

УДК 631.46

ВЛИЯНИЕ КЕРОСИНА НА ЦЕЛЛЮЛОЗОЛИТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ И ПЕСЧАНОЙ ПУСТЫННОЙ ПОЧВ (ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ)¹

© 2022 г. А. В. Шарাপова^{a, *}, И. Н. Семенов^a, П. П. Кречетов^a, С. А. Леднев^a, Т. В. Королева^a^aМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия

*e-mail: avsharapova@mail.ru

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.

После доработки 17.09.2021 г.

Принята к публикации 22.09.2021 г.

Представлены результаты лабораторного эксперимента по изучению влияния загрязнения керосином гумусового горизонта дерново-подзолистой (Albic Retisols, Калужская область, Россия) и песчаной пустынной (Arenosols, Кызылординская область, Республика Казахстан) почв на целлюлозолитическую активность микробиоценоза. Целлюлозолитическую активность оценивали по скорости потери массы льняного полотна в интервалах инкубирования 0–3, 3–7 и 7–13 месяцев. В незагрязненной дерново-подзолистой почве интенсивность целлюлозолитической активности больше, чем в песчаной пустынной почве, что обусловлено слабокислой реакцией среды, повышенным содержанием органического вещества и элементов питания. Загрязнение почв керосином в количестве до 10 г/кг вызывает обратимое изменение целлюлозолитической активности, как в дерново-подзолистой, так и в песчаной пустынной почвах. Высокие нагрузки керосина (от 25 г/кг) приводят к ингибированию целлюлозолитической активности в обеих почвах в течение 13-ти месяцев наблюдений.

Ключевые слова: загрязнение почв, легкогидролизуемые органические вещества, биохимическое окисление, дерново-подзолистая почва (Albic Retisols), песчаная пустынная почва (Arenosols)

DOI: 10.31857/S0032180X22020113

ВВЕДЕНИЕ

Устойчивое функционирование наземных экосистем в значительной мере обусловлено микробиологическими процессами, протекающими в почве. Поступление загрязняющих веществ очень часто подавляет биологическую активность почв и, как следствие, вызывает деградацию или гибель всего биогеоценоза. Одним из процессов, определяющих интенсивность биологического круговорота веществ в экосистеме, является трансформация органических остатков, которая во многом зависит от активности целлюлозолитической группы микроорганизмов.

Целлюлозолитическая активность (ЦА) почв часто используется в качестве показателя биохимического окисления органических веществ [4, 11, 12, 30]. Данный показатель широко применяется для интегральной оценки экологических функций почв и интенсивности микробиологических процессов [7, 9]. Для исследования ЦА используют несколько видов тест-объектов: филь-

тровальную бумагу [6, 43, 52–54], хлопковую ткань [8, 49] или льняное полотно [35, 36]. Интенсивность разложения целлюлозы определяется на основе оценки изменения плотности материала тест-объекта [42, 51], площади сохранившегося материала [8], массы материала, съеденного микроорганизмами за определенный период инкубации [35, 36].

Величина ЦА определяется комплексом природно-экологических и антропогенных факторов. Многие авторы отмечают большое влияние на биологическую активность почв гидротермических условий и свойств загрязнителя. Интенсивность ЦА увеличивается по мере приближения к оптимуму гидротермических условий [1, 8, 15, 26, 35, 39, 51]. В засушливых областях с каштановыми почвами (Kastanozems) и сероземами (Calcisols) из-за дефицита влаги период биологической активности непродолжителен, что приводит к уменьшению интенсивности ЦА. Анализ данных о составе и численности разрушающих целлюлозу микроорганизмов показал, что в почвах холодных гумидных ландшафтов они представлены преимущественно грибами, тогда как в

¹ К статье имеются дополнительные материалы, доступные для авторизованных пользователей по doi: 10.31857/S0032180X22020113.

более южных широтах в их составе увеличивается доля актиномицетов [28].

ЦА антропогенно-нарушенных почв зависит от их природного (фонового) уровня биологической активности [17, 18, 24]. Загрязнение почв тяжелыми металлами или бензапиреном снижает биологическую активность [21, 30, 40], а внесение определенных доз минеральных удобрений, бурого угля и углеводородов часто, напротив, приводит к ее росту [2].

Ряд исследований посвящен влиянию на ЦА удобрений, способов обработки угодий и пастбищной дигрессии [3, 5, 32]. Увеличение содержания азота в почвах приводит к росту ЦА [31].

В почвах городских ландшафтов ЦА снижается при изъятии ежегодного опада и увеличении содержания загрязняющих веществ [17, 18, 24].

Влияние углеводородного загрязнения на ЦА чаще всего изучалось на почвах, загрязненных нефтью, мазутом, бензином, моторными маслами [21, 23, 34] и реже – керосином [10]. Высокая миграционная способность керосина и его токсичность для биоты определяет необходимость оценки допустимых нагрузок углеводородов данного типа на компоненты экосистем, особенно для территорий, примыкающих к аэродромам и космодромам [19, 25, 27, 37, 46, 47].

