

УДК 631.98:631.445:631.417.2

ФИТОТЕСТИРОВАНИЕ РОСТСТИМУЛИРУЮЩЕЙ АКТИВНОСТИ БИОЧАРА И ЛИГНОГУМАТА НА ПОЧВАХ РАЗНОГО ГУМУСНОГО СТАТУСА¹

© 2020 г. А. П. Кирюшина^{1,*}, А. И. Парамонова^{1,2}, Е. В. Прудникова²,
П. С. Королев², В. А. Терехова^{1,2}

¹ Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
119071 Москва, Ленинский просп., 33, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, факультет почвоведения
119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 12, Россия

*E-mail: apkiryushina@gmail.com

Поступила в редакцию 26.03.2020 г.

После доработки 17.04.2020 г.

Принята к публикации 10.08.2020 г.

В лабораторном опыте методом аппликатного и элюатного фитотестирования оценивали ростстимулирующий эффект углеродсодержащих добавок биочара (5%) и лигногумата (0.05%) в образцах 2-х типов почв, содержание органического углерода ($C_{орг}$) в которых различалось более чем в 3 раза (чернозем – 5.4% и агрозем – 1.5%), по изменению длины корней и побегов проростков высших растений. В качестве тест-культур использовали овес посевной (*Avena sativa* L.), горчицу белую (*Sinapis alba* L.) и редьку посевную (редис) (*Raphanus sativus* var.). Тестирование образцов почв, незагрязненных и искусственно загрязненных тяжелыми металлами (ТМ), выдержанных в течение 120 сут в сосудах с ремедиантами при контролируемой влажности (60% ПВ) и температуре ($22 \pm 2^\circ\text{C}$), проводили в пластиковых планшетах. Ремедиационная (ростстимулирующая) активность исследованных углеродсодержащих добавок на разных почвах различалась: значимое снижение негативного фитотоксического эффекта ТМ при совместном внесении биочара и лигногумата проявилось в образцах высокогумусированной почвы. При сравнении чувствительности тест-растений к токсиканту установлено, что она зависела от почвенных условий: редис и овес оказались наиболее восприимчивыми к тяжелым металлам на агроземе, горчица – на черноземе.

Ключевые слова: тяжелые металлы, фитотестирование, ремедиация, углеродсодержащие добавки биочара и лигногумата, агрозем, чернозем.

DOI: 10.31857/S0002188120110058

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние почв агроценозов представляется в большинстве регионов как неудовлетворительное ни по плодородию, зависящему от содержания гумуса, ни по уровню химического загрязнения. Загрязнение почв тяжелыми металлами (ТМ) длительное время остается важной проблемой при экологической оценке почв. Оно наносит существенный урон микробиологическим, растительным и животным сообществам. При этом самоочищение почв – процесс длительный. В настоящее время популярны высокомолекулярные углеродистые вещества, такие как гуминовые препараты и биоугли, способ-

ные связывать ТМ в почве, предотвращая их дальнейшие превращения в пищевых цепях биоценозов, в частности, в растениях. Эти вещества способствуют секвестрации органического углерода в почвах агроценозов [1, 2].

Биочар (древесный уголь, или биоуголь) представляет собой продукт пиролиза древесных остатков, характеризующийся пористой структурой, с высокой сорбционной емкостью [3]. Его производство в настоящее время осуществляется в ряде европейских стран (Германии, Швейцарии, Великобритании и др.), в США, а также в России.

В глобальном понимании внесение биочара в почву может служить таким важным целям как уменьшение парникового эффекта за счет секвестрации углерода в почве и снижения тем самым

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 18-04-01218 (в части постановки эксперимента).

Таблица 1. Химические свойства почв

Почва	pH _{H2O}	Содержание				Влагоудерживающая способность, %
		C _{орг} , %	NH ₄	P ₂ O ₅	N, %	
Агрозем	7.3	1.5	0.72	16.8	0.1	95.9
Чернозем	6.7	5.4	3.90	12	0.2	83.3

выделения CO₂, а также более мощных парниковых газов N₂O и CH₄ [4, 5]. Неоднократно показана его способность к улучшению физико-химических свойств почв (водного режима, дренажа, структуры почвы) [6–8], агрохимических характеристик (сорбции питательных веществ, повышения плодородия почв, увеличения урожайности культур) [9, 10], улучшения жизнедеятельности микробиоты почвы [6, 11, 12] и очищения почвы от загрязнителей, в частности ТМ [1, 13] путем фиксации последних в своих полиароматических соединениях.

