за пределы неопределенностей установленных величин, даже для максимальной дозы биоугля 5 мас.%.

В песчаной почве запас Cd и Pb в подвижной форме через 1–2 месяца после добавления 3 мас.% биоугля практически не изменился, а после внесения 5 мас.% биоугля немного сократился на 7–14 % по сравнению с контрольной почвой, при этом запас $U_{подв}$ снизился на 50 % и более.

Изменение в почвах запаса Cd, Pb и U в обменной форме после добавления биоугля. Содержание в почве Cd, Pb и U в обменной форме определялось по количеству каждого из ТМ, перешедшему из почвы в водный раствор ацетата аммония (1 моль/дм^3) при pH почвенной среды.

В ходе исследования было показано, что добавка 1 мас.% биоугля слабо повлияла на агрохимические свойства почв, а добавка 5 мас.% приводила к смещению показателей pH_{H_2O} и pH_{KCl} супесчаной почвы соответственно до 7,8 и 7,3. Подобное смещение может неблагоприятно сказаться на развитии сельскохозяйственных растений. Кроме того, внесение 5 мас.% биоугля в супесчаную почву привело к заметному (до 25 %) увеличению запаса Pb в подвижной форме по сравнению с контролем. Полагая, что промежуточная доза биоугля 3 мас.% в меньшей степени увеличит pH супесчаной почвы, именно эта доза биоугля была выбрана для изучения влияния биоугля на содержание в почвах ТМ в обменной форме.

Экспериментальные данные по изменению содержания Cd, Pb и U в обменной форме после внесения 3 мас.% биоугля в образцы песчаной и супесчаной почв приведены на рис. 4. Через месяц после внесения биоугля в песчаную почву запас $Cd_{обм}$ сократился в среднем на 36 % по сравнению с контролем и остался примерно на таком же уровне через 2 месяца после добавления биоугля. При этом запас $Cd_{обм}$ в супесчаной почве снизился на 23 и 26 %.

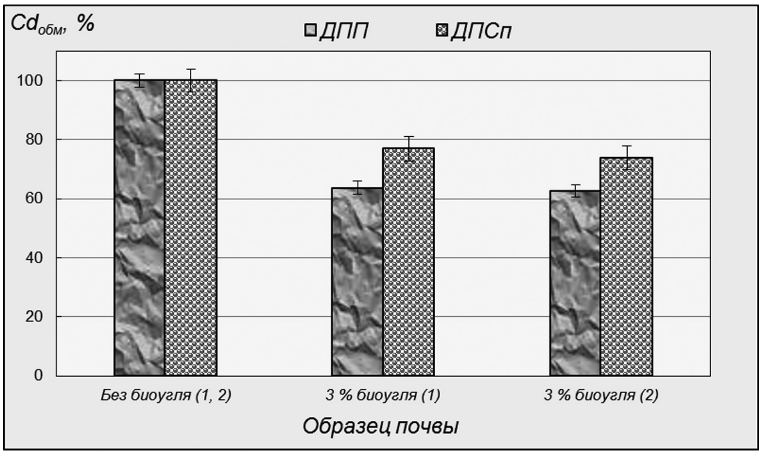
Запас $Pb_{обм}$ в песчаной почве через месяц после внесения биоугля уменьшился на 43 % по сравнению с контрольными образцами и практически не изменился через 2 месяца после добавления биоугля. Запас $Pb_{обм}$ в супесчаной почве после добавления биоугля сократился соответственно на 32 и 35 %.

В песчаной почве запас $U_{обм}$ через месяц после добавления биоугля сократился вдвое по сравнению с контролем и этот эффект сохранился через 2 месяца после его внесения. В супесчаной почве влияние биоугля проявилось в небольшой степени, запас $U_{обм}$ за 2 месяца после добавления биоугля уменьшился лишь на 17–18 % по сравнению с контрольными образцами.