Цель исследования – оценка динамики целлюлозолитической активности загрязненных керосином почв лесных и пустынных ландшафтов в контролируемых гидротермических условиях.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Лабораторный эксперимент проводили с образцами гумусового горизонта дерново-подзолистой среднесуглинистой и песчаной пустынной почв (табл. S1). Образцы почв отобрали в зоне гумидных ландшафтов широколиственно-хвойных лесов (Боровский район Калужской области Российской Федерации) в районе расположения аэропорта “Ермолино” и аридных ландшафтов пустынь (Кызылординская область Республики Казахстан) на территории космодрома Байконур.

Дерново-подзолистая почва по сравнению с песчаной пустынной характеризуется более благоприятными условиями для функционирования почвенного микробиоценоза. Так, содержание аммония в ней больше, чем в пустынной песчаной почве в 10.6 раза, а фосфора в 3.9 раза. Благоприятными факторами для развития микроорганизмов являются высокое содержание органического углерода в гумусовом горизонте дерново-подзолистой почвы (в 10 раз) и слабокислая реакция среды. В гумусовом горизонте песчаной пустынной почвы реакция среды сильнощелочная, что приводит к уменьшению биомассы и разнообразию почвенных микроорганизмов.

Образцы гумусового горизонта массой около 20 кг, отобранные при естественной влажности, просеивали через сито с диаметром отверстий 3 мм, очищали от корней и других включений, высушивали до воздушно-сухого состояния. Перед началом лабораторного эксперимента образцы увлажняли до уровня 60% от предельной полевой влагоемкости из распылителя. Дистиллированную воду подавали небольшими порциями, почву тщательно перемешивали после каждой подачи для равномерного впитывания. Количество подаваемой воды контролировали взвешиванием. Влажность почвы, определенная перед внесением керосина гравиметрическим методом с высушиванием образцов при 105°C, составила для дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы $22.71 \pm 0.53\%$, а для песчаной пустынной почвы – $5.21 \pm 0.25\%$. По достижению нужного уровня влажности образцы оставляли в полиэтиленовом пакете на трое суток при температуре 18–22°C, периодически перемешивая для равномерного перераспределения влаги по всей массе почвы и активизации в ней микробиоценоза [16]. Перемешивание проводили осторожно, сохраняя почвенную структуру. Образец делили на 6 частей. Одну часть использовали в качестве контроля. В оставшиеся 5 образцов вносили различные дозы (1, 5, 10, 25 и 100 г/кг почвы) керосина марки ТС-1 (ГОСТ 10227-86). Углеводороды вносили равномерно по всей массе образца из распылителя в условиях постоянной гомогенизации. Количество внесенного керосина контролировали весовым методом. Нагрузки керосина выбраны согласно результатам исследований влияния керосина на растительность [47] и микробиоценоз [13]. Загрязненные и контрольные образцы почвы помещали в стеклянные емкости объемом 500 см³ с герметично закрывающимися железными крышками. Каждый вариант нагрузки соответствовал одной емкости. Плотность дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы в сосуде – 0.92 ± 0.09 кг/дм³, а песчаной пустынной почвы – 1.47 ± 0.04 кг/дм³.

В почву, находящуюся в стеклянных сосудах, в трехкратной повторности помещали тест-объекты – фрагменты льняного полотна размером 6 × 4 см, предварительно высушенные до воздушно-сухого состояния и взвешенные на аналитических весах с точностью до четвертого знака после запятой, средней массой 0.7 ± 0.1 г. Эксперимент продолжался 13 мес. при температуре 18–22°C. Ежедневно контролировали температуру с использованием ртутного термометра. Раз в 5 дней банки открывали для проветривания и контролировали уровень влажности гравиметрическим методом. При уменьшении массы ее содержание восстанавливали, добавляя дистиллированную воду из распылителя (табл. S2).

Таблица 1. ЦА в почвах при разных нагрузках керосина, мг/(г сут)

Срок, мес.	ЦА в почве (мг/(г сут)) при нагрузке керосина, г/кг					
	0 (контроль)	1	5	10	25	100
Дерново-подзолистая почва (Albic Retisols)						
0–3	9.24 ± 0.27	6.50 ± 1.07	4.65 ± 0.57	2.36 ± 0.41	2.45 ± 0.08	2.86 ± 0.32
3–7	6.18 ± 0.67	7.30 ± 0.20	5.50 ± 0.89	2.66 ± 0.42	2.92 ± 0.24	0.40 ± 0.14
7–13	5.30 ± 0.06	5.59 ± 0.52	5.04 ± 0.50	5.50 ± 0.09	4.15 ± 0.73	3.22 ± 0.15
Песчаная пустынная почва (Arenosols)						
0–3	3.87 ± 0.29	2.06 ± 0.33	1.24 ± 0.19	1.05 ± 0.09	0.86 ± 0.02	0.78 ± 0.36
3–7	2.15 ± 0.14	1.89 ± 0.04	0.83 ± 0.04	1.15 ± 0.02	0.72 ± 0.09	1.29 ± 0.02
7–13	0.98 ± 0.15	1.40 ± 0.18	1.96 ± 0.32	0.76 ± 0.04	0.21 ± 0.11	0.76 ± 0.08

Примечание. Сведения о достоверности различий приведены в табл. S3.