Перед внесением углеродсодержащих ремедиантов важен расчет эффективной дозы индивидуально для каждой почвы, поскольку они в высоких концентрациях при взаимодействии с конкретной почвой могут негативно влиять как на биоту [14], так и на развитие сельскохозяйственных культур и их урожайность [5].

Кроме того, важным является сырьевой источник, тип древесины и режим термической обработки, которые могут определять эффект биоугля [6]. В связи с этими различиями получаемого продукта в Великобритании разрабатывают “Мандат качества биоугля”. Его первая версия содержит критерии качества биоугля, который можно использовать в сельском хозяйстве, и он может быть безопасным для окружающей среды [15]. В данной работе был использован биочар, соответствующий качеству, описанному в мандате.

Лигногуматы – широко известные продукты так называемой “зеленой химии”, представляют собой полусинтетические вещества на основе солей гуминовых и фульвовых кислот, полученных в результате окислительно-гидролитической деструкции лигносодержащего сырья. Лигногуматы рекомендуют для применения в качестве стимуляторов роста и антистрессантов [16]. Показана их способность к сорбционному комплексообразованию с подвижными формами ТМ [14, 17]. При этом их эффекты в разных почвах изучены недостаточно.

Цель работы – исследование ремедиационного влияния биочара (Б) и лигногумата (ЛГ) на об-

разцы почв с высоким и невысоким содержанием органического углерода, незагрязненные и загрязненные ТМ по показателям развития растений в стандартизованных лабораторных тест-системах. Задачи исследования сводились к выявлению и сравнению предполагаемого положительного фитоеффекта от добавленных углеродсодержащих компонентов (биочара и лигногумата) в незагрязненных образцах почв, а также и при их полиметаллическом загрязнении.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводили в условиях модельного эксперимента в 2018 г. в лаборатории экотоксикологического анализа почв и химико-аналитическом центре факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. Использовали образцы 2-х типов почв, отобранных из верхнего почвенного горизонта (0–20 см): агрочернозем глинисто-иллювиальный и агрозем альфегумусовый глеевый [18]. Почву освобождали от посторонних включений (фрагментов растений, камней и пр.), высушивали до воздушно-сухого состояния, просеивали через сито с крупным диаметром отверстий (1 см). Почвы различались химическими свойствами и прежде всего – содержанием органического углерода: в черноземе – 5.4, в агроземе – 1.5% (табл. 1).

Влагоудерживающую способность почв определяли согласно ГОСТ 26713-85, pH_{H2O} – по ГОСТу 26423-85, содержание органического углерода – по ГОСТу 26213-91, содержание подвижных форм фосфора – по ГОСТу 26207-91, аммонийный азот – по ГОСТу 26951-86, общий азот определяли на экспресс-анализаторе CHNS analyzer, VARIO III-EL (Германия).

Обе почвы (агрозем и чернозем) исследовали в нескольких вариантах – натурные (условно незагрязненные), после искусственного полиметаллического загрязнения и после добавок ремедиантов (биочара и лигногумата).

Для вариантов с полиметаллическим загрязнением образцы готовили следующим образом. В сосуды с почвой массой 400 г тяжелые металлы

(ТМ) вносили в виде водных растворов солей: CuSO_4 , ZnSO_4 , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$, в дозах 660, 1100 и 650 мг/кг соответственно, что составляло 5 ориентировочно-допустимых концентраций (ОДК) для каждого катиона металла. В вариантах с ремедиантами углеродсодержащие добавки вносили через 7 сут экспозиции образцов с солями металлов в концентрациях: биочар – 5, лигногумат – 0.25%. Все образцы почв инкубировали в контролируемых условиях в течение 120 сут при температуре 22–24°C и относительной влажности воздуха 60%.

Фитотестирование проводили в пластиковых планшетах аппликатным и элюатным способами, согласно методике “Фитоскан” [19].