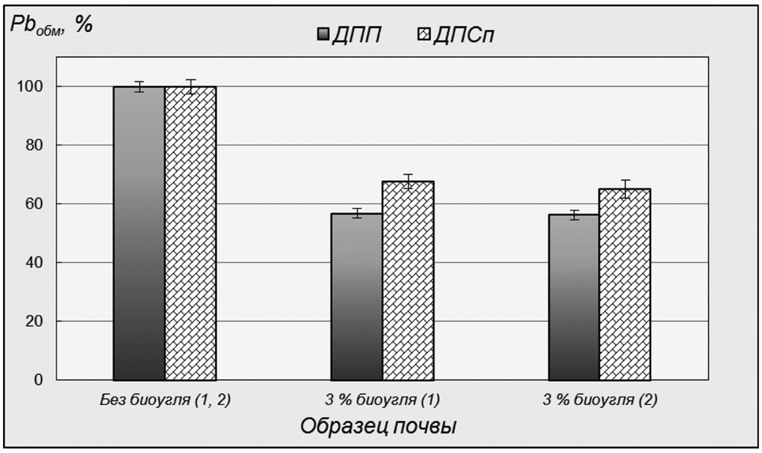
Таким образом, внесение 3 мас.% биоугля в образцы песчаной почвы привело к заметному сокращению запаса Cd, Pb и U в обменной форме. Влияние биоугля отчетливо проявилось уже через месяц после его внесения в почву и сохранилось в последующий период – через 2 месяца после добавления биоугля. В супесчаной почве эффект от внесения биоугля также проявился, но в меньшей степени, чем в песчаной почве. Изменения запаса в почвах ТМ в обменной форме могут быть связаны с трансформацией под влиянием биоугля характеристик почвенной среды, в частности с уменьшением ее кислотности. В результате внесения биоугля в почвенные образцы более заметно снижалась кислотность песчаной почвы, о чем свидетельствует увеличение показателя pH_{KCl} до 5,7 уже через месяц после добавления 3 мас.% биоугля, тогда как в контрольных образцах он оставался на уровне 5,0. При этом в образцах супесчаной почвы с биогулем показатель pH_{KCl} составлял 6,8 а в контрольных образцах – 6,5. Через 2 месяца после внесения биоугля кислотность почв практически не изменилась [18].

Заключение. В результате проведенных исследований установлены запас Cd, Pb и U в формах, определяющих подвижность и биологическую доступность элементов в песчаных и супесчаных разновидностях почв дерново-подзолистого типа, и степень его изменения после добавления 1–5 мас.% биоугля. Показано, что в изученных почвах относительные количества ТМ и в обменной, и в подвижной форме соотносятся следующим образом: Cd > Pb >> U.

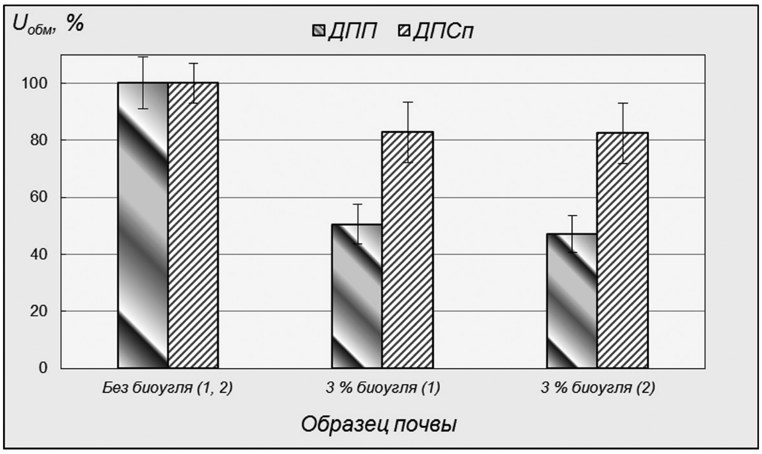
Наряду с улучшением агрохимических показателей (уменьшение кислотности, увеличение влагоемкости и содержания $K_{обм}$ и $Ca_{обм}$ [18]) внесение биоугля в рассмотренные почвы привело к трансформации форм нахождения Cd, Pb и U, которая способствовала уменьшению их подвижности в почвенно-растительном покрове. Добавки 3–5 мас.% биоугля заметно сократили запас в почвах ТМ в обменной (наиболее мобильной и потенциально наиболее доступной расте-



а



б



в

Рис. 4. Изменение запаса элементов в обменной форме в результате внесения 3 мас.% биоугля в песчаную (ДПП) и супесчаную (ДПСп) почвы по сравнению контрольными образцами через 1 (*1*) и через 2 месяца (*2*) после добавления биоугля: *а* – $Cd_{обм}$; *б* – $Pb_{обм}$; *в* – $U_{обм}$

ниям) форме. При этом в песчаной почве, где под влиянием биоугля кислотность среды уменьшилась в большей степени, запас $Cd_{обм}$, $Pb_{обм}$ и $U_{обм}$ сократился более существенно, чем в супесчаной почве. В то же время при максимальной дозе биоугля 5 мас.% запас в почвах ТМ в подвижной (условно биологически доступной) форме также изменился (в песчаной почве снизился, а в супесчаной – увеличился).