Наблюдение за ЦА на протяжении всего эксперимента осуществляли последовательно в 3 срока инкубации: 0–3, 3–7 и 7–13 месяцев.² По истечению каждого срока проводили изъятие тест-объектов и закладку новой партии.

Изъятые из почвы фрагменты льняного полотна тщательно отмывали от твердых фаз, высушивали до воздушно-сухого состояния и взвешивали.

ЦА рассчитывали как среднюю скорость потери массы материала тест-объекта по отношению к его исходной массе за выбранный период наблюдений (0–3, 3–7 и 7–13 мес., в мг/(г сут)). Дополнительно сопоставляли полученные данные о разрушении льняного полотна с диапазонами по шкале интенсивности разрушения клетчатки (целлюлозы), предложенной Д.Г. Звягинцевым [16], выраженной в процентах в пересчете на 3 мес. инкубации.

Статистическую обработку данных выполняли в пакете Statistica. Для оценки значимости отличий выборочных средних применяли непараметрический тест Манна–Уитни для независимых переменных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ и статистическая обработка полученных данных показали, что в обеих почвах ЦА отдельных вариантов загрязнения слабо варьирует: коэффициент вариации $C_v = 8–18\%$ во все сроки наблюдения. Максимальные значения $C_v = 51\%$ отмечены в наиболее загрязненных вариантах песчаной пустынной почвы в интервале наблюдения 7–13 мес.

Целлюлозолитическая активность чистых почв. Интенсивность разрушения целлюлозы в незагряз-

ненных гумусовых горизонтах дерново-подзолистой почвы на протяжении всего эксперимента по шкале Д.Г. Звягинцева соответствует среднему, высокому и очень высокому уровню. Установлено уменьшение ЦА в дерново-подзолистой почве к концу эксперимента в 1.7 раза – от 9.2 до 5.3 мг/(г сут) (p -value 0.08). Данные значения близки к величинам, полученным в ходе измерения *in situ* в черноземах выщелоченных Среднерусской возвышенности [36] и коричневых почвах Крыма [8] (табл. 1, 2).

В песчаной пустынной почве интенсивность разложения целлюлозы максимальна в начале эксперимента и не выходит за пределы средней градации. На следующих сроках наблюдения (3–7 и 7–13 мес.) установлено резкое уменьшение ЦА до очень слабого уровня. Относительно дерново-подзолистой почвы эти показатели значимо меньше (p -value 0.08, $n = 3$). Наиболее значимые различия установлены между интервалами 0–3 и 7–13 мес., когда ЦА сократилась с 3.87 до 0.98 мг/(г сут) (p -value 0.08). Различия между первыми двумя сроками не значимы (p -value 0.66) (табл. S3, S4).

Такое уменьшение ЦА к концу эксперимента для обеих почв может быть связано с переходом микробиоценоза в состояние гомеостаза в условиях лабораторной модели, а также возможным уменьшением содержания доступных и необходимых для функционирования целлюлозолитических организмов элементов питания. Подтверждением последней гипотезы может служить уменьшение ЦА в более обеспеченной элементами питания дерново-подзолистой почве в 1.7 раза, тогда как в бедной песчаной пустынной почве это снижение достигает 3.9 раза. Меньшие значения ЦА в песчаной пустынной почве по сравнению с дерново-подзолистой в 2.4 (0–3 мес.) и 5.4 раза (7–13 мес.) могут объясняться спецификой микробного сообщества. Малое поступление растительных остатков в пустынных почвах и высокое значение рН оказывают неблагоприятное влияние на развитие целлю-

² Данные сроки были обусловлены невозможностью реализовать регулярные (каждые 3 мес.) наблюдения из-за ограничения доступа в лабораторию в условиях карантина из-за пандемии COVID-19.

Таблица 2. Интенсивность разрушения целлюлозы в почвах при разных нагрузках керосина, % от исходного веса тест-объекта в пересчете на 3 мес. инкубации

Срок, мес.	Нагрузка керосина, г/кг					
	0 (контроль)	1	5	10	25	100
Дерново-подзолистая почва (Albic Retisols)						
0–3	83 ± 2.5	58 ± 9.6	42 ± 5.2	21 ± 3.7	22 ± 0.7	26 ± 2.9
3–7	56 ± 6.0	66 ± 1.8	49 ± 8.0	24 ± 3.7	26 ± 2.2	4 ± 1.3
7–13	48 ± 0.6	50 ± 0.5	45 ± 4.5	50 ± 0.8	37 ± 6.5	29 ± 1.4
Песчаная пустынная почва (Arenosols)						
0–3	35 ± 2.6	19 ± 2.9	11 ± 1.7	9 ± 0.8	8 ± 0.1	6 ± 0.7
3–7	19 ± 1.3	17 ± 0.3	7 ± 0.4	10 ± 2.0	6 ± 0.8	12 ± 0.2
7–13	9 ± 1.4	13 ± 1.7	18 ± 2.8	7 ± 0.4	2 ± 1.0	7 ± 0.5

Примечание. Шкала интенсивности разрушения целлюлозы: менее 10 – очень слабая, 10–30 – слабая, 30–50 – средняя, 50–80 – сильная, более 80 – очень сильная [16].