При аппликатном фитотестировании увлажненную (60% ПВ) почву массой 60 г помещали в нижнюю камеру пластикового двухкамерного планшета, укрывали фильтровальной бумагой, на которую раскладывали семена растений по 10–12 семян в каждый планшет (в зависимости от размера семян). При элюатном способе фитотестирования оценивали эффект водной вытяжки (элюата) из образцов почв, приготовленной стандартным способом в соотношении почва : вода = 1 : 4. В этом варианте в нижнюю камеру пластикового планшета помещали фильтровальную бумагу, пропитанную водной вытяжкой из почвенных образцов (8 мл в каждый планшет). Планшеты выдерживали при температуре 22–24°C в течение 96 ч. По окончании экспозиции у проростков семян регистрировали тест-параметры (длину корней и проростков). Контролем служили проростки семян в планшетах на увлажненной дистиллированной водой фильтровальной бумаге. Фитоэффекты оценивали по изменению тест-параметров относительно контроля (холостого опыта). Каждый вариант опыта имел трехкратную повторность.

В качестве стандартизованных тест-культур, как принято в международной практике, использовали представителей однодольных – овес посевной (*Avena sativa* L.) и двудольных растений – горчицу белую (*Sinapis alba* L.) и редьку посевную (редис) (*Raphanus sativus* var.).

Препарат лигногумата, полученный в ходе искусственной гумификации лигносульфоната, предоставлен компанией НПО “РЭТ” (Россия). Он хорошо растворим в воде, и его использовали в виде водного раствора. Содержание золы в нем составляло 40, N – 0.25, H – 3.72, S – 4.84%, C : N = 135, $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 9.0.

Биочар, произведенный компанией МЕТАКОМ (Пермь), имел в своем составе фракции биоугля размером 2–8 мм, 88.2% фиксированного углеро-

да, 3% воды, сопутствующие элементы (N – 0.44, H – 0.82, S – 0.19%, C : N = 21.4), $\text{pH}_{\text{CaCl}_2}$ 8.9. Биочар применяли в виде порошка.

Ремедианты использовали в смеси и отдельно. Всего проанализировано 8 вариантов опыта для каждого типа почв: контроль, биочар (Б), лигногумат (ЛГ), биочар + лигногумат (Б + ЛГ), тяжелые металлы (ТМ), тяжелые металлы + биочар (ТМ + Б), тяжелые металлы + лигногумат (ТМ + ЛГ), тяжелые металлы + биочар + лигногумат (ТМ + Б + ЛГ).

Статистическую обработку данных проводили в программе Excel 2007.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные при фитотестировании результаты показали различия в проявлении как токсического эффекта от полиметаллического загрязнения 2-х почв, так и в действии углеродсодержащих препаратов, рекомендованных производителями в качестве “почвоулучшителей” [20, 21].

В малогумусированном агроземе угнетающий эффект от внесения ТМ достоверно был зарегистрирован на проростках редиса при анализе почвенных образцов аппликатным способом: длина проростков снижалась на 23 (с 75 до 58 мм), длина корней – на 19% (с 77 до 62 мм) (табл. 2). Для проростков овса наблюдали сходную тенденцию: уменьшение длины побегов на 14 (с 44 до 38 мм) и корней на 9% (72 до 66 мм). При добавлении к загрязненным образцам биочара и лигногумата угнетающий эффект ТМ на тест-культуры не снижался. При этом проростки семян горчицы в малогумусированной почве оказались менее чувствительными к воздействию полиметаллического загрязнения, что свойственно всем сидератным культурам [22].

При анализе водной вытяжки из загрязненных солями металлов почвенных образцов обнаружена стимуляция развития проростков овса: их длина увеличивалась с 23 до 34 мм, длина корней – с 64 до 73 мм. Аналогичную закономерность отметили при сравнении длины корней проростков горчицы (произошло увеличение их длины с 62 до 70 мм). Это, вероятно, свидетельствовало о том, что большая часть ТМ не находилась в водорастворимой форме в отличие от элементов питания, которые легко экстрагируются водой из почвенных образцов и способствуют росту растений. Стимулирующего эффекта на фоне загрязнения ТМ от внесения как биочара, так и лигногумата в агроземе не выявлено.