Оптимальные дозы внесения биоугля определяются свойствами конкретной почвы. На основании результатов выполненных исследований можно заключить, что при сохранении благоприятных условий для выращивания сельскохозяйственных растений к заметному снижению запаса $Cd_{обм}$, $Pb_{обм}$ и $U_{обм}$ может приводить внесение в супесчаные дерново-подзолистые почвы (pH_{KCl} – 5,8 – 6,6) 3 мас.% биоугля, а в кислые песчаные (pH_{KCl} – 4,6–5,5) – 3–5 мас.%.

Список использованной литературы

1. Hydrothermal carbonization of biomass residuals: a comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis / J. A. Libra [et al.] // Biofuels. – 2011. – Vol. 2(1). – P. 89–124.

2. *Lehmann, J.* Biochar for environmental management: science and technology / J. Lehmann and S. Joseph (eds.) – London (UK): Sterling, VA, 2009.

3. What is more important for enhancing nutrient bioavailability with biochar application into a sandy soil: Direct or indirect mechanism? / G. Xua [et al.] // Ecological Engineering. – 2013. – Vol. 52. – P. 119–124.

4. Nitrogen, biochar, and mycorrhizae: Alteration of the symbiosis and oxidation of the char surface / C. LeCroya [et al.] // Soil Biology and Biochemistry. – 2013. – Vol. 58. – P. 248–254.

5. A review of biochar and its use and function in soil / S. Sohi [et al.] // Adv. Agron. – 2010. – Vol. 105. – P. 47–82.

6. World Carbon Dioxide Emissions from the Consumption and Flaring of Fossil Fuels, 1980–2006. US Energy Information Administration, 2008.

7. IAEA-TCDOC-16162009. Quantification of Radionuclide Transfer in Terrestrial and Freshwater Environments for Radiological Assessments. – Vienna: IAEA, 2009.

8. Теория и практика химического анализа почв. – М.: ГЕОС, 2006.

9. МВИ. МН 1497–2001. Методики определения урана в почвах и аэрозольных фильтрах. – Минск: БелГИМ, 2001.

10. Measurement of Radionuclides in Food and the Environment. – A guidebook. Technical reports series No 295 – IAEA, Vienna, 1989.

11. Трансурановые элементы в окружающей среде / под. ред. У. С. Хэнсона. – М.: Энергоатомиздат, 1985.

12. *Sparovek, R.* Issues of Uranium and Radioactivity in Natural Mineral Waters / R. Sparovek, J. Fleckenstein, E. Schnug // Lanbauforschung Volkenrode. – 2002. – Vol. 51, № 4. – P. 149–157.

13. *Diemann, C.* Uran in Boden und Wasser / C. Diemann and J. Utermann – Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2012.

14. *Федоров, А. А.* Оценка содержания в почве элементов минерального питания, доступных растениям. А. А. Федоров // Агрохимия. – 2002. – № 3. – С. 15–22.

15. *Фрид, А. С.* Миграционная концепция доступности веществ почвы корням растений. А. С. Фрид // Агрохимия. – 1996. – № 3. – С. 29–37.

16. Comparison of two sequential extraction procedures for uranium fractionation in contaminated soils /H. Vandenhove [et al.] // J. of Environ. Radioact. – 2014. – № 137. – P. 1–9.

17. *Houben, D.* Mobility, bioavailability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with biochar / D. Houben, L. Evrard and P. Sonnet // Chemosphere. – 2013. – Vol. 92, № 11. – P. 1450–1457.

18. Характеристики дерново-подзолистых почв после внесения биоугля / Г. А. Соколик [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2015. – № 2. – С. 87–94.

Поступила в редакцию 09.06.2015