лозолитических микроорганизмов. По мнению ряда авторов, ведущую роль в разложении целлюлозы играют почвенные микромицеты, для которых условия обитания в дерново-подзолистых почвах более благоприятны [29, 37].

Целлюлозолитическая активность дерново-подзолистой почвы, загрязненной керосином. Внесение керосина в дерново-подзолистую почву привело к подавлению ЦА в первые 3 мес. инкубации. В условиях низкой (1–5 г/кг) нагрузки установлено уменьшение интенсивности разложения целлюлозы относительно контроля с очень высокого до высокого уровня. ЦА уменьшилась с 9.2 до 5.6 мг/(г сут) (p -value 0.03). При внесении керосина в нагрузку 10–100 г/кг интенсивность разрушения целлюлозы уменьшилась до слабого уровня, а ЦА снизилась до 2.7 мг/(г сут) (p -value 0.02). В последующие сроки (3–7 и 7–13 мес.) в вариантах с низкой нагрузкой ЦА сопоставима с контрольными значениями (p -value 0.70–0.37). Интенсивность разложения целлюлозы остается на высоком уровне. При средней и высокой загрязненности керосином ЦА меньше фоновых значений (p -value 0.02–0.05), снижаясь до слабого и очень слабого уровня.

В конце эксперимента (7–13 мес.) интенсивность разрушения целлюлозы в контроле и всех вариантах загрязнения соответствует среднему уровню (29–50%). В условиях небольшого загрязнения почвы керосином ЦА сопоставима с результатами контрольного варианта. При высоком загрязнении (>25 г/кг) биологическая активность остается меньше контроля в 1.3–1.7 раза. Таким образом, в течение года после загрязнения керосином ЦА дерново-подзолистой почвы восстанавливается при нагрузках до 10 г/кг включительно. Анализ содержания остаточных количеств керосина показал его отсутствие через 7 мес. в вариантах с нагрузками 1 и 5 г/кг (<100 мг/кг). Че-

рез 13 мес. он обнаруживается только при нагрузках от 25 (270 ± 47 мг/кг) и 100 г/кг (1057 ± 314 мг/кг). Таким образом, восстановление ЦА обусловлено уменьшением содержания керосина в процессе эксперимента, что может быть связано, как с его частичным испарением при проветривании емкостей, так и с биологической трансформацией техногенных углеводородов.

Полученные результаты согласуются с данными многолетнего полевого эксперимента по моделированию воздействия керосина на ЦА дерново-подзолистых почв, где установлено снижение ЦА в течение первого года с последующей интенсификацией ЦА, возвращающейся к фоновым уровням через 4 года [10]. Сопоставимый уровень ингибирования разрушающих целлюлозу микроорганизмов получен при загрязнении нефтью естественных почв и искусственных грунтов [20, 33]. Для растительности смешанных лесов Дальнего Востока также установлена относительно слабая реакция на поступление керосина при нагрузке 1–5 г/кг и сильная реакция при нагрузке 25–500 г/кг [47].

Целлюлозолитическая активность песчаной пустынной почвы, загрязненной керосином. Внесение керосина в песчаную пустынную почву привело к уменьшению ЦА по мере увеличения нагрузки на протяжении первых трех месяцев эксперимента. По шкале Звягинцева [16] интенсивность разрушения целлюлозы во всех вариантах нагрузки соответствовала слабому и очень слабому уровню. ЦА при низкой нагрузке составляла 1.65 мг/(г сут), при средней – 1.05 мг/(г сут), а при высокой – 0.83 мг/(г сут), что значительно отличается от незагрязненного варианта (p -value < 0.03).

Полученные данные хорошо согласуются с ЦА почв суббореальных пустынь Казахстана, испытывающих комплексное техногенное воздействие (механическая турбация, загрязнение азотсодер-

жащими ракетными топливами, возгорание растительности), для которых установлено уменьшение ЦА в 2 раза и более по сравнению с фоном [46]. Уменьшение целлюлозолитической активности при незначительном (1 г/кг) углеводородном загрязнении показано для чернозема выщелоченного, серопесков и бурой горно-лесной почв [20].