Таблица 2. Результаты фитотестирования образцов агрозема, загрязненных тяжелыми металлами (ТМ) и незагрязненных, с добавками биочара (Б), лигногумата (ЛГ)

Вариант	Длина побегов, мм			Длина корней, мм		
	редис	горчица	овес	редис	горчица	овес
Образцы агрозема						
Контроль	75 ± 8.0	76 ± 5.2	44 ± 6.0	77 ± 7.5	85 ± 8.7	72 ± 11.0
Б	73 ± 12.5	48 ± 7.6	39 ± 7.7	83 ± 10.0	84 ± 2.6	76 ± 4.1
ЛГ	80 ± 10.5	64 ± 5.0	41 ± 9.0	70 ± 8.5	86 ± 13.7	73 ± 7.9
Б + ЛГ	68 ± 7.0	79 ± 6.6	50 ± 4.9	84 ± 9.0	91 ± 8.1	83 ± 12.8
ТМ	58 ± 6.5	79 ± 9.5	38 ± 9.8	62 ± 7.0	89 ± 13.0	66 ± 7.9
ТМ + Б	55 ± 11.5	81 ± 8.1	37 ± 7.6	66 ± 9.5	80 ± 15.1	65 ± 13.3
ТМ + ЛГ	45 ± 6.0	80 ± 13.5	38 ± 9.3	65 ± 9.1	82 ± 10.1	69 ± 3.8
ТМ + Б + ЛГ	57 ± 13.0	90 ± 11.0	44 ± 7.4	68 ± 10.8	85 ± 13.0	67 ± 1.0
Водная вытяжка из образцов агрозема						
Контроль	35 ± 6.3	36 ± 5.9	23 ± 5.6	93 ± 14.7	62 ± 4.2	64 ± 13.2
Б	31 ± 8.7	31 ± 3.1	25 ± 12.4	92 ± 23.1	68 ± 5.3	62 ± 2.9
ЛГ	31 ± 4.9	28 ± 1.1	29 ± 11.8	88 ± 13.9	56 ± 3.8	59 ± 3.2
Б + ЛГ	33 ± 5.1	29 ± 0.1	32 ± 7.2	100 ± 22.8	68 ± 3.7	73 ± 7.8
ТМ	30 ± 7.5	31 ± 4.7	34 ± 0.5	93 ± 17.4	70 ± 6.1	73 ± 7.2
ТМ + Б	28 ± 8.2	32 ± 0.1	37 ± 5.2	87 ± 20.1	73 ± 5.8	69 ± 6.3
ТМ + ЛГ	31 ± 1.4	34 ± 4.8	39 ± 4.0	86 ± 7.6	74 ± 5.0	59 ± 2.6
ТМ + Б + ЛГ	30 ± 7.1	33 ± 2.9	37 ± 6.3	87 ± 20.1	71 ± 5.6	66 ± 1.5

Примечание. ± – стандартное отклонение. То же в табл. 3.

В вариантах с образцами чернозема, в которых аппликатным способом исследовали твердые образцы почв, угнетающий эффект от внесения ТМ отмечен на горчице: длина проростков снижалась на 28% (с 65 до 47 мм) по сравнению с контролем (табл. 3). Внесение лигногумата и биочара отдельно привело к увеличению этого показателя выше контроля (75 мм). Наибольший эффект наблюдали при совместном внесении углеродсодержащих удобрений в чернозем как в вариантах с загрязнением ТМ, так и в не загрязненных.

Угнетающий эффект водной вытяжки из почв в опытах с черноземом при внесении ТМ отмечен для длины проростков овса: она снизилась на 17% (с 36 до 30 мм). Внесение биочара привело к усилению отрицательного эффекта (на 20% относительно варианта с ТМ), лигногумата – к увеличению длины проростков (на 33%). Совместное действие биочара и лигногумата вызвало положительный эффект: длина проростков овса возросла на 22% по сравнению с контролем и на 47% по сравнению с вариантом почвы с ТМ.

Кроме этого, совместное внесение биочара и лигногумата положительно сказалось на развитии корней редиса и горчицы в вариантах с загрязненной почвой при анализе водной вытяжки

(элюата). Длина корней проростков в таких вариантах значительно превышала контроль: на 20% у редиса и 18% у горчицы. Действие одного биочара вызвало снижение длины как проростков (на 20%), так и корней (на 25%) овса относительно варианта почвы с ТМ. Неоднозначный эффект гуминовых продуктов и биочара и ранее отмечали исследователи, наряду с многочисленными публикациями о положительном воздействии их на почвы для секвестрации углерода или как сорбентов токсикантов [13]. Например, при обработке дерново-подзолистой почвы этого типа почв, загрязненной ТМ, токсичность образцов не только не снизилась, а даже увеличилась, что проявилось в гибели дождевых червей [14]. Можно предполагать, что подавляющее рост растений действие биочара вызвано, возможно, его высокой дозой, примененной в эксперименте с культурой овса. Подобное, например, наблюдали при увеличении дозы биочара, примененного под бобовые культуры в качестве удобрения, когда с ростом концентрации биочара снижалась фиксация азота растениями и, как следствие, их урожайность [5]. В любом случае требуются длительные вегетационные и полевые эксперименты для составления прогноза ремедиационного эффекта биочара и