В период 3–7 мес. ЦА почв с нагрузкой керосина от 1 до 10 г/кг стала сопоставимой с незагрязненными почвами (p -value 0.08). Большие дозы углеводородов ингибировали ЦА (p -value 0.03). На третьем сроке наблюдений (7–13 мес.) при нагрузке углеводородов в 1 и 5 г/кг выявлена стимуляция ЦА (p -value 0.03). ЦА в этих вариантах превысила величины, установленные для контрольных образцов в 1.4 и 2.0 раза соответственно. Внесение керосина в бедные органическим веществом почвы приводит к стимуляции углеводородокисляющих микроорганизмов. Данная часть микробиоценоза, в составе которой также присутствует значительное количество микромицетов, осуществляет трансформацию техногенных углеводородов с образованием низкомолекулярных органических соединений [37]. Увеличение доли микромицетов и обогащение почвы легкогидролизуемыми органическими веществами, по-видимому, может увеличивать ЦА.

При высоких нагрузках керосина (от 25 г/кг) ЦА была подавлена и характеризовалась как очень слабая (p -value 0.03).

Для дерново-подзолистой почвы ЦА во всех вариантах с внесением керосина на всех сроках наблюдения оставалась больше, чем в песчаной пустынной ($p < 0.02$, $n = 18$), что объясняется исходным большим уровнем биологической активности почв с высоким содержанием элементов питания [8, 38].

Динамика содержания керосина в дерново-подзолистой и песчаной пустынной почвах в ходе эксперимента. Скорость разложения целлюлозы в почве определяется преимущественно микромицетами [29, 41, 44, 45]. Данный процесс обеспечивается ростом не всей массы мицелия сообщества почвенных микромицетов, развивающегося на целлюлозной частице, а лишь части колонии (периферической зоны), то есть ростом тех гиф, которые непосредственно контактируют с поверхностью целлюлозных фибрилл [29, 48, 50]. Насыщение керосином льняного полотна препятствует протеканию данного процесса. Анализ остаточного содержания керосина в почве выявил четкую зависимость восстановления ЦА после уменьшения его содержания. Количество керосина в почве на протяжении всего срока наблюдения уменьшалось в обоих рассмотренных типах почв (табл. S5). Через 3 мес. после инкубации в вариантах минимального уровня загрязнения (1 г/кг) в обеих почвах керосин не обнаружен, при нагрузке 5 г/кг в дерново-подзо-

листой почве осталось 4%, а в песчаной – 6% от исходного количества. В вариантах со средней нагрузкой (10 г/кг) в дерново-подзолистой почве осталось 25%, а в песчаной – немногим больше 28%. При максимальном воздействии (25 и 100 г/кг) остаточный уровень загрязнения варьирует от 61 до 79% от исходного количества внесенных углеводородов. Через 7 мес. отсутствие керосина зафиксировано в обоих типах почв при нагрузке 1 и 5 г/кг, а при 10 г/кг остаточное содержание не превышает 3% от исходного. На последнем сроке наблюдения керосин остается (1–2% от исходного) только в опытах с высокими концентрациями. Уменьшение содержания керосина с течением эксперимента может быть связано как с его частичным испарением при проветривании емкостей с образцами, так и с биохимическими реакциями, направленными на разложение (трансформацию) легкогидролизуемых органических веществ.

Наличие углеводородов также уменьшает доступность для микробиоценоза почвы подвижных форм азота, фосфора и калия, что подтверждается снижением коэффициентов корреляции между содержанием данных макроэлементов и целлюлозолитической активностью [14]. Положительное влияние на величину ЦА оказывают содержание гумуса и благоприятные кислотно-основные условия. Так, по устойчивости ЦА к загрязнению мазутом почвы располагаются в следующий ряд: черноземы выщелоченные > бурые горно-лесные почвы > серопески [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты лабораторного эксперимента показали низкую вариабельность ЦА и ее высокую информативность для всех вариантов нагрузок керосина, что позволяет рассматривать данный показатель в качестве индикатора при оценке биологической активности почв, испытывающих углеводородное загрязнение.

В незагрязненной дерново-подзолистой почве интенсивность ЦА больше, чем в песчаной пустынной почве, что обусловлено слабокислой реакцией среды, повышенным содержанием элементов питания и органического вещества. Оценка динамики ЦА показала, что увеличение уровня загрязнения углеводородами до 10 г/кг вызывает обратимое подавление ЦА, как в дерново-подзолистой, так и в песчаной пустынной почвах. Высокие нагрузки керосина (от 25 г/кг) вызывают ингибирование ЦА обеих почв в течение 13 мес. наблюдений. При экстраполяции результатов данного эксперимента на природные и антропогенно-трансформированные почвы с целью оценки скорости их самовосстановления необходимо учитывать период биологической активности почвенного микробиоценоза в данных типах ландшафтов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено в рамках проекта РФФИ № 19-29-05206.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Рис. S1. Наблюдение за ЦА почв в условиях лабораторного эксперимента: (а) исходное состояние фрагментов льняного полотна (тест-объектов); (б) вид тест-объектов после 3-месячной инкубации.