Таблица 3. Результаты фитотестирования образцов чернозема, загрязненных тяжелыми металлами (ТМ) и незагрязненных, с добавками биочара (Б), лигногумата (ЛГ)

Вариант	Длина побегов, мм			Длина корней, мм		
	редис	горчица	овес	редис	горчица	овес
Образцы чернозема						
Контроль	46 ± 1.5	65 ± 5.1	51 ± 7.6	60 ± 10.5	83 ± 5.8	67 ± 11.1
Б	45 ± 1.2	64 ± 7.6	59 ± 1.1	71 ± 8.5	95 ± 9.8	81 ± 2.8
ЛГ	51 ± 3.2	82 ± 9.0	58 ± 4.4	67 ± 6.7	88 ± 6.9	75 ± 7.8
Б + ЛГ	64 ± 2.0	75 ± 10.5	67 ± 4.8	75 ± 8.7	88 ± 8.7	88 ± 6.7
ТМ	46 ± 6.6	47 ± 5.5	55 ± 6.5	72 ± 6.0	84 ± 3.4	66 ± 2.4
ТМ + Б	51 ± 4.9	60 ± 12.5	62 ± 3.4	82 ± 7.1	85 ± 8.0	63 ± 3.2
ТМ + ЛГ	48 ± 0.6	64 ± 7.6	58 ± 2.4	72 ± 8.3	83 ± 6.9	74 ± 5.2
ТМ + Б + ЛГ	55 ± 1.3	75 ± 9.7	51 ± 1.1	75 ± 8.9	96 ± 4.0	78 ± 3.9
Водная вытяжка из образцов чернозема						
Контроль	34 ± 4.8	36 ± 2.0	36 ± 2.3	82 ± 4.0	83 ± 2.9	77 ± 2.3
Б	38 ± 2.8	37 ± 1.7	45 ± 5.1	85 ± 3.7	91 ± 7.1	79 ± 4.5
ЛГ	33 ± 2.9	34 ± 0.1	43 ± 5.9	84 ± 4.0	93 ± 0.6	75 ± 2.3
Б + ЛГ	32 ± 4.0	33 ± 1.4	41 ± 7.0	90 ± 4.8	94 ± 7.8	71 ± 1.7
ТМ	36 ± 2.8	35 ± 4.8	30 ± 3.7	87 ± 1.8	83 ± 2.4	75 ± 9.1
ТМ + Б	38 ± 4.5	35 ± 3.9	24 ± 1.2	92 ± 3.5	87 ± 2.5	56 ± 4.6
ТМ + ЛГ	35 ± 3.1	36 ± 3.8	40 ± 1.7	92 ± 6.9	86 ± 4.7	81 ± 6.3
ТМ + Б + ЛГ	40 ± 8.2	38 ± 4.2	44 ± 7.8	98 ± 8.1	98 ± 3.9	83 ± 4.0

лигногумата в длительной перспективе. В настоящее время уже есть попытки описать ремедиационный фитотест биочара на загрязненных ТМ дерново-подзолистых почвах в вегетационном опыте в сосудах с культурой горчицы в лаборатории экотоксикологического анализа почв факультета почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова. Результаты были представлены на VIII съезде Общества почвоведов им. В.В. Докучаева в 2020 г., но еще не опубликованы. Согласно этой работе корреляция между результатами, полученными за весь период вегетации горчицы (хронический фитотест) и краткосрочным фитотестированием на планшетах (острый фитотест) была высокой. Исходя из этого, авторы рекомендуют фитотестирование в планшетном варианте как надежный метод определения токсичности почв и ремедиационных свойств исследуемых углеродсодержащих добавок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Согласно данным проведенного фитотестирования, можно заключить, что ростостимулирующий эффект от применения ремедиационных препаратов в почвах разного гумусного статуса существенно различался. Ремедиационные свой-

ства исследованных углеродсодержащих добавок были более выражены в высокогумусированной почве, чем в слабогумусированной. Добавки биочара совместно с лигногуматом снижали ингибирующее действие полиметаллического загрязнения на рост растений в черноземе и практически оказались бездейственными в слабогумусированных образцах агрозема.