Таблица S1. Свойства гумусовых горизонтов почв.

Таблица S2. Начальный уровень влажности исследуемых образцов почв с учетом внесенного керосина.

Таблица S3. ЦА в почвах, сгруппированных по нагрузке керосина (скорость потери массы, мг/(г сут)).

Таблица S4. Уровень значимости отличий ЦА в загрязненных вариантах почв (по выборкам согласно нагрузкам) относительно контроля по критерию Манна–Уитни.

Таблица S5. Доля керосина от исходного содержания, оставшегося в исследуемых образцах в конце срока наблюдений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов Е.В., Ефремов В.А., Агафонова Л.Н. Свойства и применение куриного помета и биогумуса в полевом севообороте. Новочеркасск, 2002. 127с.
2. Баканина В.С., Ермакова О.Ю. Изучение динамики ферментативной активности чернозема южного Оренбургского Предуралья в условиях нефтяного загрязнения // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. 2012. № 8. С. 46–48.
3. Болонева Л.Н., Меркушева М.Г., Убугунов Л.Л. Микробиологическая и целлюлозолитическая активности, нитрификационная способность аллювиальной луговой почвы при внесении цеолита и его органоминеральных смесей // Вестник Бурятской гос. сельскохозяйственной академии им. В.Р. Филлипова. 2008. № 4(13). С. 23–30.
4. Булаткин Г.А., Ковалева А.Е. Целлюлозолитическая активность серых лесных почв // Почвоведение. 1984. № 11. С. 67–72.
5. Булгакова М.А. Биологическая активность антропогенно нарушенных черноземов степной и лесостепной зоны // Вестник Оренбургского гос. ун-та. 2012. № 10(146). С. 83–86.
6. Воробейчик Е.Л., Пищулин П.Г. Влияние деревьев на скорость деструкции целлюлозы в почвах в условиях промышленного загрязнения // Почвоведение. 2011. № 5. С. 597–610.
7. Гаврилова В.И. Косвенные методы диагностики коричневого типа почвообразования в Никитском ботаническом саду // Почвы России: вчера, сегодня, завтра. Киров, 2017. С. 61–65.
8. Гаврилова В.И., Герасимова М.И. Целлюлозолитическая активность почв: методы измерения, факторы и эколого-географическая изменчивость // Вестник Моск. ун-та. Сер. 17, почвоведение. 2019. № 1. С. 23–27.
9. Гуров И.А. Целлюлозолитическая активность почв влажных субтропиков на примере дендрария г. Сочи // Проблемы региональной экологии. 2010. № 2. С. 129–136.
10. Двуреченская Е.Б. Целлюлозолитическая активность дерново-подзолистых почв подтаежных ландшафтов при загрязнении различными углеводородными топливами // Антропогенная трансформация природной среды. 2018. № 4. С. 138–142.
11. Джанаев З.Г. Агрохимия и биология почв юга России. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008. 528 с.
12. Дорохова М.Ф., Исаченкова Л.Б. Биологическая активность почв территории научно-учебной станции МГУ “Сатино” // Вестник Моск. ун-та. Сер. 5, география. 2008. № 6. С. 34–38.
13. Дорохова М.Ф., Кречетов П.П., Шаранова А.В., Королева Т.В. Биоиндикация состояния лесных почв, загрязненных авиационным керосином // Роль почв в биосфере и жизни человека. Международная научная конференция: к 100-летию со дня рождения академика Г.В. Добровольского, к Международному году почв. 2015. С. 170–172.
14. Заушищев А.С. Изменение целлюлазной активности почвы под влиянием загрязнения нефтепродуктами // Вестник Кемеровского гос. ун-та. 2015. № 4-3(64). С. 21–24.
15. Захарченко А.Ф. Разложение целлюлозы в зональных почвах Таджикистана // Почвоведение. 1961. № 2. С. 54–62.
16. Звягинцев Д.Г., Асеева И.В., Бабьева И.П., Мирчинк Т.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 224 с.
17. Иванова А.Е., Николаева В.В., Марфенина О.Е. Изменение целлюлозолитической активности городских почв в связи с изъятием растительного опада (на примере Москвы) // Почвоведение. 2015. № 5. С. 562–570.
18. Калинкина В.Е., Сальникова Н.А., Сальников А.Л. Интегральный показатель эколого-биологического состояния нарушенных земель как объектов рекультивации // Естественные науки. 2016. № 1(54). С. 7–12.
19. Клепиков О.В., Филимонова О.Н., Енютина М.В., Назаренко И.Н. Обзор исследований по оценке неблагоприятного влияния военных аэродромов на окружающую среду // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 11. С. 93–103.
20. Колесников С.И., Гайворонский В.Г., Ротина Е.Н., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Оценка устойчивости почв юга России к загрязнению мазутом по биологическим показателям (в условиях модельного эксперимента) // Почвоведение. 2010. № 8. С. 995–1000.
21. Колесников С.И., Жаркова М.Г., Кутузова И.В., Молчанова Е.В., Зубков Д.А., Казеев К.Ш. Биологические свойства чернозема обыкновенного в поле-