Необходимо отметить, что достоверные различия в реакции разных почв на углеродсодержащие добавки были установлены на фоне различий в чувствительности тест-растений к тяжелым металлам. В опытах редис оказался наиболее чувствителен к тяжелым металлам в агроземе, а горчица и овес — в черноземе.

При сопоставлении результатов фитотестирования почв в вариантах аппликатного и элюатного способа, сходное для обеих почв действие ТМ в большей степени проявилось при аппликатном фитотестировании. При элюатном фитотестировании действие растворимых питательных компонентов в водной вытяжке даже из почв, загрязненных ТМ, оказалось стимулирующим рост проростков растений (в вариантах с агроземом). Принимая во внимание положительную корреляцию результатов лабораторного фитотестирования аппликатным способом (твердой массы поч-

вы) с вегетационными фитотестами, можно прогнозировать, что выявленный стимулирующий эффект от совместного применения лигногумата и биочара будет распространен на полный цикл вегетации высших растений.

Таким образом, показано, что стимулирующие и ремедиационные свойства исследованных углеродсодержащих добавок (биочара и лигногумата) в большой степени зависели от почвенных свойств, в частности, от наличия нативного органического углерода. Различия в реакциях проростков разных тест-видов растений на добавленные “почвоулучшители” свидетельствовали о необходимости учитывать вид сельскохозяйственных культур, которые предполагается выращивать на обработанной биочаром и лигногуматом почве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Abbas T., Rizwan M., Al S.* Biochar application increased the growth and yield, and reduced cadmium in drought-stressed wheat grown in an aged contaminated soil // *Ecotoxicol. Environ. Safety.* 2018. № 148. P. 825–833.
2. *Amoah-Antwi C., Kwiatkowska-Malina J., Thornton S.F.* Restoration of soil quality using biochar and brown coal waste: A review // *Sci. Total Environ.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137852>
3. *Гимаева А.Р., Валинурова Э.Р., Игдавлетова Д.К., Кудашева Ф.Х.* Сорбция ионов тяжелых металлов из воды активированными углеродными адсорбентами // *Сорбц. и хроматограф. процессы.* 2011. Т. 11. Вып. 3. С. 350–356.
4. *Preston C.M., Schmidt M.W.I.* Black (pyrogenic) carbon in boreal forests: a synthesis of current knowledge and uncertainties // *Biogeosci. Discus.* 2006. № 3. P. 211–271.
5. *Rondon M.A., Lehmann J., Ramirez J., Hurtado M.* Biological nitrogen fixation by common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) increases with bio-char additions // *Biol. Fertil. Soils.* 2007. № 43(6). P. 699–708.
6. *Григорьян Б.Р., Грачев А.Н., Кулагина В.И., Сунгатуллина Л.М., Кольцова Т.Г., Рязанов С.С.* Влияние биоугля на рост растений, микробиологические и физико-химические показатели малогумусированной почвы в условиях вегетационного опыта // *Вестн. технол. ун-та.* 2016. Т.19. № 11. С. 186–189.
7. *Повова А.Д., Семаль В.А., Брикманс А.В., Нестерова О.В., Колесникова Ю.А., Бовсун М.А.* Применение биоугля как мелиоранта и его влияние на изменение физических свойств агропочв юга Приморского края // *Вестн. Алтай. ГАУ.* 2019. № 6 (176). С. 57–63.
8. *Edeh I.G., Mašek O., Buss W.* A meta-analysis on biochar’s effects on soil water properties – New insights and future research challenges // *Sci. Total Environ.* 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136857>
9. *Мухина И.М.* Влияние карбонизированной биомассы на параметры плодородия дерново-подзолистых почв и эмиссию парниковых газов: Дис. ... канд. биол. наук в форме научн. докл. СПб., 2017. 187 с.
10. *Громакова Н.В.* Исследования влияния биочара на рост и развитие салата-латука на черноземе обыкновенном // *Овощи России.* 2017. № 5(38). С. 72–73.
11. *Ameloot N., Graber E.R., Verheijen F.G.A., De Neve S.* Interactions between biochar stability and soil organisms: review and research needs // *Europ. J. Soil Sci.* 2013. № 64(4). P. 379–390.
12. *Anders E., Watzinger A., Rempt F., Kitzler B., Wimmer B., Zehetner F., Stahr K., Zechmeister-Boltenstern S.* Biochar affects the structure rather than the total biomass of microbial communities in temperate soils // *Agricult. Food Sci.* 2013. № 22. P. 404–423.
13. *Lehmann J., Gaunt J., Rondon M.* Biochar sequestration in terrestrial ecosystems – a review // *Mitig. Adapt. Strat. Glob. Change.* 2006. № 11. P. 403–427.
14. *Пукальчик М.А., Терехова В.А., Якименко О.С., Акулова М.И.* Сравнение ремедиационных эффектов биочара и лигногумата на почвы при полиметаллическом загрязнении // *Теор. и прикл. экол.* 2016. № 2. С. 79–85.
15. *Shackley S., Ibarrola Esteinou R., Hopkins D., Hammond J.* Biochar Quality Mandate (BQM) version 1.0, British Biochar Foundation, 2014. 58 p.
16. *Пукальчик М.А., Панова М.И., Терехова В.А., Якименко О.С., Федосеева Е.В.* Действие гуминовых препаратов на активность почвенных ферментов в модельном опыте // *Агрохимия.* 2017. № 8. С. 84–91.
17. *Степанов А.А., Якименко О.С.* Ремедиация загрязненных городских почв с применением гуминовых препаратов // *Электр. журн. “Живые и биокосные системы”.* <http://www.jbks.ru>. 2016. № 18.
18. *Шишов Л.Л.* Классификация и диагностика почв России. М.: Ойкумена, 2004. 343 с.
19. *Терехова В.А., Якименко О.С., Воронина Л.П., Кыдралиева К.А.* Методика измерения биологической активности гуминовых веществ методом фитотестирования (“Фитоскан”). М.: Доброе слово, 2014. 24 с.
20. *Novak J.M., Lima I., Xing B., Gaskin J.W., Steine, C., Das K.C., Ahmedna M., Rehrh D., Watts D.W., Busscher W.J., Schomberg H.* Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand // *Ann. Environ. Sci.* 2009. № 3. P. 195–206.
21. *Olk D.C., Dinnes D.L., Scoresby R., Callaway C.R., Darlington J.W.* Humic products in agriculture: potential benefits and research challenges – a review // *J. Soils Sediments.* 2018. № 18. P. 2881–2891.
22. *Шевченко В.А., Соловьев А.М.* Биология растений с основами экологии. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2006. 370 с.
23. *Прудникова Е.В., Кирюшина А.П., Терехова В.А.* Оценка фитотоксичности почв: сопоставление тест-параметров в острых и хронических фитотестах // *Мат-лы VIII съезда Общ-ва почвоведов им. В.В. Докучаева.* 2020 (в печати).