- вом опыте при загрязнении свинцом // *Агрохимия*. 2012. № 8. С. 3–8.
22. Колесников С.И., Попович А.А., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф. Изменение эколого-биологических свойств почв юга России при загрязнении фтором // *Агрохимия*. 2008. № 1. С. 76–82.
23. Колесников С.И., Спивакова Н.А., Везденева Л.С., Кузнецова Ю.С., Казеев К.Ш. Моделирование влияния химического загрязнения на биологические свойства гидроморфных солончаков зоны сухих степей юга России // *Аридные экосистемы*. 2011. Т. 17. № 2(47). С. 18–21.
24. Корицова Н.О., Гусакова Н.В., Петров В.В. Самоочищающая способность почвы в зависимости от биологических показателей // *Вестник Башкирского гос. аграрного ун-та*. 2015. № 2(34). С. 11–14.
25. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Кравченко А.А., Тимошинов О.В. Экологические проблемы агродромов и пути их решения // *Актуальные проблемы гуманитарных и социально-экономических наук*. 2017. Т. 11. № S3. С. 80–81.
26. Лазарев А.П., Абрашин Ю.И., Гордеюк Л.Л. Целлюлозолитическая активность обрабатываемого чернозема обыкновенного лесостепной зоны Ишимской равнины // *Почвоведение*. 1997. № 10. С. 1230–1234.
27. Лазарев И.С., Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Багланов И.О. Мониторинг и прогнозирование загрязнения приаэродромных территорий (на примере г. Энгельс) // *Ученые записки Российского гос. гидрометеорологического ун-та*. 2019. № 56. С. 126–132.
28. Мишустин Е.Н. Эколого-географическая изменчивость почвенных бактерий. М.: Изд-во АН СССР, 1947. 328 с.
29. Паников Н.С., Афремова В.Д., Асеева И.В. Кинетика разложения целлюлозы в почве // *Почвоведение*. 1984. № 1. С. 56–63.
30. Пряженникова О.Е. Целлюлозолитическая активность почв в условиях городской среды // *Вестник Кемеровского гос. ун-та*. 2011. № 3. С. 10–13.
31. Струкова Д.В., Малюкова Л.С. Некоторые показатели биологической активности бурых лесных кислых почв чайной плантации субтропиков России // *Агрохимический вестник*. 2010. № 6. С. 5–9.
32. Титова В.И., Шахов С.С. Изменение целлюлозолитической активности дерново-подзолистой супесчаной, светло-серой лесной легкосуглинистой и чернозёмной оподзоленной среднесуглинистой почв при их механическом нарушении // *Пермский аграрный вестник*. 2015. № 3(11). С. 32–38.
33. Фомина Н.В. Анализ изменения целлюлозоразрушающей способности антропогенно загрязненной почвы // *Вестник Красноярского гос. аграрного ун-та*. 2014. Вып. 7. С. 101–107.
34. Фомина Н.В. Характеристика целлюлозолитической активности почвогрунта, искусственно загрязненного нефтью // *Мат-лы VI Междунар. научно-пр. конференции молодых ученых “Инновационные тенденции развития российской науки”*. 2013. С. 22–24.
35. Шарاپова А.В. Биохимическое окисление легкогидролизуемых органических веществ как показатель окислительно-восстановительного состояния почв зоны влияния терриконов угольных шахт // *Мир науки, культуры, образования*. 2012. № 6(37). С. 526–530.
36. Шарاپова А.В., Семенов И.Н., Леднев С.А., Карначевский А.М., Королева Т.В. Биохимический потенциал саморазвития посттехногенных горнопромышленных геоконструкций Подмосковского бурого угля // *Уголь*. 2020. № 10. С. 56–61. <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2020-10-56-61>
37. Шкапенко В.В., Кадошников В.М., Мусич Е.Г., Парамонова Н.К., Единач А.В. Трансформация керосина в грунтах под действием почвенных микроорганизмов // *Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища*. 2016. № 25. С. 98–106.
38. Шур А.В., Виноградов Д.В., Валько В.П. Целлюлозолитическая активность почв при различных уровнях агротехнического воздействия // *Вестник КрасГАУ. Сер. Почвоведение*. 2015. № 7. С. 45–49.
39. Яковлев А.С. Биологическая диагностика целинных и антропогенно измененных почв: Дис. ... докт. биол. н. М., 1997.
40. Яковлева Е.В., Хабибуллина Ф.М., Виноградова Ю.А., Безносиков В.А., Кондратенко Б.М. Микробиологическая активность почв, загрязненных бенз(а)пиреном // *Агрохимия*. 2010. № 11. С. 63–69.
41. Adam J. Book A.J., Gina R., Lewin G.R., McDonald B.R., Takasuka T.E. Evolution of High Cellulolytic Activity in Symbiotic Streptomyces through Selection of Expanded Gene Content and Coordinated Gene Expression // *PLoS Biology*. 2016. V. 14. P. e1002475. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002475>
42. Chew I., Obbard J.P., Stanforth R.R. Microbial cellulose decomposition in soils from a rifle range contaminated with heavy metals // *Environ. Pollut.* 2011. V. 111. P. 367–375. [https://doi.org/10.1016/s0269-7491\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/s0269-7491(00)00094-4)
43. Drewnik M. The effect of environmental conditions on the decomposition rate of cellulose in mountain soils // *Geoderma*. 2006. V. 132. P. 116–130. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.023>
44. Gupta P., Sahu A., Samant K. Isolation of Cellulose-Degrading Bacteria and Determination of Their Cellulolytic Potential // *Int. J. Microbiology*. 2012. V. 6. P. 578925. <https://doi.org/10.1155/2012/578925>
45. Hijam S.D., Goyari S., Thokchom E., Mohan Chandra Kalita M.C., Talukdar N.C. Identification and determination of cellulase activity of cellulose degrading microorganisms from earthworm species of different habitats of North East India // *Ind. J. Biotechnology*. 2020. V. 19. P. 192–205.
46. Koroleva T.V., Semenov I.N., Sharapova A.V., Krechetov P.P., Lednev S.A. Ecological consequences of space rocket accidents in Kazakhstan between 1999 and 2018 // *Environ. Poll.* 2021. V. 268. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115711>
47. Lednev S.A., Semenov I.N., Klink G.V., Krechetov P.P., Sharapova A.V., Koroleva T.V. Impact of kerosene pollution on ground vegetation of southern taiga in the Amur

- Region, Russia // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144965>
48. *Narisawa S., Narisawa K.* The cellulolytic activity and symbiotic potential of dark septate endophytic fungus *Phialocephala fortinii* to promote non-mycorrhizal plants growth // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2021. V. 648. P. 012165. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012165>
49. *Ruschmeyer O.R., Schmidt E.L.* Cellulose Decomposition in Soil Burial Beds: II. Cellulolytic Activity as Influenced by Alteration of Soil Properties // *Appl. Microbiol.* 1958. V. 6. P. 115–120.
50. *Singh R., Rani A., Kumar P., Shukla G., Kumar A.* Cellulolytic Activity in Microorganisms // *Bull. Pure Appl. Sci. Botany.* 2017. V. 36b. P. 28–37. <https://doi.org/10.5958/2320-3196.2017.00004.0>
51. *Smith V.R., Steenkamp M., French D.D.* Soil decomposition potential in relation to environmental factors on Marion Island (Sub Antarctic) // *Soil Biol. Biochem.* 1993. V. 25. P. 1619–1633. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(93\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0038-0717(93)90018-7)
52. *Świtoniak M., Melke J., Bartmiński P.* The differences in cellulolytic activity of the Arctic soils of Calypsostranda, Spitsbergen // *Polar Rec. (Gr. Brit).* 2014. V. 50. P. 199–208. <https://doi.org/10.1017/S0032247413000247>
53. *Wasak K.* Forest soil science cellulose decomposition rate and features of organic matter in forest soils in the Tatra mountains // *Gruntoznawstvo.* 2014. V. 15. P. 70–80. <https://doi.org/10.15421/041407>
54. *Zhao Y., Li W., Zhou Z., Wang L., Pan Y., Zhao L.* Dynamics of microbial community structure and cellulolytic activity in agricultural soil amended with two biofertilizers // *Eur. J. Soil Biol.* 2005. V. 41. P. 21–29. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2005.03.002>

Influence of Kerosene Pollution on Cellulolytic Activity of Albic Retisols and Arenosols (Laboratory Experiment)

A. V. Sharapova^{1, *}, I. N. Semenov¹, P. P. Krechetov¹, S. A. Lednev¹, and T. V. Koroleva¹

¹ *Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

**e-mail: avsharapova@mail.ru*

The article presents the results of a laboratory experiment to study the influence of kerosene contamination of the A-horizon Albic Retisols (Kaluga region, Russia) and Arenosols (Kyzylorda region, Republic of Kazakhstan) on the cellulolytic activity of microbiocenosis. Cellulolytic activity (CA) was assessed by the rate of weight loss of linen in the incubation intervals of 0–3, 3–7 and 7–13 months. In the uncontaminated soddy-podzolic soil, the CA intensity is higher than in the sandy desert soil, which is due to the slightly acidic reaction of the environment, the increased content of organic matter and nutrients in it. Soil contamination with kerosene in the amount of up to 10 g/kg causes a reversible change in cellulolytic activity, both in sod-podzolic and sandy desert soils. High loads of kerosene (from 25 g/kg) cause inhibition of the CA of both soils during 13 months of observation.

Keywords: soil pollution, easily hydrolyzed organic matter, biochemical oxidation, Albic Retisols, Arenosols