Phytotesting of Growth-Stimulating Activity of Biochar and Lignohumate on Soils of Different Humus Status

A. P. Kiryushina^{a,#}, A. I. Paramonova^{a,b}, E. V. Prudnikova^b,
P. S. Korolev^b, and V. A. Terekhova^{a,b}

^a *A.N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution
Leninskij prosp. 33, Moscow 119071, Russia*

^b *M.V. Lomonosov Moscow State University, Soil Science Faculty
Leninskie Gory 1, bld. 12, Moscow 119991, Russia*

[#] *E-mail: apkiryushina@gmail.com*

Under laboratory conditions, the growth-promoting effect of biochar (5%) and lignohumate (0.05%) in samples of two soil types was evaluated. Two types of soil were used with different contents of organic carbon (C_{org}): chernozem – 5.4% and agrozem – 1.5%. The method of applicative and eluate phytotesting was used. The measured parameters were the length of the roots and shoots of seedlings of higher plants. We used test cultures of inoculated oats (*Avena sativa* L.), white mustard (*Sinapis alba* L.) and inoculated radishes (radish) (*Raphanus sativus* var.). Testing of soil samples was carried out in plastic tablets. Soil samples were uncontaminated and artificially contaminated with heavy metals (HM). They were kept for 120 days in vessels with re- mediants at a controlled humidity (60% of the total moisture capacity) and temperature ($22 + 2^{\circ}C$). The re- mediation (growth-promoting) activity of carbon-containing additives on two soils was different: the com- bined application of biochar and lignohumate reduced the negative phytoeffect of HM in samples of highly humus soil. Soil conditions affected the sensitivity of the test plants to the toxicant: radishes and oats were most susceptible to heavy metals on agrozem, and mustard on chernozem.

Key words: heavy metals, phytotesting, remediation, biochar, lignohumate, agrozem, chernozem.